

5 Testes Realizados

Neste capítulo são descritos grupos de instâncias para o PPA e apresentados resultados computacionais para os testes realizados. As instâncias utilizadas têm como base as operações reais de uma empresa transportadora de carga de grande porte.

Todos os testes foram realizados utilizando-se o ILOG CPLEX 10.0 em um computador com processador Intel(R) Core(TM)2 CPU T5500 1.67 GHz, com 2GB de RAM. Implementações foram realizadas em C++ em uma máquina rodando o Microsoft Windows XP Professional.

5.1 Instâncias

Instâncias são subdivididas em grupos de acordo com o número de demandas a serem atendidas, com o número de veículos disponíveis e de acordo com a malha rodoviária utilizada.

São criadas quatro malhas rodoviárias para a realização dos testes. A idéia é construir exemplos de malha com diferentes níveis de complexidade de forma a possibilitar a avaliação das soluções junto aos seus respectivos tempos de execução. As figuras a seguir ilustram grafos não orientados representando as malhas rodoviárias utilizadas nos testes realizados. Vértices representam centros de distribuição e arestas representam caminhos de custo mínimo entre eles.



Figura 5.1: Malha A: Malha rodoviária composta por 3 CD's e 6 arcos.

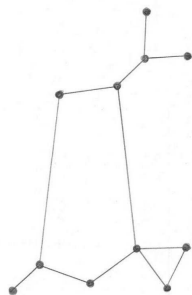


Figura 5.2: Malha B: Malha rodoviária composta por 11 CD's e 24 arcos.

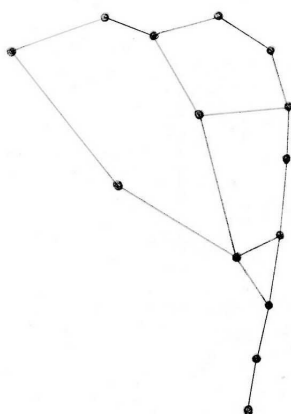


Figura 5.3: Malha C: Malha rodoviária composta por 14 CD's e 34 arcos.

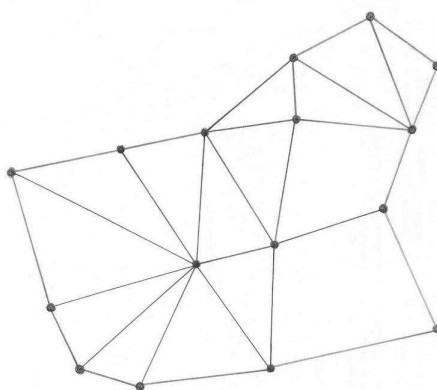


Figura 5.4: Malha D: Malha rodoviária composta por 16 CD's e 60 arcos.

As tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam as dimensões das instâncias testadas para cada uma das malhas consideradas. Nas colunas $|C|$, $|A|$, $|V|$ e $|D|$ é apresentado o número de centros de distribuição, arestas, veículos e demandas respectivamente. nC exibe o número de colunas e nL o número de linhas do problema para cada instância.

#	$ C $	$ A $	$ V $	$ D $	nC	nL
1	3	6	3	7	2468	1430
2	3	6	6	13	5333	3236
3	3	6	9	18	9428	5822
4	3	6	12	18	12509	7701

Tabela 5.1: Instâncias para a Malha A

#	$ C $	$ A $	$ V $	$ D $	nC	nL
1	11	24	5	23	6457	3425
2	11	24	10	23	12792	6670
3	11	24	25	27	39326	19629
4	11	24	30	30	56569	33634
5	11	24	34	30	57903	34314

Tabela 5.2: Instâncias para a Malha B

#	$ C $	$ A $	$ V $	$ D $	nC	nL
1	14	34	7	23	4257	2468
2	14	34	10	23	5821	3454
3	14	34	15	23	7952	4623
4	14	34	20	23	12313	7719
5	14	34	25	26	14968	9482
6	14	34	36	26	22634	14323
7	14	34	54	26	33151	21023

Tabela 5.3: Instâncias para a Malha C

#	C	A	V	D	nC	nL
1	16	60	16	16	7274	3972
2	16	60	29	31	14649	8027
3	16	60	37	31	17984	9184
4	16	60	40	46	23773	13656
5	16	60	47	53	30337	17843
6	16	60	47	53	33191	19782
7	16	60	52	56	34338	20576
8	16	60	60	67	38320	22297
9	16	60	60	73	39235	22860
10	16	60	63	77	40292	23329
11	16	60	65	10	45802	27047
12	16	60	71	109	50782	28435
13	16	60	101	109	67127	40363
14	16	60	141	109	99154	60566
15	16	60	164	121	114100	70326
16	16	60	164	134	121572	76060
17	16	60	190	164	109789	64567
18	16	60	190	262	116217	66261
19	16	60	190	357	132575	82101
20	16	60	30	413	22183	14182
21	16	60	40	413	29290	18629
22	16	60	50	413	36363	23044
23	16	60	60	413	43439	27453
24	16	60	113	413	85258	53652
25	16	60	190	413	139762	88213

