

# Abordagem Heurística para o Problema de Roteamento de Veículos Elétricos e de Localização de Estações de Troca de Baterias com Custos Variados

Bráulio Manoel de Oliveira Portela, Luciana Brugiolo Gonçalves, Stênio Sã Rosário Furtado Soares

Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, Juiz de Fora - MG, Brasil  
{braulio.portela, lbrugiolo, ssoares}@ice.ufjf.com

**Resumo** Neste artigo, apresentamos uma nova perspectiva e uma nova abordagem para o problema de roteamento de veículos elétricos e de localização de estações de troca de baterias (BSS–EV–LRP), que visa determinar a localização ótima de estações de troca de bateria (BSSs) e simultaneamente o roteamento de uma frota de veículos elétricos (EVs) com o intuito de amenizar os impactos ambientais causados pelo uso de automóveis e possibilitar a utilização de veículos elétricos de forma economicamente viável em serviços de transportes. Neste trabalho, diferentemente de outros existentes na literatura que tratam deste mesmo problema, utilizamos de instâncias modificadas em que os custos de implantação das BSSs são diferentes, dependendo da densidade de clientes em algumas instâncias ou custos totalmente aleatórios em outras. Foi utilizada a combinação da modificação dos Algoritmos de Inserção Mais Barata para montagem das rotas, de Subconjunto Dominante Mínimo para a designação das BSSs e do método RVND para refinamentos. E finalmente após os resultados, foi feita uma avaliação sobre os possíveis impactos na resolução deste problema gerados pela alteração dos custos feita nas instâncias modificadas.

**Keywords:** Veículos Elétricos, Problema de roteamento e localização, Troca de Bateria.

## 1 Introdução

Nas últimas duas décadas, os impactos ambientais tornaram-se fatores cada vez mais relevantes nos processos de tomada de decisão na área de Logística. Esta nova percepção da importância da logística nas questões ambientais levou ao surgimento de uma área de pesquisa chamada Logística Verde, em que são consideradas restrições e funções objetivo estabelecidas sob a perspectiva de gerar soluções com menor impacto ao meio ambiente na produção e distribuição de produtos, o que pode é mais detalhado em [2]. Uma das principais linhas estabelecidas em Logística Verde considera a utilização de Veículos Elétricos como alternativa sustentável aos veículos movidos a combustíveis fósseis.

Os automóveis foram importantíssimos para o desenvolvimento da humanidade nos últimos dois séculos, sendo utilizados como transporte de pessoas ou cargas por curtas e longas distâncias. Os veículos predominantemente em circulação atualmente utilizam motor a combustão interna, alimentados por combustíveis fósseis que, apesar de alguns aspectos positivos, como eficiência e autonomia, possuem algumas sérias desvantagens ao se considerar seu impacto ambiental. A massiva poluição do ar, principalmente em áreas urbanas, e com os preços deste tipo de combustível batendo sucessivos recordes de aumento, são motivações suficientes para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis.

Como apresentado por [4], projetos de veículos elétricos já existem desde a virada do século XX, mas apenas recentemente, a partir de incentivos governamentais, principalmente em países da Europa e no Japão, e do desenvolvimento de novas tecnologias de bateria, criou-se uma alternativa viável, como avaliado por [5]. Entretanto, a autonomia dos veículos elétricos continua sendo relativamente menor quando comparada a dos transportes com motores a combustão.

Há diversas razões para se optar pela substituição de frotas convencionais por veículos com combustíveis menos poluentes, como veículos elétricos. Entretanto, um dos cenários com maiores dificuldades para esta substituição é a Cadeia de Suprimentos, também conhecida como Rede Logística, por demandar viagens mais longas e atendimento a vários pontos consecutivos sem o retorno ao ponto de partida ou pontos de abastecimento.

Assim, a instalação de pontos de troca de bateria apresenta-se como uma boa alternativa para alguns problemas de alcance de longas distâncias em curto tempo, como já estudado por [7]. Ao invés da necessidade de um gasto elevado de tempo para se recarregar um veículo no seu trajeto, a troca de sua bateria por uma outra carregada em pontos estratégicos demandaria poucos minutos.

Tendo este cenário, o desafio consiste em determinar para estes veículos os melhores caminhos a serem percorridos para atender o conjunto de clientes consumindo o mínimo possível do motor e designar os melhores pontos para se instalar bases de troca de baterias ao longo das rotas, caso seja necessário.

