

Uma heurística para o Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea e Múltiplos Depósitos aplicada à distribuição pós-catástrofes

Puca Huachi Vaz Penna

Dep. de Ciências Exatas, Biológicas e da Terra, Universidade Federal Fluminense
Rua João Jasbick, s/n, Santo Antônio de Pádua, Rio de Janeiro, Brasil
puca@infes.uff.br

Andréa Cynthia Santos, Christian Prins

ICD-LOSI, UMR CNRS 6281, Université de Technologie de Troyes
12 rue Marie Curie, CS 42060, 10 004 Troyes CEDEX, França
{andrea.duhamel, christian.prins}@utt.fr

RESUMO

Este estudo é dedicado à variante do Problema de Roteamento de Veículos (PRV) encontrado na etapa final de distribuição aplicada à logística pós-catástrofes. O PRV Especializado (PRVE) ao problema possui características como múltiplos depósitos, frota heterogênea, múltiplas viagens e restrições de acesso. Esta nova variante do PRV reflete a etapa final da distribuição em operações de assistência pós-catástrofes. Para resolver o problema, apresentamos uma heurística baseada na meta-heurística ILS. Resultados em variantes do PRV relacionadas ao problema mostram a eficiência da heurística proposta e abrem caminho para resolver problemas com atributos realistas, aplicados a etapa de distribuição final na assistência pós-catástrofe.

PALAVRAS CHAVE. Logística Humanitária, Problema de Roteamento de Veículos, Meta-heurística.

Áreas Principais: MH - Metaheurísticas, OC - Otimização Combinatória.

ABSTRACT

This study is dedicated to the Vehicle Routing Problem (VRP) variant found in the last mile distribution applied to disaster logistic. We investigate one Specialized VRP (SVRP) with multiples depots, heterogeneous fleet, with multiple trips and site dependent. This new VRP variant reflects the last mile distribution in post-disaster relief operations. We introduce a heuristic based on the ILS metaheuristic. Results on related VRP variants show the efficiency of the proposed heuristic to solve problems with new realistic attributes applied to last mile distribution in post-disaster relief.

KEYWORDS. Humanitarian Logistics, Vehicle Routing Problems, Metaheuristics.

Main Area: MH - Metaheuristics, CO - Combinatorial Optimization.

1. Introdução

O estudo e desenvolvimento de aplicações ligadas à logística humanitária tem aumentado nos últimos anos. Atualmente é possível encontrar, na literatura, diversos trabalhos propostos para assistência pós-catástrofe considerando diferentes níveis de decisões (Afsar *et al.*, 2014; Caunhye *et al.*, 2012; De la Torre *et al.*, 2012; Rafael *et al.*, 2013). Este trabalho tem seu foco na distribuição do último quilômetro (do inglês *last-mile*), que é o estágio final e muitas vezes caótico da distribuição na humanitária pós-catástrofe, correspondendo a uma variante especializada do Problema de Roteamento de Veículos (PRV). A distribuição do último quilômetro pode incorporar diversos atributos, tais como, múltiplos depósitos, frota heterogênea, múltiplas viagens, restrições de atendimento, etc.

Neste sentido, investigamos uma variante do PRV, denominada PRV Especializado (PRVE), que encontra aplicações em particular na fase final de distribuição pós-catástrofes, ou seja na distribuição do último quilômetro. O PRVE consiste na distribuição final de kits de ajuda humanitária (produtos), como por exemplo, água, alimentos não-perecíveis, material de higiene, etc. No problema são considerados a existência de múltiplos pontos de armazenamentos dos kits (múltiplos depósitos); veículos com capacidades e custos operacionais diferentes (frota heterogênea de veículos); múltiplas viagens para os veículos dentro de uma jornada de trabalho ou limite de tempo para a distribuição, levando-se em consideração o tempo de serviço (carga e descarga); e restrições de acesso a determinadas vias dependendo do veículo. Esta última característica é essencial, principalmente, em áreas afetadas por terremotos, pois as vias podem estar parcialmente ou totalmente bloqueadas, ocasionando uma inviabilidade de tráfego para determinados veículos. Isto faz com que o acesso aos pontos finais de distribuição seja impossível para uma classe de veículos ou que eles tenham que percorrer distâncias maiores. Portanto, no problema estudado, as distâncias entre os depósitos e os pontos de entrega são dependentes dos tipos de veículos, ou seja, variam em função do estado das vias e do tipo do veículo.

