

Meta-Heurísticas Híbridas para Solução do Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos e Frota Heterogênea Fixa: Aplicação na Força Aérea Brasileira

Ulisses de Oliveira Bonasser

Instituto de Logística da Aeronáutica – ILA, Avenida Monteiro Lobato, 6365, Cumbica, 07184-000, Guarulhos - SP

Nicolau Dionísio Fares Gualda

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP, Avenida Prof. Luciano Gualberto, travessa 3, nº 380, 05508-900, São Paulo - SP

Resumo — Este artigo resume a pesquisa de uma tese de doutoramento que soluciona o problema de roteirização de veículos com múltiplos depósitos e frota heterogênea fixa (PRVMDHET). A revisão da literatura não indica nenhum método implementado para solução desse problema. O estudo propõe uma nova meta-heurística híbrida (método *Routing AntS*), baseada na heurística de economias e nas meta-heurísticas Busca Tabu (MBT) e Colônia de Formigas (MCF). Os métodos propostos abordam conjuntos de instâncias clássicas, um novo conjunto de instâncias e um caso da Força Aérea Brasileira. São apresentados aspectos dos métodos propostos, dos resultados e sugestões para futura pesquisa.

Palavras-chaves — Pesquisa operacional, heurística, meta-heurística, roteirização.

I. INTRODUÇÃO

O problema de roteirização de veículos (PRV) é de grande importância para o gerenciamento das atividades de distribuição e, por isso, tornou-se um dos mais estudados problemas de otimização combinatória [9]. Mesmo em sua forma padrão, o PRV pode ser classificado como *NP*-difícil, pois possui uma ordem de complexidade exponencial [4]. O problema abordado neste trabalho representa uma situação real que é encontrada, por exemplo, em algumas operações da Força Aérea Brasileira (FAB). Ele inclui uma frota heterogênea, fixada *a priori*, operando a partir de múltiplos depósitos e obedecendo a restrições de capacidade e de autonomia. O objetivo desta pesquisa é adaptar, desenvolver e testar métodos computacionais para a solução do PRVMDHET. Adicionalmente, também busca explorar o desempenho das meta-heurísticas no tocante aos mecanismos de intensificação e diversificação.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A. Solução do PRV

Algoritmos exatos, que fornecem solução ótima, apresentam elevado tempo de processamento, o que torna proibitiva a sua utilização para a solução da maioria dos problemas *NP*-difíceis de ordem prática. Por isso, [14] sugere a utilização de métodos aproximativos, tais como heurísticas e meta-

heurísticas. Heurísticas são procedimentos que buscam por soluções eficientes, ou seja, soluções boas obtidas em, no máximo, tempo polinomial, por meio do uso de algoritmos aproximativos. Referências [10]-[14] sugerem a classificação das heurísticas em duas categorias, métodos construtivos e métodos de melhoria.

Meta-heurísticas, por sua vez, são procedimentos iterativos de alto nível que utilizam heurísticas subordinadas para a obtenção de soluções aproximadas, empregando estratégias que sobrepujam as limitações inerentes a essas heurísticas no tocante à exploração do espaço amostral [3]-[18]. Referências [9]-[27] classificam as meta-heurísticas de acordo com o seu princípio básico de funcionamento: busca local, busca na população (*population search*) e híbridas.

A exploração de uma determinada região do espaço amostral ou da vizinhança de boas soluções que já tenham sido encontradas é chamada de “intensificação”, e possui um caráter local. A exploração do espaço amostral em busca de regiões promissoras e o escape de áreas já suficientemente pesquisadas são chamadas de “diversificação”, e apresentam um caráter global. Portanto, a eficiência de uma meta-heurística é dependente dos mecanismos de intensificação e de diversificação nela incorporados.

Vários métodos já foram utilizados na solução, ótima ou aproximada, de diversas variações do PRV padrão. Não foi encontrada, porém, nenhuma aplicação ao conjunto particular de restrições que caracterizam o PRVMDHET. A análise dos métodos propostos para a solução de problemas correlatos ao PRVMDHET pode sugerir possíveis linhas de ação.

B. Variantes do PRV Correlatas ao PRVMDHET

Há três variantes do PRV que apresentam condicionantes próximas às do problema descrito: o PRV com múltiplos depósitos (PRVMD), o PRV com frota heterogênea (PRVHET) e o PRV com determinação do tamanho e da composição da frota (PRVTCF).

Poucos trabalhos abordam o PRVHET. O primeiro conjunto de instâncias foi proposto somente em [25]. Nesse problema, como a frota é fixa e conhecida *a priori*, os custos fixos dos veículos não são relevantes. Alguns autores sugerem que esse problema pode ser resolvido com adaptações dos métodos propostos para a solução do PRV em sua forma padrão, adaptações em que os veículos de menor custo unitário (normalmente, de maior capacidade) sejam utilizados primeiro [2]-[19]-[30]. Referência [25] apresenta uma

revisão bibliográfica sobre o PRVHET. Mais recentemente, [30]-[15] também abordaram esse problema.