## 2 Formulações matemáticas

Este trabalho considera o problema proposto em [1], denominado Problema de Roteamento de Veículos Elétricos e de Localização de Estações de Troca de Baterias (BSS-EV-LRP), que visa determinar a localização ótima de estações de troca de bateria (BSSs) e o roteamento de uma frota de veículos elétricos (EVs) considerando a capacidade de carga dos veículos e as demandas dos clientes. A implantação de BSSs implica em custo de instalação e pode ser feita em qualquer um dos pontos candidatos. O propósito do problema é encontrar uma solução que minimize a soma dos custos de implementação de BSSs e do consumo de energia dos veículos ao percorrerem as rotas. Os autores apresentam dois modelos matemáticos e duas diferentes combinações de algoritmos, o TS-MCWS e o SIGALNS, para solucionar o problema. Além disso, foi desenvolvida uma

análise econômica e ambiental, incluindo comparação entre cenários básicos e ampliados, mostrando a eficiência na redução de emissões ao utilizar EVs.

Em [10] foi apresentado um novo método para resolver o problema utilizando o algoritmo Adaptive Variable Neighborhood Search (AVNS) obtendo, em alguns casos, resultados ainda melhores, principalmente para instâncias maiores.

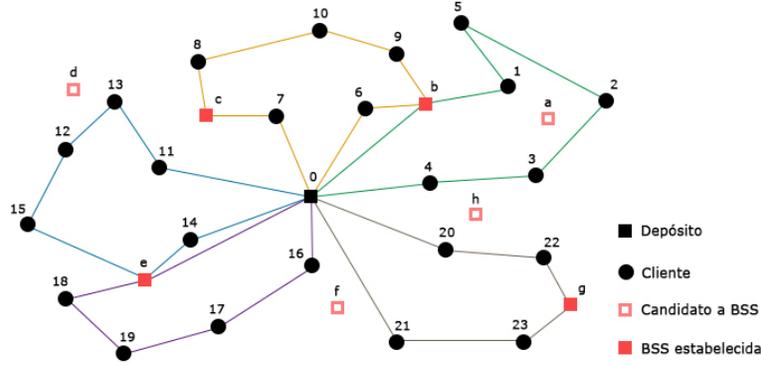


Figura 1. Exemplo de solução

O problema consiste em utilizar um conjunto  $K$  de veículos elétricos para atender as demandas de um conjunto  $I$  de clientes; há apenas um depósito onde cada rota deve começar e terminar; todo cliente deve ser atendido; deve-se observar a capacidade máxima do veículo; há um custo associado à distância percorrida; existe um conjunto de locais candidatos à BSS; há uma BSS no depósito (todos os veículos começam suas rotas com a bateria totalmente carregada); existe um conjunto  $J$  de BSS e, para cada estação, há um custo associado ao seu estabelecimento. O objetivo final é minimizar a soma dos custos de deslocamento dos veículos somado aos gastos com instalação das BSSs.

## 2.1 Modelo

A seguir é apresentada uma recompilação do modelo matemático apresentado por [1] para o problemas:

- $I$  - conjunto de clientes indexados pelo  $i$ ;
- $J$  - conjunto de candidato BSSs indexados pelo  $j$ ;
- $K$  - conjunto de EVs indexados  $k \in K$ ;
- $R$  - conjunto de rotas de veículos indexados por  $r \in R$ ;
- $\{o\}$  - o único depósito;
- $\{o'\}$  - uma cópia do depósito  $\{o\}$ ;
- $V$  - conjunto de nós indexado por  $v$ ,  $V = I \cup J \cup \{o\} \cup \{o'\}$ .

Variáveis de decisão:

$y_j$  - variável de decisão binária, tendo um valor de 1 se uma BSS estiver estabelecida no nó  $j$  e 0 em contrário;

$x_{ghk}$  - variável de decisão binária, tendo um valor de 1 se o veículo  $k$  vai do nó  $g$  para o nó  $h$  e 0 caso contrário.