Para tratar o PRVE uma heurística é proposta e testada em instâncias realistas desenvolvidas a partir de dados da cidade de Porto Príncipe no Haiti, obtidos após o terremoto ocorrido em 2010.

O restante deste trabalho é organizado como segue. Na Seção 2 é apresentado uma revisão da literatura sobre os trabalhos relacionados em termos do PRV e no contexto humanitário. O problema é formalmente definido na Seção 3. Em seguida, na Seção 4, o algoritmo desenvolvido para tratar PRVE é descrito. Na seção 5, resultados são apresentados para cenários desenvolvidos a partir de uma instância baseada no terremoto ocorrido em 2010 na cidade de Porto Príncipe (Haiti). Posteriormente, conclusões são fornecidas na Seção 6.

2. Trabalhos relacionados

Os trabalhos de Balcik *et al.* (2008) e De la Torre *et al.* (2012) apresentam características bastante realistas para o PRV aplicado à distribuição do último quilômetro, como múltiplos depósitos, frota heterogênea e múltiplas viagens. Um mo-

delo integrado para o Problema de Inventário com Roteamento Periódico é apresentado por Balcik *et al.* (2008). Apesar dos autores destacarem características importantes dos problemas de roteamento para a distribuição do último quilômetro, resultados são mostrados apenas para quatro nós com frota homogênea e recursos ilimitados. De la Torre *et al.* (2012) apresentam uma revisão de um grande número de trabalhos envolvendo distribuição e roteamento. Entretanto, poucos trabalhos descritos consideram o PRV com as características encontradas no problema estudado. Desta forma, destacamos algumas referências importantes das variantes do PRV relacionadas ao PRVE, foco deste estudo.

O Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos e Dimensionamento de Frota Heterogênea (PRV-MDDFH) foi proposto por Salhi and Sari (1997). O PRV-MDDFH é uma generalização do PRVC e fortemente relacionado ao PRV com múltiplos depósitos (PRV-MD). Apesar de na literatura do PRV-MD o número de veículos ser conhecido, o PRV-MDDFH apresentado pelos autores possui como objetivo dimensionar a frota de veículos. Este mesmo objetivo foi adotado neste trabalho, uma vez que o dimensionamento da frota de veículos necessária para atender a população é essencial para auxiliar a tomada de decisão dos gestores envolvidos na operação. Salhi *et al.* (2014) apresentaram uma formulação que foi utilizada para gerar alguns limites inferiores para o problema, utilizando um programa comercial de programação linear mista. Além dessa formulação os autores também desenvolveram um heurística baseada na meta-heurística VNS (do inglês *Variable Neighborhood Search*) para resolver o problema. Vidal *et al.* (2014) aplicaram uma heurística híbrida baseado em Algoritmos Genéticos para diversos PRVs, entre eles o PRV-MDDFH.

O Problema de Roteamento de Veículos com Restrições de Acesso – PRV-RA (*Site Dependent Vehicle Routing Problem*) considera que determinados clientes só podem ser servidos por um subconjunto de veículos, ou seja, nem todos os clientes podem ser atendidos por todos os tipos de veículos. Esta situação é bastante comum na prática, principalmente em clientes localizados em centros urbanos ou históricos, que possuem restrições de circulação de veículos acima de uma determinada capacidade, ou então, por uma necessidade de uma característica específica do veículo, como por exemplo câmara frigorífica (Pisinger and Røpke, 2007). Nos trabalhos encontrados na literatura que abordam o PRV-RA, um cliente simplesmente pode ou não ser atendido por um determinado tipo de veículo. Neste trabalho, este conceito é estendido em virtude do contexto aplicado. Na distribuição pós-catástrofes, particularmente, terremotos, nem todas as vias estão disponíveis. Portanto duas situações podem acontecer, (i) um tipo de veículo pode não conseguir atender uma demanda; (ii) um tipo de veículo consegue atender um ponto de demanda, porém com distância superior a menor distância entre o depósito e o ponto. O problema de dependência dos veículos em servir os arcos é apresentado por Sniezek and Bodin (2006). Entretanto, o problema difere do estudado, uma vez que os autores tratam o caso onde os veículos devem servir os arcos, levando em consideração a restrição de acesso. Sendo assim, a questão de diferentes distâncias associadas a diferentes tipos de veículos não é considerada. No PRVE

não necessário servir os arcos, mas sim atender os pontos de demandas, portanto pode-se usar diferentes arcos, dependendo do tipo do veículo.