Tabela 5.4: Instâncias para a Malha D

5.2

Resultados Computacionais

Como forma de se obter bons resultados utilizando-se o pacote CPLEX para as formulações apresentadas, foram realizados diversos testes de forma a se determinar uma otimização mais eficiente. Algumas alterações de configuração foram testadas:

- Foram definidas prioridades para *branching* nas variáveis de decisão de rota (zr) e de carga/descarga de mercadorias (xc e xd), proporcionando resultados mais satisfatórios. Variáveis zr foram associadas a prioridades mais altas seguido pelas variáveis do tipo xc e xd ;

- Etapas de *Polishing* logo após a execução do algoritmo de Branch-and-Cut e substituindo a execução do Branch-and-Cut foram experimentadas. Testes utilizando esta nova funcionalidade resultaram em melhorias consideráveis, principalmente para as instâncias mais complexas testadas;
- Diferentes métodos para a resolução da relaxação linear do problema foram experimentados. Em geral, foi possível notar uma vantagem considerável, em termos de eficiência, para o método da barreira quando comparado aos métodos simplex primal e dual.

Foram executadas rodadas de testes para cada uma das classes de instâncias definidas anteriormente, considerando as formulações apresentadas no capítulo 3.

A tabela 5.5 apresenta alguns resultados computacionais obtidos com a Estratégia 1.

Na coluna *Est.* indica-se a estratégia de solução testada, em $LPT(s)$ o tempo de execução para se resolver a relaxação linear do problema, e em $Tt(s)$ o tempo total de execução. A coluna *Gap0* exibe o *gap* inicial obtido com a primeira solução inteira encontrada, a coluna *Gap* exibe o *gap* após o término da execução do Branch-and-Cut, a coluna *Polishing* exibe o *gap* final após uma etapa de *Polishing*.

#	Est.	LPT(s)	Tt(s)	Gap0	Gap	Polishing
20	Est. 1	15.23	4427.37	40.91%	4.61%	4.25%
21	Est. 1	29.03	4259.51	44.30%	4.81%	4.79%
22	Est. 1	35.44	4354.59	59.20%	22.62%	12.18%
23	Est. 1	47.25	4350.65	98.60%	46.99%	37.93%
24	Est. 1	88.00	4536.55	349.92%	16.86%	7.76%

Tabela 5.5: Resultados computacionais para instâncias da malha D.

As tabelas 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam os resultados computacionais obtidos com a Estratégia 2 e a Estratégia 3.

#	Est.	LPt(s)	Tt(s)	Gap0	Gap	Polishing
1	Est. 2	0.13	0.81	0.00%	0.00%	-
2	Est. 2	0.31	6.88	5.19%	0.00%	-
3	Est. 2	0.61	6.69	51.28%	0.00%	-
4	Est. 2	0.86	16.97	51.24%	0.00%	-
1	Est. 3	0.12	1.59	8.23%	0.00%	-
2	Est. 3	0.31	8.25	9.97%	0.00%	-
3	Est. 3	0.56	12.46	9.78%	0.00%	-
4	Est. 3	0.86	18.72	13.32%	0.00%	-

Tabela 5.6: Resultados computacionais para instâncias da malha A.

#	Est.	LPt(s)	Tt(s)	Gap0	Gap	Polishing
1	Est. 2	0.14	1.71	220.34%	0.00%	-
2	Est. 2	0.28	4.44	149.57%	0.00%	-
3	Est. 2	25.50	3079.74	113.53%	0.30%	0.27%
4	Est. 2	1.67	3008.63	87.65%	0.26%	0.26%
5	Est. 2	1.83	3031.30	87.41%	0.23%	0.23%
1	Est. 3	0.09	2.29	7.13%	0.00%	-
2	Est. 3	0.22	5.25	11.12%	0.00%	-
3	Est. 3	24.83	3008.07	7.23%	0.71%	0.26%
4	Est. 3	1.80	3057.76	6.99%	0.27%	0.26%
5	Est. 3	1.81	3038.46	7.40%	0.23%	0.23%

Tabela 5.7: Resultados computacionais para instâncias da malha B.

