

Parte III

Conclusão

6

Experimentos Computacionais

6.1

Introdução

Esse capítulo trata dos experimentos computacionais realizados e dos resultados obtidos que comprovam a eficácia tanto da abordagem exata como da abordagem heurística deste trabalho para o *TOP*.

O algoritmo *Branch-Cut-and-Price* proposto foi capaz de encontrar limites superiores de qualidade, tendo, para muitas instâncias melhorado os melhores limites encontrados na literatura. Para algumas instâncias, foi possível encontrar também soluções inteiras. Essa abordagem foi testada para um subconjunto de instâncias da literatura que foi testado também pelos autores de trabalhos relacionados como o de Boussier et al. (BFG07).

A abordagem heurística, por sua vez, foi capaz de gerar soluções inteiras iguais ou próximas às melhores soluções encontradas na literatura. Um outro subconjunto de instâncias foi selecionado para testar a abordagem heurística, considerando sempre instâncias que foram testadas pelos trabalhos que usam heurísticas, como, por exemplo, o trabalho de Archetti et al. (AHS07). Em alguns casos, foi possível provar a otimalidade das soluções geradas pela abordagem heurística.

6.2

Cenários de Teste

Os algoritmos foram testados utilizando-se como dados de entrada para o problema as instâncias propostas no trabalho de Chao et al. (CGW96).

Esse conjunto de instâncias está subdividido em 7 (sete) subconjuntos de dados. Cada conjunto de instâncias tem uma quantidade específica de número de vértices, cuja quantidade varia de 21 a 102 vértices. Para um dado número de vértices, existem diferentes instâncias variando-se a quantidade de veículos disponíveis na frota (m), bem como o valor do tempo máximo de duração das rotas (L).

Todos os experimentos foram realizados em um notebook com processador *Intel Core Duo* (mas usando um único *core*) com um *clock* de *1.66GHz* e *2GB* de memória RAM.

6.3

Resultados

As tabelas 6.6, 6.7, 6.8, 6.10, 6.9, 6.11, 6.12, 6.13 e 6.14 fazem um comparativo entre os limites superiores obtido por Boussier et al. (BFG07) e os limites encontrados neste trabalho que também foram reportados em Poggi et al. (PVU10).

Essas tabelas têm os seguintes campos:

- *Instance* é o nome da instância;
- *m* é o número de veículos;
- *BFG* são os limites superiores encontrados por Boussier et al. (BFG07);
- *PVU* são os limites superiores encontrados neste trabalho e alguns deles publicados em Poggi et al. (PVU10);
- *Dist* é a distância entre os limites superiores comparados;
- *Time* indica o tempo computacional gasto para encontrar o limite superior.

Nas instâncias nas quais não ocorreu empate, em 21 delas o algoritmo exato desta tese encontrou limites melhores do que os limites superiores de Boussier et al. (BFG07). Em 16 instâncias, o limite de Boussier et al. (BFG07) foi menor do que os apresentados nesta tese. A coluna *Dist* retrata o percentual da distância entre os limites superiores desses dois trabalhos. No geral, a distância média entre os limites foi de 0,77% favorável aos limites apresentados nesta tese.

A abordagem heurística foi testada para uma grande quantidade de instâncias e os resultados são apresentados nas tabelas 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5. As instâncias foram executadas com o tempo limite de duas horas.

Essas tabelas possuem os seguintes campos:

- *Instance* é o nome da instância;
- *GTP* é o algoritmo *GENETIC_TABU_PENALTY*, proposto por Archetti et al. (AHS07). Os valores Z_{min} e Z_{max} indicam a pior e a melhor solução encontrada por esse algoritmo;
- *GTF* é o algoritmo *GENETIC_TABU_FEASIBLE*, proposto por Archetti et al. (AHS07). Os valores Z_{min} e Z_{max} indicam a pior e a melhor solução encontrada por esse algoritmo;

- *FVF* é o algoritmo *FAST_VNS_FEASIBLE*, proposto por Archetti et al. (AHS07). Os valores Z_{min} e Z_{max} indicam a pior e a melhor solução encontrada por esse algoritmo;
- *SVF* é o algoritmo *SLOW_VNS_FEASIBLE*, proposto por Archetti et al. (AHS07). Os valores Z_{min} e Z_{max} indicam a pior e a melhor solução encontrada por esse algoritmo;
- *TMH* é o valor da solução obtida por Tang e Miller-Hooks (TMH05);
- *CGW* é o valor da solução obtida por Chao et al. (CGW96);
- *BFG* é o valor da solução obtida por Boussier et al. (BFG07);
- *PVU* é o valor da solução obtida nesta tese;
- *BEST* é o valor da melhor solução encontrada na literatura;
- *DIST* é a distância entre a melhor solução conhecida na literatura e a solução encontrada neste trabalho.