As soluções básicas do PRVMD procuram distribuir os pontos de demanda entre os depósitos (alocando cada ponto ao seu depósito mais próximo) e, a seguir, solucionar um PRV para cada depósito. Essas soluções são suficientes quando a frota é homogênea e a sua disponibilidade infinita. O PRVMDHET, que apresenta uma frota heterogênea e fixa, exige, no mínimo, métodos que incorporem pelo menos uma fase de melhorias inter-rotas. Referência [11] faz uma revisão bibliográfica sobre o PRVMD. Mais recentemente, [28]-[21] também abordam com esse problema.

No caso do PRVTCF, há a oportunidade da escolha entre os diferentes tipos de veículos. A principal diferença entre o PRVTCF e o PRVHET reside nos objetivos: o primeiro busca escolher (dimensionar) a frota que resulta na melhor solução para um determinado problema, enquanto o segundo busca descobrir a melhor utilização para uma determinada frota fixa e conhecida. Referência [29] inclui uma revisão dos métodos já utilizados na solução do PRVTCF.

III. SOLUÇÃO DO PRVMDHET

Neste trabalho, o desenvolvimento das meta-heurísticas híbridas para solução do PRVMDHET envolve adaptações da heurística de economias, da meta-heurística Busca Tabu e da meta-heurística Colônia de Formigas.

Escolhe-se a heurística de economias de [7] para fornecer, com rapidez, um conjunto de soluções iniciais. Como ela foi inicialmente proposta para o PRV padrão, exige uma adaptação ao PRVMDHET. No caso do PRVMD, se utiliza um método do tipo “agrupa-primeiro, roteiriza-segundo”. A fase de alocação de pontos aos depósitos está baseada na heurística de designação por urgências, versão paralela [28], que considera simultaneamente as demandas dos pontos e a capacidade máxima de atendimento dos depósitos. Para solução do PRVHET, este trabalho adapta a heurística por meio de uma solução seqüencial de PRV’s com frota homogênea, um PRV para cada tipo de veículo. Inicia-se a seqüência de soluções pelos veículos de menor custo unitário (os quais, em geral, são os de maior capacidade). Este procedimento é inspirado em proposta de [25]. A adaptação do método de economias para solução do PRVMDHET combina os dois procedimentos descritos logo acima.

A escolha de uma meta-heurística baseada em busca na população recai sobre a meta-heurística Colônia de Formigas, que se encontra em uma situação inicial e dinâmica do seu ciclo de vida, oferecendo grandes possibilidades de pesquisa original [8]. Além disso, está presente na maioria das poucas implementações registradas na literatura, para esse tipo de meta-heurística, para solução do PRV. Escolhe-se para adaptação a versão *ACS-TIME* [16], que é baseada na versão *ACS* [13], a qual, por sua vez, é reputada por vários autores como a que apresenta os melhores resultados na fase inicial de busca [3]-[14]. A versão adaptada nesta pesquisa, no entanto, difere da versão *ACS-TIME* por não utilizar cópias do depósito, por selecionar o ponto inicial de cada roteiro entre os pontos que apresentam os maiores valores do produto feromônioheurística, e por testar, de forma alternativa, os valores das economias (do método de economias) como informação heurística, conforme sugestões de [1]-[12]. A solução do PRVMD ocorre em duas fases. Na primeira, o problema é decomposto conforme o número de

depósitos, cada depósito com sua própria colônia de formigas. Nesse caso, a versão adaptada aproveita a mesma alocação de pontos aos depósitos efetuada pelo método de economias. Na segunda fase, a colônia global utiliza a matriz de feromônio modificada pelas colônias individuais. Este trabalho incorpora, à versão da MCF adaptada para solução do PRVMD, uma estrutura capaz de lidar com uma frota heterogênea, o que permite a solução do PRVMDHET.

Vários autores destacam Busca Tabu como a meta-heurística baseada em busca local que tem apresentado os melhores resultados na solução do PRV [9]-[17]. A escolha para adaptação recai sobre a versão *UTSA*, já utilizada com grande sucesso na solução de diversas variantes do PRV, incluindo o PRVMD, problema para o qual foi desenvolvida [9]-[20]. A versão adaptada nesta pesquisa apresenta três mudanças principais em relação à versão *UTSA* original: para simplificar o programa e tornar o método mais rápido, utiliza-se a adaptação da heurística de economias para a geração da solução inicial, assim como um método de transferência simples de um ponto, de um roteiro para outro, do tipo (1,0), como o mecanismo de geração de vizinhança, e, ainda, uma lista de vizinhança reduzida de tamanho fixo e igual a 20. Este trabalho de tese incorpora, à versão adaptada da MBT, uma estrutura capaz de lidar com frotas heterogêneas.

