

Abordagem de roteamento de veículos com procedimentos exatos e heurísticos sob uma óptica ambiental: um estudo de caso

Approach to vehicle routing with exact, heuristic and environmental procedures: a case study

Ayla Lohanna da Silva¹

Júlio César Ferreira²

Maria Teresinha Arns Steiner³

Resumo

Este artigo possui o objetivo de apresentar alternativas de roteirização otimizada de transporte coletivo privado para uma indústria química, do município de Curitiba-PR, Brasil. Para tanto, aplica-se o modelo matemático do Problema do Caixeiro Viajante (PCV), o modelo matemático das p -Medianas e as heurísticas dos *Savings* de Clarke & Wright, *Iterated Local Search* (ILS), Busca Tabu (BT) e *Simulated Annealing* (SA) de forma comparativa. Os modelos matemáticos aqui empregados se mostraram relevantes para a pesquisa, bem como o uso das técnicas heurísticas, com tempo computacional inferior a um segundo e boa proximidade do resultado ótimo. Foi possível otimizar em 83% da distância total percorrida e 79% das emissões de dióxido de carbono em relação a condição inicial. Como a metodologia é genérica, ela poderá ser aplicada as mais diversas situações.

Palavras-chaves: Problema do Caixeiro Viajante (PCV). Meta-heurísticas (MH). Transporte Fretado. Otimização. Gases de Efeito Estufa.

Abstract

This paper aims to present an alternative of optimized routing of private collective transport to a chemical industry, in the municipality of Curitiba-PR, Brazil. In order to reach it, it was applied the mathematical model of the Traveling Salesman Problem (TSP), the p -Median and the heuristics Iterated Local Search (ILS), Tabu Search (TS), Simulated Annealing (SA) and the Clarke & Wright Savings algorithm in a comparative way. The mathematical models used here were relevant to the research, as well as the heuristics techniques, with computational time less than one second and good proximity to the optimal result. It was possible to optimize 83% of total distance of the route and 79% of carbon dioxide emissions in relation to the initial condition. As the methodology is generic, it could be applied to several applications.

Keywords: Traveling Salesman Problem (TSP). Metaheuristics. Freight Transportation. Optimization. Greenhouse gases.

1 Possui Graduação em Engenharia de Produção pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR; 2017) e atualmente é Bolsista CAPES de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS) da PUCPR. aylallohannadasilva@gmail.com

2 Possui Graduação em Engenharia de Produção pela PUCPR (2013), com Especialização em Metodologia do Ensino na Educação Superior - Grupo UNINTER (2016), foi bolsista CAPES de Mestrado no PPGEPS da PUCPR (2016). Atualmente é Professor do Ensino Superior no Centro Universitário UNISOCIESC de Curitiba e Bolsista CAPES de Doutorado no PPGEPS da PUCPR. ferreira.julio@pucpr.edu.br

3 Possui Graduação em Licenciatura em Matemática pela UFPR (1978); Graduação em Engenharia Civil pela UFPR (1981), Mestrado em Engenharia de Produção pela UFSC (1988), Doutorado em Engenharia de Produção pela UFSC (1995), Pós-Doutorado pelo ITA (2005) e Pós-Doutorado pelo IST de Lisboa (2014). Desde fevereiro de 2011 vem atuando na PUCPR, no curso de Graduação em Engenharia de Produção e no PPGEPS da PUCPR. maria.steiner@pucpr.br

1 Introdução

A partir do ano de 1973, na zona oeste do município de Curitiba, localizado no Estado do Paraná, teve o início à ocupação do bairro Cidade Industrial de Curitiba (CIC), de acordo com IPPUC (2015), com intuito de assentar as indústrias do referido município. Assim, intensificou-se o tráfego de veículos responsáveis pela movimentação de cargas e transporte de pessoas na região.

Neste contexto, vários fatores passaram a ser considerados no momento de selecionar o meio de transporte de funcionários para essa região, tais como: a distância do centro do município de Curitiba ao CIC, a crescente preocupação com os impactos ambientais causados pelas emissões atmosféricas liberadas pelos veículos, bem como, os problemas enfrentados no transporte público curitibano, como as longas distâncias percorridas, a lotação da frota e o preço da tarifa, que têm desestimulado o seu uso (Secretaria de Comunicação Social do Senado Federal, 2013).