Algumas heurísticas simples foram aplicadas ao PRV-RA por Nag *et al.* (1988), que apresentaram o problema, e por Chao *et al.* (1999) que desenvolveu novas instâncias para o problema. Cordeau and Laporte (2001) mostraram que o PRV-RA pode ser resolvido como um caso especial do PRV Periódico e aplicaram uma heurística baseada em Busca Tabu (BT), desenvolvida para o PRVP para resolver o PRV-RA. Pisinger and Røpke (2007) apresentam uma heurística de busca local baseado em LNS (do inglês, *Large Neighborhood Search*) para algumas variantes do PRV com frota homogênea e para o PRV-RA. Recentemente, um algoritmo baseado nas meta-heurísticas ILS e BT foi apresentado em Cordeau and Maischberger (2012) para tratar o PRV-RA e outras variantes, assim como em Pisinger and Røpke (2007). O método, denominado ITS (do inglês, *Iterated Tabu Search*), consiste de uma BT, embutida no ILS como busca local. Os autores desenvolveram uma versão sequencial e uma versão paralela do mesmo algoritmo.

Outra característica encontrada no problema estudado é o uso de múltiplos veículos, que consiste em um mesmo veículo efetuar diversas viagens ao longo de uma jornada de trabalho. O problema foi apresentado por Fleischmann (1990) e um dos primeiros trabalhos sobre o tema foi proposto por Taillard *et al.* (1996). Atualmente, o problema é conhecido como PRV com múltiplas viagens (PRV-MV) e uma vasta literatura pode ser encontrada sobre ele. Cattaruzza *et al.* (2014) apresentam os trabalhos mais importantes sobre o PRV-MV, bem como resultados em diversos problemas testes. Esses trabalhos, assim como a grande maioria da literatura sobre o PRV-MV, abordam o problema com uma frota homogênea e sem considerar os demais atributos estudados nesse trabalho. O PRV-MD com depósitos intermediários foi tratado por Crevier *et al.* (2007). Esse problema é semelhante ao PRV-MD com múltiplas viagens. A diferença é que o veículo pode visitar diferentes depósitos para recarregar antes de retornar ao depósito de origem no final da jornada de trabalho. Podemos destacar dois trabalhos que tratam o PRV-MV com atributos do problema estudado. No primeiro, Prins (2002) faz uso de frota heterogênea e múltiplas viagens para resolver um problema real de um fabricante de móveis. Já no segundo, o problema estudado por Alonso *et al.* (2008) possui múltiplas viagens e restrições de acesso, além de efetuar entregas periódicas. Uma revisão recente relacionada ao PRV-MD é apresentada em Montoya-Torres *et al.* (2015). Além disso, os autores descrevem variantes encontradas na literatura com alguns dos atributos tratados neste trabalho.

Na Tabela 1 destaca-se os trabalhos importantes encontrados na literatura para resolver problemas relacionados ao PRVE. As duas primeiras colunas apresentam os autores e o tipo de abordagem utilizada. Já as demais colunas descrevem as características dos problemas abordados, tais como, frota **homogênea (HO)** ou **heterogênea (HE)**, limitada (L) ou ilimitada (I). As colunas (MD), (MV) e (RA) mostram respectivamente se o problema possui múltiplos depósitos, múltiplas viagens e restrições de acesso. A coluna “**Custos**”, apresenta os custos associados aos veículos: fixos (F), variáveis (V), ambos (FV) ou não existem (-).

Tabela 1: Literatura relacionada ao problema estudado

Trabalho	Abordagem	Frota	MD	MV	RA	Custos
Salhi and Sari (1997)	heurística	HE-I	S	N	N	FV
Salhi <i>et al.</i> (2014)	VNS	HE-I	S	N	N	FV
Vidal <i>et al.</i> (2014)	AG	HE-I	S	N	N	FV
Nag <i>et al.</i> (1988)	heurísticas	HE-L	N	N	S	–
Cordeau and Laporte (2001)	BT	HE-L	N	N	S	–
Chao and Liou (2005)	BT + SA	HE-L	N	N	S	–
Pisinger and Røpke (2007)	ALNS	HE-L	N	N	S	–
Cordeau and Maischberger (2012)	ILS + BT	HE-L	N	N	S	–
Cattaruzza <i>et al.</i> (2014)	AM	HO-L	N	S	N	–
Prins (2002)	heurísticas	HE-L	N	S	N	–
Alonso <i>et al.</i> (2008)	BT	HE-L	N	S	S	–