Meta-heurísticas híbridas resultam da combinação de duas ou mais meta-heurísticas, com o objetivo de obter sinergia através da exploração dos pontos fortes de cada uma. Os melhores resultados na solução de certos tipos de problemas de otimização combinatória, inclusive do PRV, têm sido obtidos com o uso de meta-heurísticas híbridas [10]-[23]-[26]. Este trabalho combina a heurística de economias, a MBT e a MCF, no desenvolvimento de duas versões híbridas, uma para solução de problemas com um único depósito e outra para o caso da existência de múltiplos depósitos. Na solução do PRV e do PRVHET, a MCF é empregada para efetuar a diversificação, incorporando a MBT como o mecanismo interno de busca local. Segue-se uma fase final que aplica a MBT na sua forma básica. Pelo que foi possível apurar, trata-se de uma forma inédita de meta-heurística híbrida utilizada para solução do PRV. Portanto, decidiu-se batizá-la de método *Routing AnTS-sd*. A solução do PRVMD e do PRVMDHET exige a utilização de múltiplas colônias de formigas, uma para cada depósito. A meta-heurística híbrida proposta também abrange duas fases. Na primeira, emprega a MCF com seu método básico de busca local. Na segunda, emprega a MBT na sua forma básica. Este desenvolvimento foi batizado de método *Routing AnTS-md*.

A revisão da literatura não indicou nenhum trabalho que abordasse o PRVMDHET. Portanto, não estão disponíveis instâncias para esse problema. Dessa forma, desenvolve-se um conjunto de instâncias para teste de métodos de solução, a partir do conjunto de instâncias clássicas do PRVMD. Para tanto, adotam-se as fórmulas de adaptação propostas em [24] para utilização no caso do PRVTCF. Ao contrário de [24], porém, faz-se uma diferenciação entre os valores de autonomia dos diversos tipos de veículos. A Tabela I apresenta os fatores multiplicativos de adaptação. As Tabelas II e III descrevem as características das novas instâncias. A frota de veículos sediada nos depósitos, fixada *a priori*, possui uma composição escolhida de forma a apresentar uma folga de carga e uma diversidade que permitam a existência de várias soluções viáveis e de situações que destaquem a ineficiência do conceito de “pontos de fronteira”.

TABELA I. FATORES DE ADAPTAÇÃO PARA FROTA HETEROGÊNEA

	Tipo de Veículo				
	A	B	C	D	E
Capacidade	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4 x Qo ¹
Autonomia	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4 x Lo ²
Custo Unitário	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2 x 1

Notas: 1 - Qo -> capacidade do veículo original
2 - Lo -> autonomia do veículo original

TABELA II. QUANTIDADES DE VEÍCULOS - PRVMDHET

Inst.	Depósito														
	Número de Veículos por Tipo														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	222	212	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211
2	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
3	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
4	332	211	112	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
5	1111	2211	2211	2211	2211	2211	2211	2211	2211	2211	2211	2211	2211	2211	2211
6	333	1111	1111	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222	222
7	33	2111	2111	2111	2111	2111	2111	2111	2111	2111	2111	2111	2111	2111	2111
8	643	21	2223	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
9	112	33	2222	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333	333
10	333	1112	2221	2221	2221	2221	2221	2221	2221	2221	2221	2221	2221	2221	2221
11	2111	1211	1121	1121	1121	1121	1121	1121	1121	1121	1121	1121	1121	1121	1121
12	114	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211
13	114	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211
14	114	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211
15	114	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211
16	114	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211
17	114	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211
18	114	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211
19	114	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211
20	114	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211
21	114	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211
22	114	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211
23	114	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211	211

TABELA III. CARACTERÍSTICAS DOS VEÍCULOS - PRVMDHET

Instância	Tipo de Veículo														
	A			B			C			D			E		
	Q _v ¹	L _v ²	N _v ³	Q _v	L _v	N _v	Q _v	L _v	N _v	Q _v	L _v	N _v	Q _v	L _v	N _v
1	48	∞	6	64	∞	4	80	∞	7						
2	96	∞	4	128	∞	4	160	∞	1						
3	84	∞	8	112	∞	6	140	∞	3	168	∞	1			
4	60	∞	4	80	∞	4	100	∞	4	120	∞	3	140	∞	3
5	120	∞	2	160	∞	3	200	∞	2	240	∞	2	280	∞	1
6	60	∞	4	80	∞	4	100	∞	6	120	∞	3	140	∞	3
7	60	∞	5	80	∞	4	100	∞	3	120	∞	5	140	∞	2
8	300	190	8	400	250	6	500	310	5	600	370	5	700	430	5
9	300	190	6	400	250	6	500	310	7	600	370	5	700	430	5
10	300	190	6	400	250	6	500	310	8	600	370	5	700	430	5
11	300	190	7	400	250	7	500	310	8	600	370	5	700	430	4
12	36	∞	1	48	∞	1	60	∞	6	72	∞	1	84	∞	1
13	36	120	1	48	160	1	60	200	6	72	240	1	84	280	1
14	36	110	1	48	140	1	60	180	6	72	210	1	84	250	1
15	36	∞	1	48	∞	3	60	∞	8	72	∞	5	84	∞	3
16	36	120	1	48	160	3	60	200	8	72	240	5	84	280	3
17	36	110	1	48	140	3	60	180	8	72	210	5	84	250	3
18	36	∞	1	48	∞	4	60	∞	15	72	∞	6	84	∞	3
19	36	120	1	48	160	4	60	200	15	72	240	6	84	280	3
20	36	110	1	48	140	4	60	180	15	72	210	6	84	250	3
21	36	∞	4	48	∞	5	60	∞	19	72	∞	8	84	∞	9
22	36	120	4	48	160	5	60	200	19	72	240	8	84	280	9
23	36	110	4	48	140	5	60	180	19	72	210	8	84	250	9