#	Est.	LPt(s)	Tt(s)	Gap0	Gap	Polishing
1	Est. 2	0.70	7.24	114.71%	0.00%	-
2	Est. 2	0.66	8.19	10.94%	0.00%	-
3	Est. 2	1.16	309.74	212.14%	0.00%	-
4	Est. 2	1.13	16.70	29.32%	0.00%	-
5	Est. 2	1.34	425.09	65.65%	0.00%	-
6	Est. 2	2.09	1819.22	71.07%	0.00%	-
7	Est. 2	8.69	3078.57	144.40%	0.02%	0.02%
1	Est. 3	0.67	12.44	13.77%	0.00%	-
2	Est. 3	0.50	14.16	18.01%	0.00%	-
3	Est. 3	0.70	52.22	32.30%	0.00%	-
4	Est. 3	1.13	22.08	28.17%	0.00%	-
5	Est. 3	1.36	353.55	27.18%	0.00%	-
6	Est. 3	2.09	2003.32	37.76%	0.00%	-
7	Est. 3	7.51	3307.24	39.87%	0.02%	0.02%

Tabela 5.8: Resultados computacionais para instâncias da malha C.

#	Est.	LPt(s)	Tt(s)	Gap0	Gap	Polishing
1	Est. 2	1.11	3910.92	96.42%	0.85%	0.85%
2	Est. 2	3.06	3917.61	207.69%	0.79%	0.79%
3	Est. 2	4.13	3916.05	199.95%	0.69%	0.69%
4	Est. 2	5.38	3961.79	1823.95%	0.88%	0.85%
5	Est. 2	8.50	4070.52	171.14%	0.84%	0.82%
6	Est. 2	10.14	3980.38	368.40%	0.85%	0.82%
7	Est. 2	11.09	4001.04	292.88%	1.23%	0.84%
8	Est. 2	10.67	4145.38	11901.11%	3.13%	2.88%
9	Est. 2	13.14	3999.42	18972.40%	6.59%	4.10%
10	Est. 2	11.75	3973.70	23717.25%	5.35%	5.22%
11	Est. 2	14.02	4024.75	10472.98%	18.72%	8.85%
12	Est. 2	15.77	3971.22	100.55%	1.01%	1.00%
13	Est. 2	24.84	3990.97	476.78%	2.83%	0.99%
14	Est. 2	34.73	4060.67	560.42%	1.76%	0.82%
15	Est. 2	45.64	4056.51	926.63%	3.62%	1.40%
16	Est. 2	54.77	4063.65	19927.39%	70.80%	4.99%
17	Est. 2	42.77	4179.77	277.92%	1.55%	0.73%
18	Est. 2	47.14	4192.15	764.73%	23.08%	6.30%
19	Est. 2	57.39	4250.37	589.79%	338.54%	35.80%
20	Est. 2	17.14	4277.82	33.79%	2.35%	2.34%
21	Est. 2	22.98	4261.85	43.32%	6.74%	6.03%
22	Est. 2	32.08	4278.64	68.65%	12.54%	10.63%
23	Est. 2	37.41	4325.65	82.10%	36.01%	27.55%
24	Est. 2	40.98	4409.64	288.09%	71.90%	31.18%
25	Est. 2	77.88	4300.59	412.51%	325.75%	17.59%

Tabela 5.9: Resultados computacionais para instâncias da malha D utilizando-se a Estratégia 2.

#	Est.	LPt(s)	Tt(s)	Gap0	Gap	Polishing
1	Est. 3	1.09	3021.07	4.85%	0.83%	0.83%
2	Est. 3	3.47	3054.64	66.15%	0.76%	0.76%
3	Est. 3	3.83	3084.03	30.94%	0.69%	0.69%
4	Est. 3	6.25	3108.56	38.15%	0.87%	0.85%
5	Est. 3	7.39	3149.76	33.19%	0.75%	0.75%
6	Est. 3	9.91	3348.98	93.65%	0.87%	0.81%
7	Est. 3	9.73	3714.98	23.34%	0.89%	0.81%
8	Est. 3	11.05	3536.08	105.36%	2.72%	2.53%
9	Est. 3	13.70	3509.86	120.34%	4.40%	3.87%
10	Est. 3	11.31	3298.61	158.37%	4.63%	4.47%
11	Est. 3	15.50	5562.93	76.95%	10.17%	4.34%
12	Est. 3	15.81	3291.84	29.53%	1.06%	1.06%
13	Est. 3	24.84	3796.73	23.34%	1.47%	0.90%
14	Est. 3	39.44	4045.07	96.87%	0.91%	0.79%
15	Est. 3	45.87	4730.95	100.48%	1.17%	1.16%
16	Est. 3	57.62	4724.28	225.86%	42.33%	5.09%
17	Est. 3	42.23	3652.79	96.46%	0.83%	0.77%
18	Est. 3	50.74	4252.07	97.14%	5.24%	5.18%
19	Est. 3	58.75	4262.16	98.94%	15.29%	7.78%
20	Est. 3	13.73	5612.98	5.78%	2.41%	2.41%
21	Est. 3	27.42	5497.35	10.42%	5.87%	5.84%
22	Est. 3	29.00	5544.99	22.06%	11.45%	10.34%
23	Est. 3	27.56	5564.68	31.61%	27.08%	24.05%
24	Est. 3	37.78	4995.97	288.09%	71.90%	31.04%
25	Est. 3	77.56	4479.84	44.41%	18.60%	3.45%