Constantes de entrada do problema:

$d_{gh}$  - a distância do nó  $g$  para o nó  $h$ ;

$\gamma_{ghk}$  - o custo de transporte por milha a partir do nó  $g$  para o nó  $h$  com o veículo  $k$ ;

$M$  - um número grande;

$q_i$  - a demanda no nó  $i \in I \cup J$ , onde  $q_i = 0, \forall i \in J$ ;

$U_k$  - a capacidade de carga do veículo  $k$ ;

$u_{ghk}$  - a carga restante quando o veículo  $k$  atinge o nó  $g$  depois de deixar o nó  $h$ ;

$Q$  - a distância máxima de uma bateria totalmente carregada permite alcançar;

$P_{gk}^1$  - a distância máxima que a carga restante da bateria permite alcançar quando o veículo  $k$  chega ao nó  $g$ ;

$P_{gk}^2$  - a distância máxima que a carga restante da bateria permite alcançar quando o veículo  $k$  deixa o nó  $g$ ;

$f_j$  - o custo de construção da unidade BSS no nó  $j$ .

Modelo:

$$\text{Min } Z = \sum_{j \in J} f_j y_j + \sum_{g \in V} \sum_{h \in V} \sum_{k \in K} \gamma_{ghk} d_{gh} x_{ghk} \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{g \in V \setminus \{o'\}, g \neq h} \sum_{k \in K} x_{ghk} = 1 \quad \forall h \in I \quad (2)$$

$$\sum_{g \in V \setminus \{o'\}, g \neq h} \sum_{k \in K} x_{ghk} \leq M y_h \quad \forall h \in J \quad (3)$$

$$\sum_{h \in V \setminus \{o\}, h \neq g} x_{ghk} - \sum_{h \in V \setminus \{o'\}, h \neq g} x_{h g k} = 0 \quad \forall g \in V \setminus \{o, o'\}, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{h \in V \setminus \{o\}} x_{ohk} - \sum_{h \in V \setminus \{o'\}} x_{ho'k} = 0 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{h \in V \setminus \{o\}} x_{ohk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{h \in V \setminus \{o\}} x_{ohk} \leq |K| \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{o', j\}} u_{ijk} = \sum_{i \in V \setminus \{o, j\}} u_{jik} \quad \forall j \in J, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{o, i\}} u_{ijk} \leq \sum_{j \in V \setminus \{o', i\}} u_{jik} - q_i \sum_{j \in V \setminus \{o', i\}} x_{jik} + U_k (1 - \sum_{j \in V \setminus \{o', i\}} x_{jik}) \quad \forall i \in I, k \in K \quad (9)$$

$$0 \leq u_{ijk} \leq U_k x_{ijk} \quad \forall i \in V \setminus \{o'\}, j \in V \setminus \{o\}, i \neq j, k \in K \quad (10)$$

$$P_{hk}^1 \leq P_{gk}^2 - d_{gh} x_{ghk} + Q(1 - x_{ghk}) \quad \forall g \in V \setminus \{o'\}, h \in V \setminus \{o\}, g \neq h, k \in K \quad (11)$$

$$P_{ok}^2 = Q \quad \forall k \in K \quad (12)$$

$$P_{gk}^2 = Q y_g \quad \forall g \in J \quad (13)$$

$$P_{hk}^2 = P_{hk}^1 \quad \forall h \in I \quad (14)$$

$$P_{hk}^1 \geq 0 \quad \forall h \in V \quad (15)$$

$$y_j, x_{ghk} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, g \in V \setminus \{o'\}, h \in V \setminus \{o\}, k \in K \quad (16)$$

A função objetivo (1) minimiza o custo total, incluindo a soma dos custos de implantação das BSSs e a soma dos custos de deslocamentos dos veículos. As restrições (2) garantem que cada cliente seja visitado sempre por um único veículo. O conjunto de restrições (3) garante que os VEs só podem trocar suas baterias em um BSS estabelecida, enquanto as restrições (4) garantem o balanço do fluxo para cada veículo em cada nó. As restrições (5) garantem que cada veículo deve retornar ao depósito e as restrições (6) restringem cada veículo a apenas uma viagem quando este sai do depósito. A desigualdade (7) estabelece que a quantidade de veículos é limitado para  $|K|$ . A soma da carga restante de um EV chegando em um BSS é igual à soma da carga remanescente de um EV deixando um BSS (8). As restrições (9) garantem o controle da alteração do nível de carga remanescente de um EV para cada nó, enquanto a desigualdade (10) garante a limitação do nível de carga remanescente. As restrições (11) rastreiam nível da bateria de um veículo elétrico com base na sequência de nó. O nível de energia da bateria quando EVs deixam o depósito é sempre a capacidade máxima (12). O nível de energia da bateria quando EVs deixam um BSS estabelecido é sempre máxima (13). O nível da bateria permanece inalterada enquanto EVs

atendem um nó cliente (14). As restrições (15) garantem que cada EV tem energia suficiente em sua bateria para visitar os clientes restantes e retornar ao depósito. E por último, as restrições (16) estabelecem a natureza binária das variáveis de decisão.