Notas: 1 - Q_v -> capacidade do veículo
2 - L_v -> autonomia do veículo
3 - N_v -> quantidade disponível do veículo

IV. TESTES DOS MÉTODOS PROPOSTOS

A heurística e as meta-heurísticas propostas são aplicadas a conjuntos de instâncias clássicas da literatura para teste do PRV [6], do PRVHET [25] e do PRVMD [11], assim como às novas instâncias criadas especialmente para teste do PRVMDHET. A Tabela IV apresenta a compilação dos resultados obtidos. Conforme sugestões de [14]-[22], se utiliza uma lista de vizinhança reduzida com tamanho igual a 20. Todas as instâncias foram solucionadas em um *notebook* com processador 2,40 GHz Intel® Pentium® 4, e 512MB de memória do tipo DDR.

Os resultados obtidos com a adaptação do método de economias representam um bom compromisso entre exatidão da solução e velocidade de processamento. A baixa exatidão reflete as limitações impostas pela solução por depósitos isolados e pela escolha inicial obrigatória dos veículos de menor custo unitário.

A adaptação da MBT apresenta um desempenho bastante equilibrado e consistente, com forte capacidade de intensificação, pois obtém boas soluções mesmo com um pequeno número de iterações. Quanto à sua capacidade de diversificação, em algumas instâncias faz-se necessário um grande número de iterações para que haja uma redução significativa nos valores dos desvios. A exatidão e a robustez do método dependem da qualidade das soluções iniciais.

De uma forma geral, a adaptação da MCF se mostra muito influenciada pela quantidade de pontos de demanda e pela presença de múltiplos depósitos. Sua capacidade de intensificação não é forte, pois não obtém boas soluções com um número pequeno de iterações. Destaca-se, porém, pela sua capacidade de diversificação, pois, nas instâncias de menor tamanho dos quatro tipos de problema solucionados, é capaz de obter, inclusive, soluções iguais às melhores registradas na literatura.

As meta-heurísticas híbridas propostas apresentam o melhor desempenho ao longo de todos os testes. Unem a forte capacidade de intensificação da MBT à destacada capacidade de diversificação da MCF, de forma robusta e eficaz. No caso do método *Routing AnTS-sd*, a diversificação proporcionada pela MCF se mostra capaz de direcionar a busca da MBT para melhores regiões do espaço amostral e permitir um escape mais rápido dos ótimos locais. No caso do método *Routing AnTS-md*, embora a MCF não incorpore a MBT como método de busca local, esta última se beneficia da melhor solução inicial fornecida pela primeira.

Ao longo deste trabalho, as novas instâncias do PRVMDHET são solucionadas pelos métodos propostos, aplicados em diferentes configurações, com até 250.000 iterações globais. Dessa forma, são obtidas as melhores soluções listadas na Tabela V, que podem ser utilizadas como referência na avaliação da qualidade do desempenho de métodos eventualmente propostos em futuros trabalhos.