Tabela 5.10: Resultados computacionais para instâncias da malha D utilizando-se a Estratégia 3.

Uma forma fácil de comparar os resultados obtidos para as diferentes estratégias de resolução é ilustrada através das figuras 5.5 e 5.6. Os gráficos exibem totais em *quantidade de demanda não atendida(Kg)* para cada solução viável obtida durante o *tempo de execução(s)* das estratégias de resolução apresentadas para duas instâncias grandes do problema. Para instâncias menores do problema, as estratégias de resolução apresentadas praticamente se igualam em termos de desempenho e qualidade de solução. Já para instâncias maiores, a *Estratégia 3* normalmente leva vantagem.

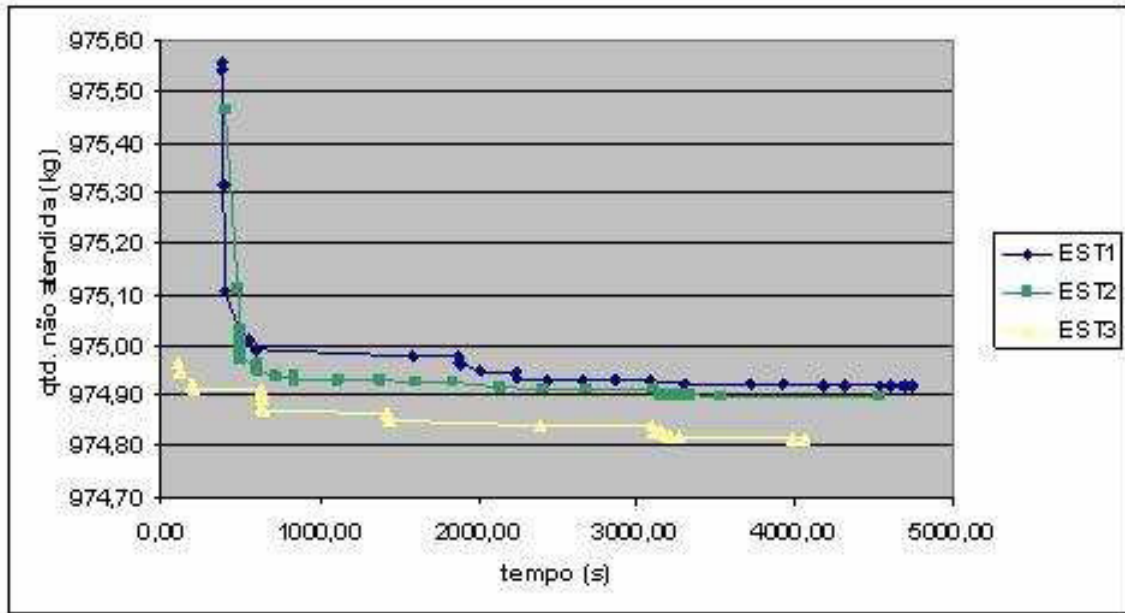


Figura 5.5: Comparação de estratégias.