3. Descrição do Problema

Neste trabalho é tratado uma variante do PRV com Múltiplos Depósitos e Dimensionamento de Frota Heterogênea (PRV-MDDFH) com atributos adicionais, denominado PRV Especializado (PRVE). O PRV-MDDFH é uma generalização do PRVC e fortemente relacionado ao PRV com múltiplos depósitos (PRV-MD), que foi inicialmente apresentado por Tillman (1969). Dada uma rede de transporte modelada como um grafo $G = (V, A)$, onde $V = D \cup P$ representa o conjunto de nós, incluindo o conjunto D de nós com demandas, denominados pontos de distribuição, e o conjunto P de depósitos; e A denota o conjunto de arcos, com custo c_{ij} associado a todo arco $(i, j) \in A$. Para cada ponto de distribuição $i \in D$ demandas d_i são dadas, e um número p_u de veículos idênticos (homogêneos) estão disponíveis para cada depósito $u \in P$. A diferença entre o PRV-MD e o PRV-MDDFH é que o primeiro considera uma frota de veículos homogênea enquanto que o segundo considera um frota de heterogênea, semelhante ao PRV com Dimensionamento de Frota Heterogênea (PRV-DFH) descrito em Golden *et al.* (1984). Dada uma frota M composta por m diferentes tipos de veículos, i.e. $M = \{1, \dots, m\}$. Para cada $k \in M$, existem um número de veículos ilimitados disponíveis, cada um com uma capacidade Q_k , nos depósitos. Cada tipo de veículo está associado a um custo fixo f_k . Para cada arco $(i, j) \in A$ estão associados custos $c_{ij}^k = l_{ij}^k \times r_k$, onde l_{ij}^k e r_k representam, respectivamente, a distância entre os vértices (i, j) e um custo de viagem variável por unidade de distância, para o veículo do tipo k . Por fim, para cada depósito $u \in P$ associa-se um tempo limite de operação t_u . É permitido aos veículos realizar múltiplas viagens durante a jornada de trabalho, dentro do tempo limite t_u , associado ao depósito u . O tempo de viagem de cada veículo é dado por l_{ij}^k/h_k , onde h_k é a velocidade média de operação do veículo do tipo k . O tempo de carga e descarga do veículo (tempo de serviço), também é levado em consideração. O PRV-MDDFH consiste em definir rotas para os veículos, começando e terminando no mesmo depósito, tal que as demandas sejam satisfeitas e as restrições respeitadas. O problema tem por objetivo dimensionar a

frota de veículos utilizada, minimizando o custo total de transporte associado aos custos dos veículos.

4. A heurística proposta

O algoritmo proposto, denominado MS-ILS, é uma heurística *Multi-Start* baseada na meta-heurística ILS (do inglês, *Iterated Local Search*), tendo como busca local o método RVND (do inglês, *Randomized Variable Neighborhood Descent*).

Contrariamente ao método VND (do inglês, *Variable Neighborhood Descent*) clássico descrito por Hansen *et al.* (2010), que trabalha com um conjunto de vizinhanças previamente ordenadas, o RVND utiliza uma ordem aleatória de vizinhanças a cada chamada. Desta forma, não é necessário fazer experimentos para descobrir qual a melhor ordem (Subramanian *et al.*, 2010; Souza *et al.*, 2010).

O MS-ILS é uma extensão do algoritmo proposto por Penna *et al.* (2013). Algumas características são mantidas, porém devido aos diferentes atributos existentes no problema estudado, novas características são adicionadas, como ilustrado no pseudo-código apresentado no Algoritmo 1.

Observa-se no Algoritmo 1, que o MS-ILS começa inicializando a frota de veículos (linha 2), onde um veículo de cada tipo é selecionado a priori. Na linha 3, as distâncias entre todos os nós, origem e destinos de G são calculadas, considerando as restrições de atendimento dos veículos, ou seja, para cada veículo, para cada depósito e para cada cliente um algoritmo para calcular o caminho mínimo é executado. A seguir, a heurística *Multi-Start* é executada $MaxIterMS$ vezes (linhas 5 – 18). Primeiro, o valor de $MaxIterILS$ é calculado (linha 7). Este parâmetro representa o número máximo de perturbações consecutivas sem melhora adotado. O seu valor é calculado baseado no número de clientes e veículos. A cada iteração da heurística *Multi-Start*, na linha 8, uma solução inicial é construída por um método construtivo, e aprimorada, na linha 9, pela aplicação de um procedimento de busca local. O laço principal do ILS (linhas 10 – 16) envolve três procedimentos. No primeiro, linha 11, aplica-se um mecanismo de perturbação. No segundo, linha 12, busca-se aprimorar a solução perturbada pelo método de busca local. No terceiro procedimento do laço do ILS, linhas 13 – 15, é verificado se o ótimo local gerado pela busca local será aceito como novo ótimo local. Uma solução é aceita se houver melhora na função de avaliação. Finalizado o ILS, atualiza-se a melhor solução gerada até então (linha 17).