Portanto, as indústrias localizadas nessa região têm optado, cada vez mais, por oferecer transporte coletivo privado (fretado) a seus funcionários. Este tipo de transporte, em geral, passa em frente das residências dos funcionários ou, então, em locais próximos a elas. Dessa forma, segundo Zilli (2011), o empregador ao disponibilizar o transporte fretado prioriza a comodidade, a segurança e a redução de atrasos de seus colaboradores, fatores esses que podem influenciar em seu nível de produtividade.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma alternativa otimizada de roteirização de transporte coletivo privado para uma indústria química, localizada na CIC. Para tanto, aplica-se o modelo matemático do Problema do Caixeiro Viajante (PCV), o modelo matemático das p -Medianas e heurísticas para a definição dos agrupamentos (quando necessário) e das rotas, ou seja, da sequ-

ência de pontos de demanda a serem transpassados. Desta forma, os usuários do serviço poderão ser atendidos em um prazo menor, além da empresa melhor se auto organizar apresentando, com isso, vantagens competitivas em relação às empresas concorrentes.

O presente artigo está estruturado da seguinte forma: na seção 2 tem-se a descrição do problema abordado; na seção 3 está apresentada de forma sucinta, a revisão da literatura relacionada ao tema aqui abordado. A metodologia é apresentada na seção 4 e os resultados são apresentados e discutidos na seção 5. Finalmente, na seção 6, estão as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

2 Descrição do problema

No bairro CIC, em 1988, deu-se início as operações da indústria química XYZ a que se refere esse trabalho. Nela são fabricadas duas linhas de produtos, a primeira em processo de batelada, executado em horário administrativo, já a segunda em processo contínuo, que opera em 3 turnos, 24 horas por dia. Assim, a indústria XYZ trabalha conforme os regimes de horário apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação dos regimes de trabalho e horário da indústria XYZ

Regime de trabalho	Regime de Horário
Administrativo (seg. à sex)	8h30 às 17h30
Produção - 1º turno	7h às 15h
Produção - 2º turno	15h às 23h
Produção - 3º turno	23h às 7h

Fonte: Autores.

Atualmente a indústria XYZ conta com 138 colaboradores próprios, 19 estagiários, 4 menores aprendizes, totalizando 161 colaboradores para os quais é oferecido o transporte fretado para seu

deslocamento de suas residências para o trabalho e vice-versa. Além disso, há mais de 100 terceiros fixos, que prestam serviços em áreas de apoio, que atualmente não usufruem do benefício do transporte fretado.

O transporte fretado opera em duas modalidades: para atender os colaboradores que trabalham no regime de horário administrativo e os operadores de turno. A primeira, que será abordada nesse trabalho, opera em rota fixa, na qual a frota, constituída de um micro-ônibus com capacidade com 32 passageiros passa em pontos próximos a residência dos 11 colaboradores usuários do transporte. A seguir, na Tabela 2, está a listagem dos pontos de coleta/entrega, do trajeto para a indústria XYZ, enquanto na Figura 1 está a sua representação em um mapa.

Na segunda modalidade, os operadores de turno trabalham em cinco grupos, de seis colaboradores cada, seguindo programação de turno rotativa, ou seja, os grupos se revezam nos três regimes de horário de trabalho existentes.

A indústria XYZ pretende incentivar o uso do transporte fretado, a fim de aumentar a aderência de colaboradores próprios e estimular o uso dos terceiros fixos ao serviço de transporte fretado. Além disso, a empresa visa contribuir para a redução das emissões de dióxido de carbono, que é um dos objetivos de desenvolvimento sustentável propostos pela diretoria da empresa.

Para isso fez-se a verificação dos funcionários interessados nesta modalidade de transporte e depois listados junto aos usuários que atualmente desfrutam do serviço, já apresentado na Tabela 2. A Figura 2 apresenta a localização geográfica dos endereços listados na Tabela 3.

Vale ressaltar que a roteirização de transporte fretado para os operadores de turno não estará contemplada nesse trabalho, uma vez que o processo não seria completamente proveitoso, pois o número de colaboradores que usufruem do trans-

porte é restrito. Além disso, a frequência de uso pelos operadores pode variar conforme o turno em que estão trabalhando, o que faria com que houvesse constante alteração da rota.

Visto isso, foi determinada a primeira modalidade de transporte fretado, que atende regime de horário administrativo, como escopo desse trabalho.

Tabela 2: Pontos de coleta/entrega do trajeto para a Indústria XYZ (11 colaboradores; 9 pontos de demanda)

Pontos	Pontos de coleta do trajeto de ida	Nº de pessoas coletadas
1	Av. Rui Barbosa, São José dos Pinhais	1
2	R. Marechal Deodoro, Curitiba	1
3	Praça Rui Barbosa, Curitiba	1
4	R. Guararapes, Curitiba	1
5	R. Guararapes, Curitiba	2
6	R. Francisco Frischemann, Curitiba	1
7	R. Dr. João Tobias Pinto Rebelo, Curitiba	1
8	R. Marechal Otávio Saldanha Mazza, Curitiba	2
9	R. Marechal Otávio Saldanha Mazza, Curitiba	1
XYZ	R. João Lunardelli, Curitiba "Indústria XYZ"	-

Fonte: Autores.