Em relação à abordagem heurística, conforme foi já comentado no capítulo 5, ela mostrou-se muito relevante já que, mesmo partindo de uma solução inicial com um *gap* muito elevado, a convergência acontece muitas vezes para a melhor solução conhecida ou próxima da melhor.

A distância média entre a solução encontrada na abordagem aqui apresentada e a melhor solução conhecida da literatura foi de 1,86%. Acredita-se que investindo-se mais na heurística de arredondamento da solução fracionária encontrada nos nós da árvore do BCP da busca elipsoidal, pode-se reduzir ainda mais essa distância.

Tabela 6.1: Resultados do AE + BCP + Cortes Elipsoidais - 32 vértices

instance	GTP		GTF		FVF		SVF		TMH	CGW	BFG	PVU	BEST	DIST
	z min	z max	z min	z max	z min	z max	z min	z max						
p1.2.a.txt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1.2.b.txt	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	0
p1.2.c.txt	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	0
p1.2.e.txt	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	0
p1.2.f.txt	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	0
p1.2.g.txt	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	0
p1.2.n.txt	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	235	0
p1.3.a.txt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1.3.b.txt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1.3.c.txt	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	0
p1.3.d.txt	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	0
p1.3.e.txt	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	0
p1.3.f.txt	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	0
p1.3.g.txt	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	0
p1.3.i.txt	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105	0
p1.3.k.txt	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	0
p1.3.r.txt	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	0
p1.4.a.txt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1.4.b.txt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1.4.c.txt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p1.4.d.txt	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	0
p1.4.e.txt	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	0
p1.4.f.txt	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	0
p1.4.g.txt	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	0
p1.4.h.txt	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	0
p1.4.i.txt	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	0
p1.4.j.txt	75	75	75	75	75	75	75	75	75	70	75	75	75	0
p1.4.l.txt	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	0
p1.4.m.txt	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	130	0
p1.4.n.txt	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	155	125	155	19.35
p1.4.o.txt	165	165	165	165	165	165	165	165	165	160	165	165	165	0
p1.4.p.txt	175	175	175	175	175	175	175	175	175	160	175	175	175	0
p1.4.q.txt	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190	0
p1.4.r.txt	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	210	0

Tabela 6.2: Resultados do AE + BCP + Cortes Elipsoidais - 33 vértices

instance	GTP		GTF		FVF		SVF		TMH	CGW	BFG	PVU	BEST	DIST
	z min	z max	z min	z max	z min	z max	z min	z max						
p3.2.d.txt	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	0
p3.2.l.txt	590	590	590	590	590	590	590	590	590	590		590	590	0
p3.2.m.txt	610	620	620	620	620	620	620	620	620	620		620	620	0
p3.3.i.txt	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	0
p3.3.s.txt	720	720	700	720	720	720	720	720	710	710		660	720	8.33
p3.4.l.txt	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380	0
p3.4.n.txt	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	440	0

Tabela 6.3: Resultados do AE + BCP + Cortes Elipsoidais - 100 vértices

instance	GTP		GTF		FVF		SVF		TMH	CGW	BFG	PVU	BEST	DIST
	z min	z max	z min	z max	z min	z max	z min	z max						
p4.2.a.txt	206	206	206	206	206	206	206	206	202	194	206	206	206	0
p4.2.c.txt	452	452	452	452	452	452	452	452	438	440	452	452	452	0
p4.3.a.txt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p4.3.b.txt	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	0
p4.3.d.txt	334	335	335	335	333	335	335	335	333	333	335	298	335	11.04
p4.3.e.txt	468	468	468	468	461	468	468	468	465	432	468	468	468	0
p4.3.f.txt	579	579	579	579	579	579	579	579	579	552	579	478	579	17.44
p4.3.g.txt	649	651	652	652	647	653	653	653	646	623	653	651	653	0.30
p4.4.f.txt	324	324	324	324	324	324	324	324	315	304	324	324	324	0
p4.4.j.txt	729	731	728	731	723	732	732	732	732	697	732	610	732	16.66