TABELA IV. RESULTADOS DOS MÉTODOS PROPOSTOS

			C & W		MBT	MCF	MCF	Híbrida	Híbrida
			Dist	Econ	sd	md			
PRV	1.000	Desvio Médio	6.9%	2.0%	5.8%	-	-	-	-
		Maior Desvio	13.4%	6.4%	16.2%	-	-	-	-
		T. médio (s)	1.4	1.0	-	-	-	-	-
	10.000	Desvio Médio	-	1.2%	2.7%	2.7%	1.1%	-	-
		Maior Desvio	-	4.8%	11.4%	11.6%	5.1%	-	-
		T. médio (s)	-	9.5	-	49.9	8.5	-	-
20.000	Desvio Médio	-	1.0%	2.2%	2.2%	0.8%	-	-	
	Maior Desvio	-	3.0%	10.0%	9.9%	2.8%	-	-	
	T. médio (s)	-	18.8	-	100.8	16.3	-	-	
PRV HET	1.000	Desvio Médio	10.2%	5.6%	-	-	-	-	-
		Maior Desvio	21.5%	11.7%	-	-	-	-	-
		T. médio (s)	0.3	0.8	-	-	-	-	-
	10.000	Desvio Médio	-	3.8%	4.9%	4.5%	2.1%	-	-
		Maior Desvio	-	9.7%	9.2%	10.5%	7.4%	-	-
		T. médio (s)	-	6.2	-	19.8	5.7	-	-
20.000	Desvio Médio	-	3.3%	4.4%	4.2%	1.4%	-	-	
	Maior Desvio	-	9.7%	8.4%	8.8%	5.6%	-	-	
	T. médio (s)	-	11.9	-	39.3	11.1	-	-	
PRV MD	1.000	Desvio Médio	7.4%	2.1%	-	-	-	-	-
		Maior Desvio	16.7%	5.2%	-	-	-	-	-
		T. médio (s)	1.0	2.7	-	-	-	-	-
	10.000	Desvio Médio	-	1.0%	9.9%	-	-	0.8%	-
		Maior Desvio	-	3.1%	42.1%	-	-	2.5%	-
		T. médio (s)	-	29.5	-	-	-	35.5	-
20.000	Desvio Médio	-	0.5%	-	-	-	0.5%	-	
	Maior Desvio	-	1.5%	-	-	-	1.5%	-	
	T. médio (s)	-	61.4	-	-	-	70.0	-	
PRV MD HET	1.000	Desvio Médio	10.3%	3.8%	-	-	-	-	-
		Maior Desvio	19.8%	7.6%	-	-	-	-	-
		T. médio (s)	1.0	6.2	-	-	-	-	-
	10.000	Desvio Médio	-	1.7%	-	-	-	1.4%	-
		Maior Desvio	-	4.5%	-	-	-	3.2%	-
		T. médio (s)	-	83.1	-	-	-	63.7	-
20.000	Desvio Médio	-	1.5%	-	-	-	1.0%	-	
	Maior Desvio	-	4.0%	-	-	-	2.9%	-	
	T. médio (s)	-	165.4	-	-	-	134.5	-	

TABELA V. MELHORES SOLUÇÕES OBTIDAS PARA O PRVMDHET

Instância	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tamanho	50	50	75	100	100	100	100	249	249	249	249	80
Melhor Solução	565.38	441.95	611.21	999.94	742.93	871.78	886.84	4,324.19	3,832.84	3,670.09	3,577.14	1,314.22
Instância	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
Tamanho	80	80	160	160	170	240	240	240	360	360	360	
Melhor Solução	1,339.93	1,345.54	2,558.87	2,588.93	2,657.45	3,777.27	3,888.59	4,005.86	5,573.93	5,831.15	6,022.77	

V. APLICAÇÃO A UM PROBLEMA REAL DA FAB

Os esquadrões de transporte da Força Aérea Brasileira estão sediados em sete Comandos Aéreos Regionais (COMAR), cada qual com sua própria área geográfica de abrangência. Esses comandos gerenciam as operações de transporte sem que haja, necessariamente, um planejamento conjunto de esforços entre si.

Os esquadrões de vôo utilizam, atualmente, um método empírico para roteirizar suas aeronaves. Trata-se de um método basicamente manual, em que as rotas são traçadas em mapas com o auxílio de calculadora, régua, compasso e fios com marcações correspondentes à autonomia de cada aeronave. A seqüência de visitas é determinada com a utilização dos princípios gerais de boa roteirização e programação de veículos listados por [2].

Recentemente, a FAB mobilizou parte da frota para o recolhimento de doações realizadas em todo o país, como parte do apoio organizado pelo Governo Federal às vítimas do tsunami ocorrido na região do oceano Índico, em 2005. As doações foram coletadas em diversas cidades e transportadas, inicialmente, para cidades próximas que possuíssem uma pista de pouso capaz de receber as aeronaves da frota da FAB. O problema consistiu, então, em transportar o material arrecadado, dessas cidades com pistas de pouso compatíveis, até as sedes dos comandos. Nesta fase, havia uma frota disponível pré-determinada, composta por três tipos diferentes de aeronaves, com diferentes capacidades de carga. Essas aeronaves operaram a partir de sete bases distintas (as sedes dos COMAR). A quantidade de carga a ser coletada em cada cidade era conhecida *a priori*. Portanto, o problema se caracterizou como um PRVMDHET.

Após a coleta junto à população, as doações foram inicialmente concentradas em 182 cidades, cujas demandas estão listadas na Tabela VI. Informações detalhadas podem ser encontradas em [5]. As características das aeronaves estão listadas na Tabela VII. Por sua vez, a Tabela VIII lista a composição da frota disponível e a demanda total.

A Tabela IX apresenta os resultados da aplicação, de maneira isolada, em cada COMAR, dos métodos empírico, de economias e híbrido (*Routing AnTS-sd*). O tempo para aplicação do método empírico (~ 1 hora por COMAR) inclui não somente a parte da roteirização em si, mas, também, as atividades de impressão dos pontos de demanda nos mapas e de compilação dos resultados. A Tabela IX também inclui os resultados da aplicação do método de economias e do método híbrido (*Routing AnTS-md*) considerando-se todos os sete comandos de forma global. Não há uma solução global pelo método empírico, pois não ocorre um planejamento conjunto entre os comandos. Além disso, o grande número de pontos e as múltiplas sedes tornam impraticável a aplicação do método empírico conforme delineado. A Fig. 1 ilustra os roteiros obtidos pelos métodos empírico e *Routing AnTS-md*.