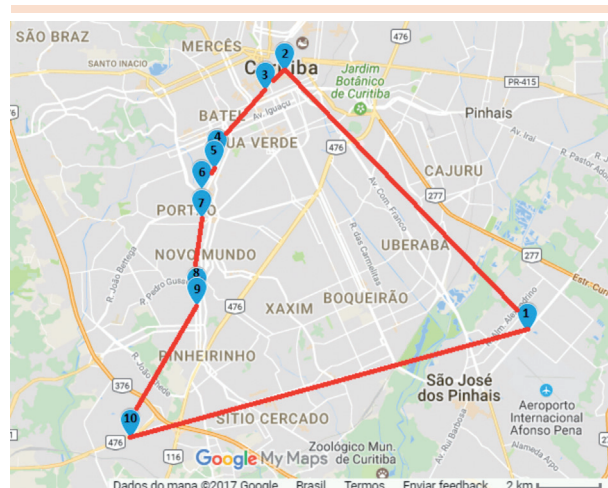


Figura 1: Representação dos pontos de coleta/entrega do trajeto para a Indústria XYZ

Fonte: Autores com o auxílio da Google Maps.

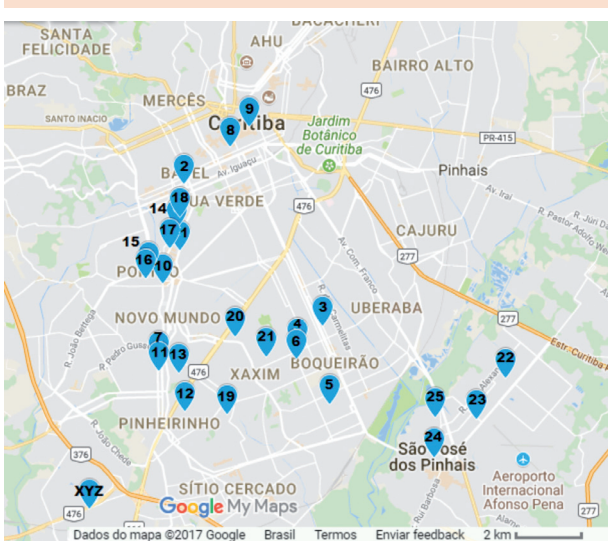


Figura 2: Representação da proposta dos pontos de coleta/entrega do trajeto futuro para a Indústria XYZ
 Fonte: Autores com o auxílio do Google Maps.

3 Fundamentação Teórica

De acordo com Detro (2013), a Otimização Combinatória (OC) trata de problemas cuja solução envolve a otimização da função objetivo, e também busca satisfazer as restrições em relação às respectivas variáveis de decisão. Existem diversas abordagens para solucionar os problemas categorizados como de OC, sendo que algumas delas serão apresentadas na sequência.

3.1 Problema do Caixeiro Viajante

A partir de Izidoro (2015), o PCV é um dos mais conhecidos, tradicionais e estudados dos problemas de Programação Matemática. Estes problemas lidam com os *tours* (rotas). Entre estas rotas, o mais importante é denominado de hamiltoniano, cuja nomenclatura veio do Willian Rowan Hamilton, que propôs um jogo, em 1857, chamado *Around the World* (volta ao mundo). O objetivo era encontrar uma rota através dos vértices que inicie e termine na mesma cidade. Hamilton não foi o primeiro a propor este problema, porém,

Tabela 3: Pontos de coleta/entrega do trajeto para a Indústria XYZ (26 colaboradores; 25 pontos de demanda)