Pode-se observar que, com as restrições (8) e (9), torna-se possível, para um EV, passar por uma BSS mais de uma vez, mas é restrito pela desigualdade (2) a visitar um cliente apenas uma vez.

## 2.2 Algoritmos propostos

Foram propostas duas abordagens em [1], a TS-MCWS e SIGALNS. Neste trabalho, é apresentada uma nova abordagem, a IMB-SDM-RVND, que se consiste em uma combinação de modificações dos Algoritmos de Inserção Mais Barata, para montagem das rotas, de Subconjunto Dominante Mínimo [9], para a designação das BSSs, e da metaheurística RVND [8] para refinamentos das rotas. Utilizando fatores de aleatoriedade, é criada uma população de soluções e, então, é escolhida aquela com melhor resultado viável.

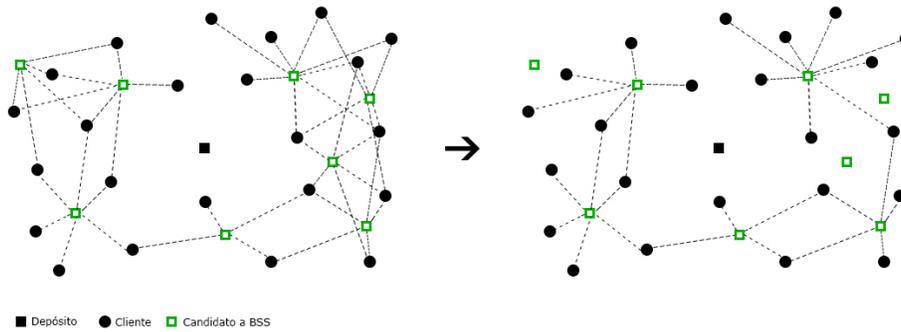
**Fase 1: Distribuir os clientes em rotas:** Primeiramente, são somadas as demandas de todos os clientes e dividida pela capacidade do veículo, obtendo-se a quantidade mínima de rotas necessárias para a solução. Em seguida, cria-se a quantidade de rotas obtida pelo cálculo e adiciona em cada uma delas um cliente da lista, escolhido aleatoriamente pelo método da roleta ([6]), utilizando as demandas como critério, dando assim mais chance para aqueles que tenham a demanda maior. Em seguida adiciona-se cada um dos demais clientes restantes utilizando o algoritmo de inserção mais barata com um certo fator de aleatoriedade. A cada nova iteração é verificado para cada cliente ainda não alocado a melhor inserção para ele na solução, obtendo-se a rota e em que local da rota, e os custos de acréscimo deste movimento. Tendo esta lista de melhores inserções de cada cliente, é feita uma escolha aleatória utilizando o método de torneio ternário, onde são sorteados três destes clientes e então escolhido o movimento mais barato entre estes. O procedimento é repetido até que não sobre nenhum cliente sem alocação e, caso haja a necessidade, causada por falta de capacidade em todas as rotas para atender a demanda de algum dos clientes, é criada uma nova rota.

**Fase 2: Refinamento das rotas:** Para a rota gerada na Fase 1, é aplicado o algoritmo RVND, que consiste em executar um conjunto de algoritmos de busca local em ordem previamente sorteada e, caso haja melhora em qualquer uma destas buscas, volta-se à primeira busca da lista. Neste trabalho, as buscas locais utilizadas foram:

- Shift - troca um ponto escolhido de rota (1,0);
- Swap - troca a posição entre dois pontos de rotas diferentes (1,1);
- Cross - quebra duas rotas e reconecta de forma cruzada;

- 2-opt - duas arestas não adjacentes são substituídas por duas novas arestas formando uma nova rota;
- Reinsertion - reinsere um ponto em outro local da mesma rota.