Como esperado, a abordagem global apresenta resultados melhores do que a solução que considera os comandos

separadamente. O método *Routing AnTS-md* obtém uma solução 29,6% melhor do que da solução pelo método empírico, em menos de 1 minuto de tempo de processamento. Mesmo o método de economias atinge uma solução 6,1% melhor, em um reduzidíssimo tempo de processamento.

A análise dos roteiros traçados na Fig. 1 ajuda a explicar esse melhor desempenho. Ao considerar todos os pontos de demanda de forma simultânea, o método produz roteiros que chegam a incluir, em pelo menos um caso, pontos de até três

TABELA VI. DEMANDAS NAS CIDADES

Aeró dromo	CO MAR	Dem.													
0	SBBE	I	0	46	SBFZ	II	416	92	SBAQ	IV	701	138	SBSM	V	415
1	SBRF	II	0	47	SBJP	II	690	93	SBBT	IV	591	139	SSSB	V	717
2	SBGL	III	0	48	SBNT	II	765	94	SBBU	IV	382	140	SBDL	V	500
3	SBGR	IV	0	49	SBSV	II	790	95	SJDB	IV	205	141	SBDT	V	556
4	SBPA	V	0	50	SNYT	II	571	96	SSZK	IV	584	142	SBTR	V	363
5	SBBR	VI	0	51	SBJU	II	668	97	SSDO	IV	263	143	SBAT	VI	586
6	SBEG	VII	0	52	SBLE	II	757	98	SDDR	IV	294	144	SBAN	VI	222
7	SNCW	I	568	53	SBMO	II	204	99	SSFK	IV	217	145	SWGN	VI	342
8	SBHT	I	345	54	SNXX	II	325	100	SIMK	IV	676	146	SJGU	VI	402
9	SBAM	I	233	55	SBMS	II	248	101	SBGW	IV	401	147	SWXG	VI	672
10	SNBI	I	281	56	SBPB	II	428	102	SBKP	IV	450	148	SWKN	VI	673
11	SNVS	I	540	57	SNTS	II	473	103	SBGC	IV	420	149	SBGO	VI	667
12	SBCI	I	390	58	SBUF	II	663	104	SBCR	IV	613	150	SWGJ	VI	251
13	SBAE	I	639	59	SNPE	II	439	105	SBPP	IV	535	151	SBCY	VI	388
14	SBIZ	I	763	60	SBPL	II	282	106	SBLN	IV	617	152	SWJV	VI	231
15	SBMQ	I	572	61	SBPS	II	382	107	SBLM	IV	268	153	SDOV	VI	365
16	SBSL	I	561	62	SSTE	II	524	108	SDOU	IV	314	154	SWNQ	VI	347
17	SBIH	I	455	63	SNVB	II	616	109	SDPN	IV	720	155	SBPJ	VI	441
18	SBEK	I	790	64	SBOV	II	312	110	SBYS	IV	591	156	SWWA	VI	695
19	SBMA	I	795	65	SNFE	III	209	111	SBPY	IV	264	157	SBPN	VI	461
20	SBCG	I	501	66	SNAG	III	655	112	SBDN	IV	517	158	SWPZ	VI	274
21	SNTI	I	487	67	SBAX	III	209	113	SBRP	IV	474	159	SWLC	VI	657
22	SNOX	I	218	68	SBBQ	III	767	114	SBSR	IV	233	160	SWRD	VI	297
23	SBCJ	I	438	69	SBCB	III	764	115	SBJS	IV	504	161	SWWY	VI	633
24	SNYE	I	653	70	SBCP	III	305	116	SBJA	IV	469	162	SWSI	VI	221
25	SJBY	I	777	71	SNXB	III	635	117	SBDT	IV	561	163	SWNK	VII	272
26	SBSN	I	597	72	SNDV	III	466	118	SBUP	IV	568	164	SWCA	VII	320
27	SNFX	I	573	73	SBFT	III	704	119	SDVE	IV	379	165	SWKO	VII	622
28	SNWS	I	431	74	SBCF	III	637	120	SDVG	IV	789	166	SWEI	VII	519
29	SBST	I	250	75	SNMK	III	501	121	SBBG	V	667	167	SBGM	VII	262
30	SBTB	I	207	76	SNAP	III	507	122	SSCQ	V	555	168	SBBV	VII	359
31	SBTU	I	293	77	SBLs	III	482	123	SBCO	V	378	169	SBCZ	VII	584
32	SNUC	II	699	78	SSOL	III	787	124	SSKZ	V	339	170	SBPV	VII	638
33	SBAR	II	259	79	SBMK	III	474	125	SBGX	V	767	171	SBRB	VII	265
34	SNAL	II	647	80	SNZR	III	703	126	SBGU	V	377	172	SBBT	VII	781
35	SNBR	II	670	81	SNPD	III	209	127	SBDT	V	779	173	SBCI	VII	521
36	SNFR	II	708	82	SBSB	III	572	128	SBFL	V	613	174	SWJJ	VII	728
37	SBKG	II	355	83	SNAM	III	269	129	SBFI	V	398	175	SBMY	VII	485
38	SBRK	II	611	84	SRES	III	694	130	SBNF	V	250	176	SWMM	VII	427
39	SBCV	II	637	85	SNAS	III	423	131	SBPK	V	710	177	SWPI	VII	530
40	SNRU	II	340	86	SBUR	III	203	132	SBUG	V	327	178	SBUA	VII	708
41	SNWS	II	500	87	SBUL	III	347	133	SBLJ	V	214	179	SBUA	VII	250
42	SNJD	II	495	88	SBIP	III	449	134	SBLV	V	709	180	SBDT	VII	512
43	SBFN	II	620	89	SBVG	III	718	135	SSPI	V	659	181	SBVH	VII	211
44	SNQG	II	583	90	SBVT	III	446	136	SBPF	V	301				
45	SBIL	II	765	91	SBAU	IV	342	137	SBMG	V	565	Total			85,854