Os métodos GERASOLUÇÃOINICIAL e BUSCALOCAL, bem como as vizinhanças utilizadas, são idênticos aos desenvolvidos em Penna *et al.* (2013). Já o método PERTURBAÇÃO, possui duas novas perturbações, além das já adotadas no trabalho citado. ADDTRIP e REMOVE TRIP que adicionam ou removem, respectivamente, uma viagem em uma rota r selecionada aleatoriamente. Estes movimentos consistem em adicionar ou remover uma visita ao depósito da rota r . Somente movimentos viáveis são aceitos.

5. Resultados

O algoritmo proposto foi desenvolvido em C++ e os testes foram executadas em um computador Intel Core i7 2,93 GHz com 8 GB de memória principal com

Algoritmo 1: MS-ILS($MaxIterMS$, β , G)

```

1 Início
2   InicializaFrota(  $v$  )
3   CalculaDistancias(  $G$  )
4    $f(s^*) \leftarrow \infty$ 
5   para  $i \leftarrow 1$  até  $MaxIterMS$  faça
6      $iterILS \leftarrow 0$ 
7      $MaxIterILS \leftarrow$  CalculaMaxIterILS( $n, v, \beta$ )
8      $s \leftarrow$  GeraSoluçãoInicial( $v$ )
9      $s^{*'} \leftarrow$  BuscaLocal( $s$ )
10    enquanto ( $iterILS \leq MaxIterILS$ ) faça
11       $s' \leftarrow$  Perturbação( $s^{*'}$ )
12       $s'' \leftarrow$  BuscaLocal( $s'$ )
13      se ( $f(s'') < f(s^{*'})$ ) então
14         $s^{*' } \leftarrow s''$ 
15         $iterILS \leftarrow 0$ 
16       $iterILS \leftarrow iterILS + 1$ 
17      se ( $f(s^{*'}) < f(s^*)$ ) então
18         $s^* \leftarrow s^{*'}$ 
19  retorna  $s^*$ 
20 Fim
    
```

o sistema operacional *Ubuntu Linux* 14.04 – 64 bits). No entanto, apenas um processo (*thread*) foi utilizado nos experimentos. Os parâmetros adotados foram os mesmos utilizados em Penna *et al.* (2013).

O método CALCULADISTANCIAS, apresentado na Seção 4 resolve o Problema do Caminho Mínimo por meio do algoritmo Dijkstra da biblioteca Lemon.

5.1. Instâncias reais: um estudo de caso

O problema PRVE investigado neste trabalho, apresenta características particulares encontradas na distribuição do último quilômetro pós-catastrofes do tipo terremotos. Por isto, apresentamos um estudo de caso de aplicação do algoritmo na distribuição de kits de ajuda humanitária (água, alimentos, produtos de higiene, etc), utilizando como base o terremoto ocorrido em 2010 na cidade de Porto Príncipe no Haiti.

As informações necessárias para construção das instâncias foram geradas pelo SERTIT¹, a partir de imagens de satélites obtidas logo após o terremoto. Por meio dessas imagens de satélites os engenheiros do SERTIT identificam os pontos de concentrações de pessoas (locais de entregas dos produtos) e os locais que podem funcionar como depósitos. No caso de Porto Príncipe foram identificados 12 depósitos e 61 pontos de concentração. Para cada depósito foi estipulado sua capacidade de armazenamento baseado na área ocupada e para cada ponto de concentração, o número de pessoas existentes ou que poderiam ser atendidas naquele

¹Service Régional de Traitement d'Image et de Télédétection – <http://sertit.u-strasbg.fr>

ponto, baseado na população do entorno. Para determinar a demanda de cada ponto de concentração foi estipulado que cada habitante receberia um kit de ajuda. A capacidade do depósito não foi levada em consideração na resolução do problema, uma vez que o todos os depósitos eram grandes o suficiente para armazenar os kits necessários.