**Fase 3: Designação das bases de troca de bateria:** É gerado um novo grafo que representa as ligações entre as candidatas a BSSs e os clientes alcançados por elas baseados em uma porcentagem da bateria total dos veículos (inicialmente 40%). Com este novo grafo, encontra-se um subconjunto dos candidatos a BSSs em que tenha o mínimo de candidatos que atendam todos os clientes.



**Figura 2.** Demonstração do algoritmo de subconjunto dominante mínimo

Com o subconjunto dominante de bases gerado, volta-se às rotas e encontra-se os pontos de ruptura, pontos onde um veículo ao percorrer uma das rotas esgotaria sua bateria e não conseguiria alcançar o próximo ponto. Procura-se então algum dos candidatos existentes no subconjunto gerado que atenda ao ponto mais próximo anteriormente àquela ruptura e é feita uma ligação com este ponto. Caso não haja pontos no subconjunto que consiga atender aquele veículo, é adicionado de forma gulosa um ponto candidato a BSS mais próximo a ruptura que não pertence ao subconjunto. Ao final, após não existir mais rupturas nas rotas, são excluídos os candidatos do subconjunto dominante que não foram utilizados.

Todo o processo é repetido subtraindo 4% da porcentagem inicial a cada nova iteração e guardando a melhor solução até que a porcentagem atinja 0%. É escolhida então a melhor solução.

**Fase 3 adaptada: Designação das bases de troca de bateria considerando os custos das BSSs:** Com as modificações propostas neste trabalho em relação aos custos das BSSs utilizados pelo algoritmo da literatura, a Fase 3 foi adaptada, de forma que, ao gerar o subconjunto dominante mínimo, não mais se escolhe o menor subconjunto, mas sim o com o menor somatório de custos de implantação possível.

No caso onde não haja pontos no subconjunto que consiga atender a algum veículo em alguma ruptura, passa-se a adicionar o ponto mais barato que atenda aquela rota que não pertence ao subconjunto. O ponto mais barato é aquele que possui o menor valor obtido pelo somatório do preço de implantação daquela base com o valor da adição do caminho na rota.

**Multi-start** As Fases 1, 2 e 3 são repetidas varias vezes gerando uma população de soluções e, em seguida, é escolhida então a melhor solução dentre todas as soluções geradas.

### 3 Resultados computacionais

Os testes computacionais foram executadas com o algoritmo proposto implementado em C++ e executados em um computador com processador Intel Core i3 2.13GHz e 4GB de Ram, com sistema operacional Linux Ubuntu 16.04.1 LTS.

#### 3.1 Instâncias e parâmetros

Para este estudo, foram utilizadas algumas das instâncias modificadas por [1] do conjunto  $P$  de [3], obtidas em <http://neo.lcc.uma.es/vrp/vrp-instances/capacitated-vrp-instances/>.

As modificações foram seguidas pelos seguintes parâmetros:

- O depósito está localizado em (1, -1);
- Cada localização de clientes representa também um ponto candidato para uma BSS;
- A capacidade da bateria  $B$  é  $1.2 \times d_{max}$  e arredondada para o valor inteiro mais próximo, onde  $d_{max}$  corresponde à distância máxima entre quaisquer dois vértices da instância;
- O custo de construção de todas as BSSs é definido como  $0.5 \times B$  e arredondado para o valor inteiro mais próximo.
- Para os casos resolvidos com o resolvidor CPLEX, supõe-se que a capacidade de carga seja de 40 unidades. Para todos os outros casos, o valor da capacidade de carga dado no respectivo arquivo de instância é usado.

Além destas instâncias, para este estudo foram criadas variações das mesmas, com as marcas "D" e "R", onde os valores de construção de BSSs fossem diferentes para cada ponto. Os arquivos com terminação "D" indicam instâncias onde o custo de cada BSS é baseado na densidade de clientes ao redor do candidato em questão, sendo mais caro implantar uma BSS em um candidato que possua mais clientes em sua vizinhança próxima e os que terminam em "R" são instâncias onde o valores de construção de cada BSS é gerado aleatoriamente.

### 3.2 Resultados

Além de uma comparação com a literatura, neste estudo apresenta-se também um comparativo entre o algoritmo IMB-SDM-RVND apresentado com e sem a adaptação proposta na Fase 3, onde consideram-se os valores de construção das BSSs ao escolher os candidatos.