TABELA VII. FROTA DISPONÍVEL

	Tipo de Aeronave		
	C-130	C-295	C-95
Capacidade (kg)	15,000	5,000	1,000
Autonomia (km)	4,500	3,600	500
Penalidade por Parada (km)	60	40	10
Custo de Deslocamento (\$/km)	8	3	1
Número do Veículo	0	1	2

TABELA VIII. COMPOSIÇÃO DA FROTA E DEMANDA TOTAL

	Capacidade				Número de Nós	Demanda Total (kg)	Folga de Carga	
	C-130	C-295	C-95	Total de Aeronaves				
I COMAR	0	2	6	8	16,000	26	12,357	22.8%
II COMAR	1	0	6	7	21,000	34	17,442	16.9%
III COMAR	1	0	3	4	18,000	27	13,135	27.0%
IV COMAR	0	2	7	9	17,000	31	13,942	18.0%
V COMAR	0	2	5	7	15,000	23	11,159	25.6%
VI COMAR	0	2	4	6	14,000	21	8,825	37.0%
VII COMAR	0	2	5	7	15,000	20	8,994	40.0%
Total				48	116,000	182	85,854	26.0%

TABELA IX. SOLUÇÕES DO CASO REAL DA FAB

	Comandos	Solução	T. (seg)	Diferença
Método Empírico	Separados	205,457	-	-
Método de Economias	Separados	209,998	0.5	2.2%
Método Híbrido	Separados	174,351	19.2	-15.1%
Método de Economias	Combinados	193,025	0.3	-6.1%
Método Híbrido	Combinados	144,670	53.5	-29.6%

comandos diferentes, e permite utilizar todas as aeronaves disponíveis, de forma mais eficiente. Além disso, as sedes dos comandos III, IV, VI e VII localizam-se próximas às fronteiras das suas respectivas áreas geográficas, o que torna natural que as aeronaves nelas baseadas atendam a pontos de demanda situados nos comandos adjacentes.

Outro fator determinante de um melhor desempenho dos métodos propostos está relacionado à dificuldade adicional, para o ser humano, que representa a existência de uma frota heterogênea no processo de roteirização.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta versões da heurística de economias, da MBT e da MCF, assim como uma nova meta-heurística híbrida, que são capazes de solucionar o PRVMDHET. Os resultados evidenciam que o método híbrido, conforme desenvolvido, uniu a forte capacidade de intensificação da MBT à destacada capacidade de diversificação da MCF, de forma a produzir um método robusto e exato. Finalmente, os resultados obtidos em uma aplicação da FAB comprovam que os métodos propostos são realmente aplicáveis à solução do PRVMDHET.

As principais recomendações dizem respeito a possíveis maneiras de se aprimorar os métodos propostos. Mecanismos mais complexos para a geração de vizinhança podem conduzir a resultados de igual qualidade em um menor número de iterações. As três meta-heurísticas propostas, especialmente a meta-heurística híbrida, podem vir a apresentar resultados de melhor qualidade caso sofram um processo controlado de ajuste de parâmetros.

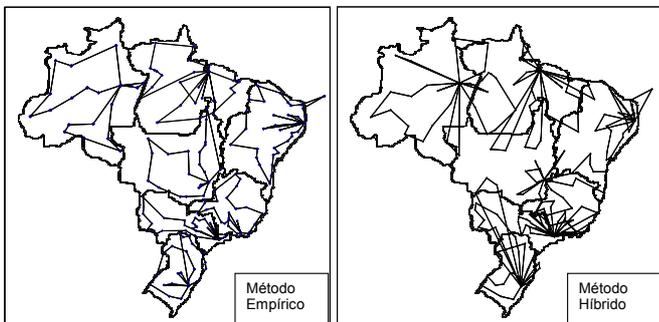


Fig. 1. Roteiros das Soluções.