A partir das imagens a rede de transporte foi recuperada e traduzida em um grafo contendo as ligações (vias) entre os vértices, que podem ser os depósitos, os pontos de concentração ou os vértices de ligação (cruzamento das vias) e suas respectivas distâncias. Além disso, as vias foram classificadas pelo tipo e pelo estado, ou seja, a quantidade de entulho bloqueando a via (Figura 1). Foram consideradas 5 tipos de vias: (i) principais; (ii) secundárias; (iii) terciárias; (iv) veículos leves; (v) pedestres (Figura 1(a)). De acordo com o nível de entulho foram considerados 4 tipos de bloqueios: (i) sem bloqueio; (ii) ligeiramente bloqueada; (iii) moderadamente bloqueada e (iv) totalmente bloqueada (Figura 1(b)). A classificação das vias é essencial para verificar quais veículos podem trafegar por elas, e assim, calcular as distâncias que cada tipo de veículo deve percorrer para atender uma demanda de um ponto de concentração.



(a) Tipos de Vias

(b) Tipos de Bloqueios

Figura 1: Tipos de Bloqueios das Vias

Para realizar a entrega foram utilizados 3 tipos de veículos e suas características são apresentadas na Tabela 2. A capacidade é determinada pela quantidade unitária de kits que podem ser transportados e os custos fixos e variáveis são, respectivamente, o custo de se utilizar o veículo e o custo por unidade de distância percorrida.

Tabela 2: características dos veículos

Tipo	Capacidade	Custo Fixo	Custo Variável
A	250	1000	1,0
B	500	1500	1,2
C	1500	5000	1,7

Para se determinar as restrições de acesso dos diferentes tipos de veículos as vias, foram utilizadas as informações do nível de bloqueio após o terremoto. A Tabela 3 descreve essa relação. Cada célula da tabela representa quais veículos podem trafegar por cada via de acordo com nível de bloqueio.

Tabela 3: Restrição de acesso dos veículos: vias \times nível bloqueio

Vias	Bloqueio			
	Nenhum	Leve	Moderado	Total
Primária	A B C	A B	A	–
Secundária	A B C	A B	A	–
Terciária	A B C	A	–	–
Veículos Leves	A	–	–	–
Pedestres	–	–	–	–

5.2. Análises dos resultados

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados obtidos pelo MS-ILS para o PRVE. O MS-ILS foi executado com uma única viagem por veículo (MS-ILS-UV) e com múltiplas viagens (MS-ILS-MV), considerando-se as diferentes combinações de custos. As jornadas de trabalho adotadas foram de 6, 8 e 12 horas de trabalho e com tempo de serviço igual 5 segundos por kit. Para as duas tabelas, a coluna **Instância**, representa a característica da instância, por exemplo, o problema PP61c12d-6h-FV indica que é uma instância baseado em dados de Porto Príncipe com 61 pontos de distribuição, 12 depósitos, tempo limite de 6 horas e custos fixos e variáveis. O custo total da melhor solução encontrada pelo MS-ILS em 30 execuções, a distância total percorrida em quilômetros e o custo da frota são apresentada, respectivamente, nas coluna **Melhor Solução**, **Distância Percorrida** e **Custo da Frota**. A coluna **Frota Usada** descreve o número de veículos de cada tipo na solução obtida e **Veíc./Dep. Usados** o total de veículos e depósitos utilizados. O tempo computacional médio das 30 execuções do MS-ILS é apresentado na coluna **Tempo Médio**

Pela Tabela 4 é possível observar o MS-ILS-UV utilizou mais veículos do que o MS-ILS-MV (Tabela 5), podendo a diferença chegar a 50%. Vale ressaltar que no caso das instâncias estudadas, o tempo limite para a rota não é um limitante para o MS-ILS-UV, uma vez que o maior veículo necessita de no máximo 5h para efetuar toda a entrega em sua rota, a capacidade do veículo acaba sendo um limitante.

Tabela 4: Resultados obtidos pelo MS-ILS com uma única viagem

Instância	MS-ILS_UV					
	Melhor Solução	Distância Percorrida	Custo da Frota	Frota Usada	Veíc./Dep. Usados	Tempo Médio (s)
PP61c12d-6h-FV	73306,76	218,10	73000,00	$B^{12}C^{11}$	23 / 5	52,21
PP61c12d-6h-F	73213,03	213,03	73000,00	$B^{12}C^{11}$	23 / 5	49,72
PP61c12d-6h-V	266,99	176,85	–	$A^1B^6C^{14}$	21 / 5	59,27

Os resultados obtidos pelo MS-ILS-MV descritos na Tabela 5, indicam uma vantagem em utilizar múltiplas viagens quando os veículos possuem custos fixos. É interessante também observar que nestes casos, o número de depósitos utilizados e a distância percorrida são maiores, pois é preferível percorrer maiores distâncias, porém com um número menor de veículos.