Primeiramente foi feita uma comparação entre os resultados obtidos pelo CPLEX com tempo limite de 10800 segundos relatados por [1] com os algoritmos IMB-SDM-RVND e IMB-SDM-RVND adaptado propostos neste trabalho utilizando instâncias geradas pelos autores. Em seguida foram feitas comparações entre as duas versões do algoritmo apresentado neste trabalho em relação a abordagem SIGALNS, também de [1]. Por ter alcançado resultados piores em todas as instâncias comparadas, o algoritmo TS-MCWS não foi utilizado como comparativo.

A Tabela 1 representa, para cada instância, o nome, o número de clientes a serem atendidos  $|I|$ , o número de veículos utilizados  $|K|$  e a quantidade de BSSs utilizadas pela solução  $|J|$ . Para o CPLEX são representados o valor do melhor resultado da função  $f$  e o tempo de execução em segundos  $t$ . Para os demais algoritmos são representados o valor do melhor resultado da função  $f$  obtido entre trinta iterações, o intervalo entre o valor obtido e a melhor solução  $\Delta$  e o tempo médio das execuções em segundos  $t^m$ . Valores em negrito indicam os melhores resultados.

Pode-se observar que as abordagens apresentadas mostraram-se competitivas, tendo obtido soluções ótimas para os três grupos de instâncias, mas com tempos inferiores a 20 segundos, enquanto o resolvidor CPLEX exigiu, em média, 784 segundos.

Instâncias	$ I $	$ K $	$ J $	CPLEX		IMB-SDM-RVND			IMB-SDM-RVND <sup>ad</sup>		
				$f$	$t(s)$	$f$	$t^m(s)$	$\Delta(\%)$	$f$	$t^m(s)$	$\Delta(\%)$
P-n6-k2	6	2	2	<b>426,86</b>	10,51	<b>426,86</b>	0,07	0,00	<b>426,86</b>	0,10	0,00
P-n7-k3	7	2	2	<b>428,60</b>	489,69	<b>428,60</b>	0,08	0,00	<b>428,60</b>	0,08	0,00
P-n8-k3	8	3	2	<b>597,16</b>	1853,04	<b>597,16</b>	0,12	0,00	<b>597,16</b>	0,12	0,00
<i>Avg.</i>	7	2,3	2	484,21	784,41	484,21	0,09	0,00	484,21	0,10	0,00

**Tabela 1.** Comparativo dos resultados entre CPLEX e duas versões da heurística apresentadas para as instâncias geradas

A Tabela 2 representa as mesmas informações da Tabela 1, com a adição da quantidade de BSSs utilizadas por cada uma das soluções  $|J|$  e o valor da média dos resultados  $f^m$  gerados através das 30 iterações. Além disso, neste experimento foram usadas as instâncias modificadas com valores de BSSs diferentes para cada ponto.

Nota-se que a informação referente ao custo de implantação das BSSs ao se definir o conjunto dominante tem impacto significativo no comportamento do algoritmo. O que pode ser verificado ao se comparar o valor da função  $f$  para o último algoritmo da tabela, que obteve os melhores resultados para 9 dos 12 grupos de instâncias.