REFERÊNCIAS

- [1] Abrahão, F.T.M. (2006) *A meta-heurística colônia de formigas para solução do problema de programação de manutenção preventiva para uma frota de veículos com múltiplas restrições: aplicação na Força Aérea Brasileira*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [2] Ballou, R. H. (1998) *Business logistics management: planning, organizing, and controlling the supply chain*. Fourth Edition. Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- [3] Blum, C. e A. Roli. (2001) *Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison*. Technical Report TR/IRIDIA/2001-13, Institut de Recherches Interdisciplinaires et de Développements en Intelligence Artificielle, Bruxelles.
- [4] Bodin, L. et al. (1983) Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art. *Computers and Operations Research*, v. 10, n.2, p. 63-211.
- [5] Bonasser, U. O. (2005) *Meta-heurísticas híbridas para solução do problema de roteirização de veículos com múltiplos depósitos e frota heterogênea fixa: aplicação na Força Aérea Brasileira*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [6] Christofides, N.; A. Mingozzi e P. Toth. (1979) The vehicle routing problem. In Christofides, N. et al, *Combinatorial optimization*. Wiley, New York.
- [7] Clarke, G. e J. W. Wright. (1964) Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, v. 12, 568-581.
- [8] Colomi, A. et al. (1996) Heuristics from nature for hard combinatorial optimization problems. *International Transactions in Operational Research*, v. 3, n.1, p. 1-21.
- [9] Cordeau, J.-F. et al. (2002) A guide to vehicle routing heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, v. 53, n. 5, p. 512-522.
- [10] Cordeau, J.-F. et al. (2005) New heuristics for the vehicle routing problem. In A. Langevin e D. Riopel. *Logistics systems: design and optimization*. Springer, New York. (in press)
- [11] Cordeau, J.-F.; M. Gendreau e G. Laporte. (1997) A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. *Networks*, v. 30, p. 105-119.
- [12] Donati, A. V. et al. (2003) *Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system*. Technical Report IDSIA-17-03, Istituto Dalle Molle di Studi sull'Intelligenza Artificiale, Università di Lugano, Lugano, Italy.
- [13] Dorigo, M. e L. M. Gambardella. (1996) A study of some properties of Ant-Q. *Proceedings of the International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, PPSN IV*, Berlin, 1996. (Lecture Notes in Computer Science, v.1141).
- [14] Dorigo, M. e T. Stützle. (2004) *Ant colony optimization*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [15] Gambardella, L. M. et al. (2003) Ant colony optimization for vehicle routing in advanced logistics systems. *Proceedings of the International Workshop on Modeling & Applied Simulation, MAS 2003*, Bergeggi, Italy, 2003. Disponível em: <www.idsia.ch/~roberto/papers/MAS2003_18.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2004.
- [16] Gambardella, L. M.; É. Taillard e G. Agazzi. (1999) MACS-VRPTW: a multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows. In D. Corne; M. Dorigo e F. Glover, *New ideas in optimization*. McGraw-Hill, Maidenhead, United Kingdom.
- [17] Gendreau, M. et al. (1999) A tabu search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, v. 26, p. 1153-1173.
- [18] Gendreau, M. ; G. Laporte e J.-Y. Potvin. (2001) Metaheuristics for the vehicle routing problem. In Toth, P. e D. Vigo, *The vehicle routing problem*. SIAM, Philadelphia. (SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications)
- [19] Gouvêa, M. T. (1992) *Algoritmos para a resolução de um problema geral de roteamento de múltiplos veículos*. Tese de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [20] Laporte, G. et al. (2000) Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International Transactions in Operational Research*, v. 7, p. 285-300.
- [21] Reimann, M.; K. Doerner e R. F. Hartl. (2004) D-Ants: savings based ants divide and conquer the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, v.31, p. 563-591.
- [22] Reinelt, G. (1992) Fast heuristics for large geometric traveling salesman problems. *ORSA Journal on Computing*, v. 4, n.2, p. 206-217.
- [23] Sait, S. M. e H. Youssef (1999) *Iterative computer algorithms with applications in engineering: solving combinatorial optimization problems*. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California.
- [24] Salhi, S. e M. Sari. (1997) A multi-level composite heuristic for the multi-depot vehicle fleet mix problem. *European Journal of Operational Research*, v. 103, p. 95-112.
- [25] Taillard, É. D. (1999) A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP. *Operations Research*, v. 33, n. 1, p. 1-14.
- [26] Taillard, É. D. et al. (2001) Adaptive memory programming: a unified view of metaheuristics. *European Journal of Operational Research*, v. 135, p. 1-16.
- [27] Talbi, E.-G. (2002) A taxonomy of hybrid metaheuristics. *Journal of Heuristics*, v.8, n.5, p. 541-564.
- [28] Tansini, L. ; M. Urquhart e O. Viera. (2001) *Comparing assignment algorithms for the multi-depot VRP*. Technical Report TR 01-08, Instituto de Computación, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- [29] Wassan, N. A. e I. H. Osman. (2002) Tabu search variants for the mix fleet vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, v. 53, n. 7, p. 768-782.
- [30] Wu, T.-H.; C. Low e J.-W. Bai. (2002) Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems. *Computers & Operations Research*, v. 29, p. 1393-1415.