Tabela 6.4: Resultados do AE + BCP + Cortes Elipsoidais - 66 vértices

instance	GTP		GTF		FVF		SVF		TMH	CGW	BFG	PVU	BEST	DIST
	z min	z max	z min	z max	z min	z max	z min	z max						
p5.2.j.txt	580	580	580	580	580	580	580	580	560	580	580	580	580	0
p5.2.k.txt	670	670	670	670	670	670	670	670	670	670	670	670	670	0
p5.2.l.txt	800	800	800	800	800	800	800	800	770	790		800	800	0
p5.3.k.txt	495	495	495	495	495	495	495	495	495	480	495	495	495	0
p5.4.l.txt	430	430	430	430	430	430	430	430	430	430	430	420	430	2.32
p5.4.p.txt	765	765	765	765	760	765	765	765	760	750	765	675	765	11.76
p5.4.r.txt	955	960	960	960	960	960	960	960	960	950	960	790	960	17.70
p5.4.s.txt	1025	1025	1030	1030	1025	1030	1030	1030	1000	1020		915	1030	11.16

Tabela 6.5: Resultados do AE + BCP + Cortes Elipsoidais - 64 vértices

instance	GTP		GTF		FVF		SVF		TMH	CGW	BFG	PVU	BEST	DIST
	z min	z max	z min	z max	z min	z max	z min	z max						
p6.2.a.txt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p6.2.b.txt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p6.2.c.txt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p6.2.d.txt	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	192	0
p6.2.e.txt	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	276	360	23.33
p6.2.f.txt	588	588	588	588	588	588	588	588	588	588	588	588	588	0
p6.2.g.txt	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	660	0
p6.2.h.txt	780	780	780	780	780	780	780	780	780	780	780	774	780	0.77
p6.2.i.txt	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	888	732	888	17.57
p6.3.d.txt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p6.3.e.txt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p6.3.f.txt	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
p6.3.i.txt	642	642	642	642	642	642	642	642	612	642	642	642	642	0
p6.3.j.txt	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	828	0
p6.3.m.txt	1074	1080	1080	1080	1080	1080	1080	1080	1080	1080		750	1080	30.55
p6.3.n.txt	1152	1170	1170	1170	1170	1170	1170	1170	1152	1158	1170	900	1170	23.08
p6.4.j.txt	366	366	366	366	366	366	366	390	366	366	390	366	390	6.15
p6.4.k.txt	528	528	528	528	528	528	528	528	522	546	546	480	546	12.09
p6.4.l.txt	684	696	696	696	696	696	696	696	696	690	696	696	696	0

Tabela 6.6: Comparativo de Limites Superiores - Instâncias de 32 vértices

Instance	m	BFG	PVU	DIST	Time
p1.2.a.txt	2	0	0	0	0.01
p1.2.b.txt	2	15	15	0	0.02
p1.2.c.txt	2	20	20	0	0.14
p1.2.d.txt	2	30	30	0	0.28
p1.2.e.txt	2	45	45	0	0.18
p1.2.f.txt	2	80	80	0	0.26
p1.2.g.txt	2	90	90	0	2.11
p1.2.h.txt	2	112.5	111.667	-0.75	4.23
p1.2.i.txt	2	135	135	0	7.29
p1.2.j.txt	2	157.5	155	-1.61	8.67
p1.2.k.txt	2	176	177.167	0.66	25.59
p1.2.l.txt	2	195	196.4	0.71	82.5
p1.2.m.txt	2	215	217.5	1.14	10.52
p1.2.n.txt	2	235	235	0	104.16
p1.2.o.txt	2	240	245.34	2.17	30.29
p1.3.a.txt	3	0	0	0	0.01
p1.3.b.txt	3	0	0	0	0.01
p1.3.c.txt	3	15	15	0	0.01
p1.3.d.txt	3	15	15	0	0.03
p1.3.e.txt	3	30	30	0	0.09
p1.3.f.txt	3	40	40	0	0.16
p1.3.g.txt	3	50	50	0	0.13
p1.3.h.txt	3	70	72.5	3.44	0.69
p1.3.i.txt	3	105	105	0	0.27
p1.3.j.txt	3	115	115	0	0.82
p1.3.k.txt	3	135	135	0	1.22
p1.3.l.txt	3	155	155	0	6.25
p1.3.m.txt	3	177.5	177.5	0	11.5
p1.3.n.txt	3	191.667	195	1.71	13.75
p1.3.o.txt	3	205	208.6	1.51	7.64
p1.3.p.txt	3	220	220	0	12.46
p1.3.q.txt	3	234	232.273	-0.74	32.43
p1.3.r.txt	3	252.5	252.5	0	37.1731