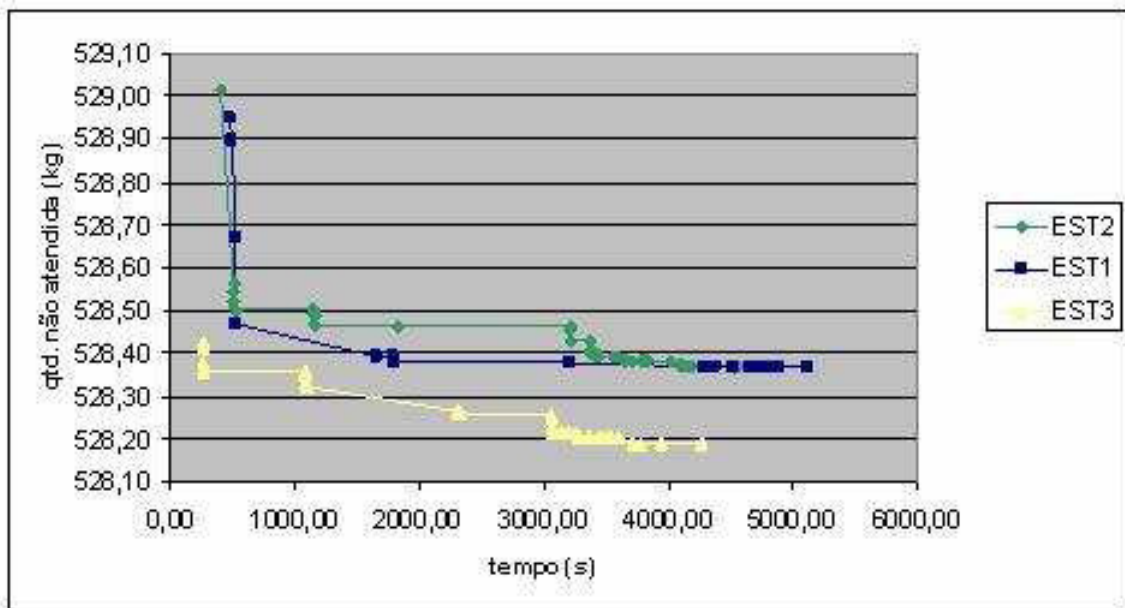


Figura 5.6: Comparação de estratégias.

Através da análise dos resultados, foi possível perceber que a complexidade de instâncias do problema depende principalmente de uma relação entre o número de veículos disponíveis e o número de demandas por transporte de carga existentes. O problema se torna bem mais difícil quando o número de veículos disponíveis é bem próximo do número de recursos mínimos necessários

para o transporte das cargas. Instâncias com excesso ou escassez de veículos normalmente são resolvidos com mais facilidade.

Níveis de dificuldade para a resolução de instâncias do problema também costumam depender das janelas de tempo para o atendimento das demandas. Ao se aumentar os intervalos para o transporte de cargas, níveis de complexidade aumentam consideravelmente.

Comparando-se resultados computacionais para as diversas instâncias testadas, percebe-se que as estratégias de resoluções propostas (Estratégia 1, 2 e 3) resolveram a grande maioria das instâncias testadas na otimalidade.

Para instâncias pequenas do problema, as estratégias de resolução praticamente igualaram-se em termos de resultados e eficiência. Já para instâncias mais complexas, a Estratégia 3 leva vantagem quando comparada à Estratégia 2.

O que ocorre é que utilizando-se a Estratégia 2 para instâncias mais difíceis do problema, a primeira solução encontrada pelo CPLEX costuma ser muito ruim. Portanto, vale a pena investir alguns minutos para se obter um *gap* inicial menor.

Algoritmos de pré-processamento apresentados no capítulo 4 são essenciais para a resolução de instâncias reais dos problemas apresentados. Considerando as técnicas de pré-processamento implementadas e os testes realizados, cerca de 30% das arestas de deslocamento de demandas e 10% das arestas de deslocamento de veículos puderam ser eliminadas do problema.

Algumas das instâncias testadas não puderam ser resolvidas na otimalidade. Com o objetivo comprovar o ótimo para estas instâncias, desigualdades para eliminação de simetria são propostas. Na tabela 5.11 são apresentados alguns resultados computacionais considerando a adição das restrições de simetria apresentadas no capítulo 4.

Pode-se dizer que a inclusão das desigualdades de simetria apresentadas proporcionaram melhor desempenho à otimização. Tal alteração melhorou suavemente os resultados para as instâncias testadas, mas não foi possível comprovar a otimalidade para as instâncias em aberto testadas.

A tabela 5.11 apresenta resultados computacionais obtidos para algumas instâncias com a otimalidade não comprovada.

#	Est.	LPt(s)	Tt(s)	Gap0	Gap	Polishing
1	Est. 3	3.11	3000.00	8.30%	0.82%	0.82%
8	Est. 3	24.72	3512.10	215.07%	2.51%	2.51%
13	Est. 3	25.14	3604.67	23.34%	0.97%	0.90%
20	Est. 3	30.30	4563.36	5.62%	2.35%	2.25%
25	Est. 3	77.56	4409.02	54.45%	18.00%	3.52%

Tabela 5.11: Resultados computacionais para instâncias da malha D utilizando-se a Estratégia 3 e restrições para eliminar simetria.