Tabela 5: Resultados obtidos pelo MS-ILS com múltiplas viagens

Instância	MS-ILS_MV					
	Melhor Solução	Distância Percorrida	Custo da Frota	Frota usada	Veíc./Dep. Usados	Tempo Médio (s)
PP61c12d-6h-FV	58876,57	262,69	58500,00	$A^1B^5C^{10}$	16 / 7	31,05
PP61c12d-8h-FV	48405,69	259,54	48000,00	B^2C^9	11 / 8	37,58
PP61c12d-12h-FV	33432,39	283,63	33000,00	B^2C^6	8 / 6	25,19
PP61c12d-6h-F	63243,53	243,53	63000,00	B^2C^{12}	14 / 8	26,14
PP61c12d-8h-F	53227,69	227,69	53000,00	B^2C^{10}	12 / 7	32,89
PP61c12d-12h-F	37792,09	292,09	37500,00	$A^1B^1C^7$	9 / 8	33,30
PP61c12d-6h-V	289,29	194,46	–	$A^2B^7C^{12}$	21 / 5	30,24
PP61c12d-8h-V	284,09	188,24	–	$A^1B^7C^{10}$	18 / 5	36,67
PP61c12d-12h-V	270,31	180,06	–	$A^2B^7C^9$	18 / 5	36,45

6. Conclusões

Este trabalho apresenta uma nova heurística baseada na meta-heurística ILS para tratar o uma variante Problema de Roteamento de Veículos (PRV) com múltiplos depósitos, dimensionamento de frota heterogênea, restrições de acesso e múltiplas viagens, denominada PRV Especializado (PRVE). O problema aparece em diversas aplicações na indústria e também no problema estudado, a distribuição final de produtos no atendimento pós-catástrofe. A heurística desenvolvida foi aplicada em problemas-testes reais baseados no atendimento de vítimas do terremoto ocorrido na cidade de Porto Príncipe no Haiti em 2010.

Os resultados obtidos a partir desses dados podem ajudar os gestores na tomada de decisão e na distribuição dos itens necessários para atender a demanda da população. Além disso, os resultados gerados pela heurística permitem, (i) determinar os depósitos mais promissores com suas respectivas demandas, (ii) dimensionar a frota de veículos necessária para o atendimento; (iii) especificar as viagens de cada veículos dentro de uma jornada de atendimento pré-estipulada; (iv) traçar as rotas de acordo com situação de tráfego das vias, levando-se em consideração os diferentes níveis de bloqueio; (v) diminuir os custos operacionais.

Agradecimentos. Este trabalho é parte do Projeto OLIC (*Optimisation de la Logistique d'Intervention pour les Catastrophes majeures*), financiado pelo CSFRS – França (coordenado por Andréa Cynthia Santos) e foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Brasil.

Referências

- Afsar, H. M., Prins, C. and Santos, A. C.** (2014), Exact and heuristic algorithms for solving the generalized vehicle routing problem with flexible fleet size. *International Transactions in Operational Research*, v. 21, n. 1, p. 153–175.
- Alonso, F., Alvarez, M. J. and Beasley, J. E.** (2008), A tabu search algorithm for the periodic vehicle routing problem with multiple vehicle trips and accessibility restrictions. *Journal of the Operational Research Society*, v. 59, p. 963–976.
- Balcik, B., Beamon, B. M. and Smilowitz, K.** (2008), Last mile distribution in humanitarian relief. *J. of Intelligent Transportation Systems*, v. 12, p. 51–63.