Tabela 6.7: Comparativo de Limites Superiores - Instâncias de 32 vértices

Instance	m	BFG	PVU	DIST	Time
p1.4.a.txt	4	0	0	0	0.1
p1.4.b.txt	4	0	0	0	0.1
p1.4.c.txt	4	0	0	0	0.1
p1.4.d.txt	4	15	15	0	0.1
p1.4.e.txt	4	15	15	0	0.1
p1.4.f.txt	4	25	25	0	0.1
p1.4.g.txt	4	35	35	0	0.1
p1.4.h.txt	4	45	45	0	0.2
p1.4.i.txt	4	60	60	0	0.22
p1.4.j.txt	4	75	75	0	0.28
p1.4.k.txt	4	100	100	0	1.12
p1.4.l.txt	4	120	120	0	0.71
p1.4.m.txt	4	131.667	130	-1.28	1.8
p1.4.n.txt	4	155	160	3.13	1.21
p1.4.o.txt	4	165	165	0	2.2
p1.4.p.txt	4	175	175	0	1.53
p1.4.q.txt	4	190	190	0	5.5
p1.4.r.txt	4	210	210	0	3.61

Tabela 6.8: Comparativo de Limites Superiores - Instâncias de 21 vértices

Instance	m	BFG	PVU	DIST	Time
p2.2.a.txt	2	90	90	0	0.11
p2.2.b.txt	2	120	120	0	0.42
p2.2.c.txt	2	140	140	0	0.59
p2.2.d.txt	2	160	160	0	1.92
p2.2.e.txt	2	190	192	1.04	14.53
p2.2.f.txt	2	200	200	0	1.27
p2.2.g.txt	2	200	200	0	1.94
p2.2.h.txt	2	230	230	0	1.73
p2.2.i.txt	2	230	230	0	2.23
p2.2.j.txt	2	260	260	0	6.26
p2.2.k.txt	2	284	287.93	1.36	7.16

Tabela 6.9: Comparativo de Limites Superiores - Instâncias de 33 vértices

Instance	m	BFG	PVU	DIST	Time
p3.2.a.txt	2	90	90	0	0.27
p3.2.b.txt	2	150	150	0	0.39
p3.2.c.txt	2	180	189.87	5.19	42.05
p3.2.d.txt	2	223.333	224	0.30	3.82
p3.2.e.txt	2	262	275	4.96	2.09
p3.2.f.txt	2	300	320	6.25	6.03
p3.2.g.txt	2	360	380	5.26	4.86
p3.2.h.txt	2	417.5	410	-1.83	79.02
p3.2.i.txt	2	460	475.64	3.28	18.74
p3.2.j.txt	2	518	510.663	-1.44	82.81
p3.2.k.txt	2	566.667	550	-3.03	320.2
p3.2.l.txt	2	605	605	0	933.75
p3.2.m.txt	2		620	0	210.57
p3.2.n.txt	2		660.223	0	228.36
p3.2.p.txt	2		723.333	0	360.48
p3.2.t.txt	2	800	800	0	65.47
p3.3.a.txt	3	30	30	0	0.25
p3.3.b.txt	3	90	90	0	0.99
p3.3.c.txt	3	120	120	0	0.46
p3.3.d.txt	3	170	170	0	0.61
p3.3.e.txt	3	200	203.33	0	2.14
p3.3.f.txt	3	230	230	0	4.4
p3.3.g.txt	3	<i>273.33</i>	275.55	0.8	4.34
p3.3.h.txt	3	<i>300</i>	315.55	5.18	4.67
p3.3.i.txt	3	336.667	336.667	0	49.8
p3.3.j.txt	3	390	380	-2.63	76.83
p3.3.k.txt	3	450	440	-2.27	25.65
p3.3.l.txt	3	488	485	-0.62	154.5
p3.3.m.txt	3	526.667	520.26	-1.23	135.31
p3.3.n.txt	3	571.667	575	0.58	53.4
p3.3.o.txt	3	609.804	595.144	-2.46	83.23
p3.3.p.txt	3	658.182	669	1.61	34.39
p3.3.q.txt	3	684.137	697.25	1.88	
p3.3.r.txt	3	710	718.88	1.23	39.34
p3.3.s.txt	3	738.913	736.25	-0.36	693.2