Instâncias	SIGALNS			IMB-SDM-RVND					IMB-SDM-RVND <sup>ad</sup>						
	$ I $	$ K $	$ J $	$f$	$t^m(s)$	$ J $	$f$	$f^m$	$t^m(s)$	$\Delta(\%)$	$ J $	$f$	$f^m$	$t^m(s)$	$\Delta(\%)$
P-n16-k8	16	8	1	<b>1281,95</b>	2,58	2	1337,02	1341,35	0,23	4,30	2	1337,02	1341,35	0,24	4,30
P-n16-k8D	16	8	-	-	-	5	1435,49	1490,71	0,32	-	3	<b>1371,10</b>	1376,91	2,497	-
P-n16-k8R	16	8	-	-	-	7	1417,68	1438,31	0,34	-	2	<b>1284,02</b>	1286,21	0,31	-
P-n19-k2	19	2	1	471,39	2,78	1	<b>467,03</b>	474,37	0,35	-0,92	1	<b>467,03</b>	474,37	0,39	-0,92
P-n19-k2D	19	2	-	-	-	1	495,59	509,36	0,32	-	1	<b>495,03</b>	502,42	0,42	-
P-n19-k2R	19	2	-	-	-	2	447,31	459,08	0,43	-	1	<b>453,717</b>	460,21	0,38	-
P-n23-k8	23	8	1	<b>1360,51</b>	3,14	2	1423,90	1486,84	0,59	4,66	2	1423,90	1486,84	0,63	4,66
P-n23-k8D	23	8	-	-	-	5	1593,39	1697,73	0,77	-	2	<b>1430,90</b>	1517,69	0,66	-
P-n23-k8R	23	8	-	-	-	5	1605,42	1730,22	0,81	-	3	<b>1467,53</b>	1512,44	0,66	-
P-n45-k5	45	5	2	<b>939,63</b>	7,69	2	950,54	973,57	3,16	1,16	2	950,54	973,57	3,29	1,16
P-n45-k5D	45	5	-	-	-	3	1026,20	1105,89	3,58	-	2	<b>1012,67</b>	1072,95	3,424	-
P-n45-k5R	45	5	-	-	-	4	1036,3	1109,62	3,43	-	3	<b>989,81</b>	1037,03	3,35	-

**Tabela 2.** Comparativo dos resultados entre a abordagem SIGALNS e as duas versões da heurística apresentada para as instâncias da literatura e modificadas

## 4 Conclusões e trabalhos futuros

Pelos resultados obtidos observa-se que as abordagens propostas para resolver o problema apresentadas em [1] nem sempre chegaram em bons resultados para as instâncias modificadas apresentadas neste trabalho, com custos de implementação de BSSs diferentes.

Foi possível que a adaptação proposta em todos os casos em que as instâncias possuíam valores de implantação de BSSs iguais não tiveram nenhum tipo de alteração nas soluções finais, mudando apenas o tempo de processamento. Já para as instâncias modificadas, é notório o ganho no valor da função objetivo.

Além disso, o uso do conceito de conjunto dominante em grafos implicou em um diferencial para que as abordagens propostas estabelecessem uma redução na quantidade de pontos candidatos a implantação de estações, o que levou a um tempo de processamento competitivo para as abordagens propostas.

Para trabalhos futuros, pode-se citar a proposta de uma abordagem híbrida para o problema, utilizando método exato integrado a esta abordagem heurística proposta, de forma a melhorar os resultados já alcançados.

## Referências

1. Yang, J. e Sun, H. (2015), Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles. *Computers & Operations Research*, v. 55, p. 217–232.
2. Sbihi, A. e Eglese, R. W. (2010), Combinatorial optimization and green logistics. *Annals of Operations Research*, v. 175, n. 1, p. 159–175.
3. Augerat, P., Belenguer, J. M., Benavent, E., Corberán, A., Naddef, D. e Rinaldi, G. (1998), Computational results with a branch-and-cut code for the capacitated vehicle routing problem.
4. Baran, R. e Legey, L. F. L. (2011), Veículos elétricos: história e perspectivas no brasil. *BNDES Setorial*, n. 33, mar. 2011, p. 207-224.
5. Castro, B. H. R. d. e Ferreira, T. T. (2010), Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. *BNDES Setorial*, n. 32, set. 2010, p. 267-310.
6. Lipowski, A. e Lipowska, D. (2012), Roulette-wheel selection via stochastic acceptance. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 391, n. 6, p. 2193–2196.
7. Mirchandani, P., Adler, J. e Madsen, O. B. (2014), New logistical issues in using electric vehicle fleets with battery exchange infrastructure. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, v. 108, p. 3–14.
8. Hansen, P.; Mladenovic, N. “An introduction to variable neighborhood search”. In *MetaHeuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization*, edited by I. O. Voss, S. Martello and C. Roucairol. Kluwer, 1999.
9. Haynes, Teresa W., Stephen T. Hedetniemi, and Peter J. Slater. “Domination in graphs: advanced topics, volume 209 of Monographs and Textbooks in Pure and Applied Mathematics.”(1998).
10. Hof, Julian, Michael Schneider, and Dominik Goeke. ”Solving the battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles using an AVNS algorithm for vehicle-routing problems with intermediate stops.”*Transportation Research Part B: Methodological* 97 (2017): 102-112.