- Cattaruzza, D., Absi, N., Feillet, D. and Vidal, T.** (2014), A memetic algorithm for the multi trip vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, v. 236, n. 3, p. 833 – 848. Vehicle Routing and Distribution Logistics.
- Caunhye, A. M., Nie, X. and Pokharel, S.** (2012), Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 46, n. 1, p. 4 – 13. Special Issue: Disaster Planning and Logistics: Part 1.
- Chao, I.-M., Golden, B. and Wasil, E.** (1999), A computational study of a new heuristic for the site-dependent vehicle routing problem. *INFOR*, v. 37, p. 319–336.
- Chao, I.-M. and Liou, T.-S.** A new tabu search heuristic for the site-dependent vehicle routing problem. Golden, B., Raghavan, S., Wasil, E., Sharda, R. and VoB, S. (Eds.), *The Next Wave in Computing, Optimization, and Decision Technologies*, volume 29 of *Operations Research/Computer Science Interfaces Series*, p. 107–119, 2005.
- Cordeau, J.-F. and Laporte, G.** (2001), A tabu search algorithm for the site dependent vehicle routing problem with time windows. *INFOR*, v. 39, p. 292–8.
- Cordeau, J.-F. and Maischberger, M.** (2012), A parallel iterated tabu search heuristic for vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, v. 39, n. 9, p. 2033 – 2050.
- Crevier, B., Cordeau, J.-F. and Laporte, G.** (2007), The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes. *European Journal of Operational Research*, v. 176, n. 2, p. 756–773.
- De la Torre, L. E., Dolinskaya, I. S. and Smilowitz, K. R.** (2012), Disaster relief routing: Integrating research and practice. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 46, n. 1, p. 88 – 97. Special Issue: Disaster Planning and Logistics: Part 1.
- Fleischmann, B.** The vehicle routing problem with multiple use of vehicles. Relatório técnico, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften, Univ. Hamburg, 1990.
- Golden, B. L., Assad, A. A., Levy, L. and Gheysens, F. G.** (1984), The fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Res.*, v. 11, p. 49–66.
- Hansen, P., Mladenović, N. and Moreno Pérez, J.** (2010), Variable neighbourhood search: methods and applications. *Annals of Operations Research*, v. 175, p. 367–407.
- Montoya-Torres, J. R., Franco, J. L., Isaza, S. N., Jiménez, H. F. and Herazo-Padilla, N.** (2015), A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers & Industrial Engineering*, v. 79, p. 115–129.
- Nag, B., Golden, B. and Assad, A.** *Vehicle routing: methods and studies*, Capítulo Vehicle routing with site dependencies, p. 149–59. Elsevier, 1988.

- Penna, P. H. V., Subramanian, A. and Ochi, L. S.** (2013), An iterated local search heuristic for the heterogeneous fleet vehicle routing problem. *Journal of Heuristics*, v. 19, n. 2, p. 201–232.
- Pisinger, D. and Røpke, S.** (2007), A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, v. 34, n. 8, p. 2403–2435.
- Prins, C.** (2002), Efficient heuristics for the heterogeneous fleet multitrip VRP with application to a large-scale real case. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, v. 1, p. 135–150.
- Rafael, D., Joshua, B., Ange-Lionel, T., Bridget, G., Man Wo, N., Francesco, L. and Letizia, N.** Humanitarian/emergency logistics models: A state of the art overview. *Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, SCSC '13*, p. 1–8, Vista, CA, 2013.
- Salhi, S., Imran, A. and Wassan, N. A.** (2014), The multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation. *Computers & Operations Research*, v. 52, Part B, p. 315 – 325.
- Salhi, S. and Sari, M.** (1997), A multi-level composite heuristic for the multi-depot vehicle fleet mix problem. *European Journal of Operational Research*, v. 103, n. 1, p. 95 – 112.
- Sniezek, J. and Bodin, L.** (2006), Using mixed integer programming for solving the capacitated arc routing problem with vehicle/site dependencies with an application to the routing of residential sanitation collection vehicles. *Annals of Operations Research*, v. 144, n. 1, p. 33–58.
- Souza, M., Coelho, I., Ribas, S., Santos, H. and Merschmann, L.** (2010), A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem. *European Journal of Operational Research*, v. 207, n. 2, p. 1041–1051.
- Subramanian, A., Drummond, L., Bentes, C., Ochi, L. and Farias, R.** (2010), A parallel heuristic for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Operations Research*, v. 37, n. 11, p. 1899 – 1911.
- Taillard, E. D., Laporte, G. and Gendreau, M.** (1996), Vehicle routing with multiple use of vehicles. *The Journal of the Operational Research Society*, v. 47, n. 8, p. 1065–1070.
- Tillman, F. A.** (1969), The multiple terminal delivery problem with probabilistic demands. *Transportation Science*, v. 3, n. 3, p. 192–204.
- Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M. and Prins, C.** (2014), Implicit depot assignments and rotations in vehicle routing heuristics. *European Journal of Operational Research*, v. 237, n. 1, p. 15 – 28.