Tabela 6.10: Comparativo de Limites Superiores - Instâncias de 33 vértices

Instance	m	BFG	PVU	DIST	Time
p3.4.a.txt	4	20	20	0	0.17
p3.4.b.txt	4	30	30	0	0.18
p3.4.c.txt	4	90	90	0	0.41
p3.4.d.txt	4	100	100	0	1.07
p3.4.f.txt	4	190	190	0	1.69
p3.4.g.txt	4	220	220	0	1.19
p3.4.h.txt	4	240	246.66	2.7	2.56
p3.4.i.txt	4	270	270	0	1.23
p3.4.j.txt	4	310	315.55	1.75	2.56
p3.4.l.txt	4	380	380	0	31.64
p3.4.m.txt	4	390	390	0	42.19
p3.4.n.txt	4	446.667	446.667	0	52.55
p3.4.p.txt	4	560	566.667	1.18	18.74
p3.4.q.txt	4	574.667	570.87	-0.67	37.03

Tabela 6.11: Comparativo de Limites Superiores - Instâncias de 100 vértices

Instance	m	BFG	PVU	DIST	Time
p4.2.a.txt	2	206	206	0	205.7
p4.2.c.txt	2	458	458	0	225.26
p4.3.a.txt	3	0	0	0	12.75
p4.3.b.txt	3	38	38	0	16.15
p4.3.d.txt	3	339	342	0.88	21.81
p4.3.e.txt	3	468.75	469.2	0.10	444.61
p4.3.f.txt	3	584.5	581.806	-0.46	190.06
p4.3.g.txt	3	656.375	653.095	-0.50	413.52
p4.4.e.txt	4	183	183	0	0.70
p4.4.f.txt	4	324	324	0	4.19
p4.4.g.txt	4	462	466.5	0.96	12.59
p4.4.h.txt	4	571	572.111	0.19	85.22
p4.4.i.txt	4	665.4	666.75	0.20	139.42
p4.4.j.txt	4	741.472	736.408	-0.69	2081.11
p4.4.k.txt	4	831.945	825.411	-0.79	5385.07

Tabela 6.12: Comparativo de Limites Superiores - Instâncias de 66 vértices

Instance	m	BFG	PVU	DIST	Time
p5.2.b.txt	2	20	20	0	0.17
p5.2.c.txt	2	50	50	0	0.23
p5.2.d.txt	2	80	80	0	0.42
p5.2.e.txt	2	180	180	0	1.32
p5.2.g.txt	2	320	320	0	10.56
p5.2.j.txt	2	580	580	0	380.98
p5.2.k.txt	2	670	670	0	956.15
p5.2.l.txt	2		800	0	1203.41
p5.3.k.txt	3	495	495	0	147.01
p5.3.m.txt	3	650	650	0	28.13
p5.3.n.txt	3	755	755	0	51.66
p5.3.p.txt	3	990	990	0	80.37
p5.4.l.txt	4	430	430	0	103.22
p5.4.p.txt	4	765	790	3.16	36.01
p5.4.r.txt	4	960	960	0	61.3
p5.4.s.txt	4	1055	1068	1.22	103.22
p5.4.t.txt	4	1160	1160	0	70.15
p5.4.u.txt	4	1300	1300	0	137.53
p5.4.v.txt	4	1320	1320	0	112.89

Tabela 6.13: Comparativo de Limites Superiores - Instâncias de 64 vértices

Instance	m	BFG	PVU	DIST	Time
p6.2.a.txt	2	0	0	0	0.96
p6.2.b.txt	2	0	0	0	0.1
p6.2.c.txt	2	0	0	0	0.1
p6.2.d.txt	2	192	192	0	6.13
p6.2.e.txt	2	360	384	6.25	10.45
p6.2.f.txt	2	588	588	0	11.43
p6.2.g.txt	2	660	660	0	17.93
p6.2.h.txt	2	780	780	0	63.92
p6.2.i.txt	2	888	888	0	214.35
p6.3.i.txt	3	642	642	0	61
p6.3.j.txt	3	828	828	0	24.8
p6.3.m.txt	3	1104	1084.36	-1.81	252.99
p6.3.n.txt	3	1170	1170	0	266.33
p6.4.j.txt	4	390	366	-6.56	0.92
p6.4.l.txt	4	696	724	3.87	10.78
p6.4.n.txt	4	1068	1068	0	31.72

Tabela 6.14: Comparativo de Limites Superiores - Instâncias de 102 vértices

Instance	m	BFG	PVU	DIST	Time
p7.3.f.txt	3	247	247	0	3.98
p7.3.g.txt	3	344	344	0	22.96
p7.3.h.txt	3	429	431.958	0.68	73.99
p7.4.i.txt	4	366	366	0	18.59
p7.4.j.txt	4	462	462	0	54.65