Pontos	Pontos de coleta do trajeto de ida	Nº de pessoas coletadas
1	R. Guilherme Pugsley, Curitiba	1
2	Av. Silva Jardim, Curitiba	1
3	R. Tenente Tito Teixeira de Castro, Curitiba	1
4	R. Major Theolindo Ferreira Ribas, Curitiba	1
5	R. Arthur Manuel Iwersen, Curitiba	1
6	R. Salvador Ferrante, Curitiba	1
7	R. Marechal Otávio Saldanha Mazza, Curitiba	1
8	Praça Rui Barbosa, Curitiba	1
9	R. Marechal Deodoro, Curitiba	1
10	R. Dr. João Tobias Pinto Rebelo, Curitiba	1
11	R. Marechal Otávio Saldanha Mazza, Curitiba	1
12	R. Luciano Piuze, Curitiba	1
13	R. Eloi Orestes Zeglin, Curitiba	1
14	R. Guararapes, Curitiba	1
15	R. João Bettega, Curitiba	1
16	R. Caetano Marchesini, Curitiba	1
17	Av. República Argentina, Curitiba	1
18	R. Guararapes, Curitiba	2
19	R. Batista da Costa, Curitiba	1
20	R. Pastor José Pinheiro de Lacerda, Curitiba	1
21	R. Hermínia Zanetti, Curitiba	1
22	R. Dr. Francisco Fajardo, São José dos Pinhais	1
23	R. Pará, São José dos Pinhais	1
24	R. Joaquim Nabuco, São José dos Pinhais	1
25	R. Coronel Quadros, São José dos Pinhais	1
XYZ	R. João Lunardelli, Curitiba	-

Fonte: Autores.

a solução recebeu o seu nome como homenagem. Independentemente deste jogo, o PCV trata de um problema de otimização que almeja a determinação do caminho hamiltoniano de menor custo, de um grafo $G(N, A)$ qualquer.

Considere $G(V, A)$ um grafo, para o modelo matemático do PCV, sendo que $V = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ é um conjunto de nós e A um conjunto de arcos. Nesse contexto, os nós podem representar cidades e os arcos, como pares ordenados de cidades por meio das quais é possível realizar um trajeto/viagem. Para o arco (i, j) pertencente a A , c_{ij} é o tempo do trajeto/viagem da cidade i para a cidade j . O problema consiste em encontrar uma rota que forme um circuito hamiltoniano, isto é, que inicie e termine na cidade de origem, que tenha o mínimo tempo de viagem e visite todas as cidades uma única vez. Considerando que as variáveis $x_{ij}=1$ representam que a cidade j foi visitada na sequência da cidade i ; caso contrário, $x_{ij} = 0$, tem-se o modelo matemático de Programação Linear Inteiro Binário (PLIB) para o PCV de (1)-(5) na sequência que fornece a solução exata.

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \tag{1}$$

$$s. a. \quad \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, n \tag{2}$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, n \tag{3}$$

$$\sum_{\{i,j\} \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad (S \subset V) \tag{4}$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \tag{5}$$

A função objetivo em (1) minimiza o tempo total a ser despendido no trajeto de percorrida. As equações (2) e (3) representam dois conjuntos de restrições, que respectivamente fazem com que na rota final “entre” e “saia” apenas um arco de cada nó. Em (5), tem-se que as variáveis devem ser binárias. Ao considerarmos um conjunto de cidades S (subconjunto do conjunto de cidades do problema V) com s cidades, em que $2 \leq s < n$, as inequações em (4) garantem que não haverá a formação de sub-rotas para o conjunto de cidades S (Belfiore & Fávero, 2013).

3.2 Problema de localização de facilidades

O problema das p -Medianas ou PLF, de acordo com Ferreira, Steiner e Guersola (2017), procura localizar uma quantidade p de instalações que fornecem um determinado serviço a fim de minimizar a distância ponderada dos respectivos clientes a instalação mais próxima. Este problema também pode ser solucionado através do modelo matemático PLIB, apresentado de (6) a (11).

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_j d_{ij} x_{ij} \tag{6}$$

$$s. a. \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i \in N \tag{7}$$

$$\sum_{j=1}^n x_{jj} = p \tag{8}$$

$$x_{ij} \leq x_{jj}, \quad i, j \in N \tag{9}$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq 15, \quad j = 1, \dots, n$$

(10)

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j \in N$$

(11)

Assim: $[d_{ij}]_{n \times n}$ é a matriz das distâncias, onde $d_{ii} = 0$, para todo i ; $[x_{ij}]_{n \times n}$ é a matriz de alocação, com $x_{ij} = 1$ se o vértice i estiver alocado ao vértice j ; $x_{ij} = 0$, caso contrário; $x_{ji} = 1$ se o vértice j for uma mediana, e $x_{ji} = 0$, se não; p é o número de medianas a serem localizadas no problema; N é o conjunto de pontos considerados, $N = \{1, 2, \dots, n\}$; w_i refere-se ao peso do vértice i .

Em (6), a função objetivo busca minimizar a distância entre os elementos e a(s) mediana(s); as restrições em (7) e (9) exigem que cada vértice i seja alocado somente a somente um vértice j . No caso da restrição (8), ela determina especificamente o número de medianas (p); as variáveis em (11) são binárias, assumindo o valor “1” se pertencer a uma mediana e “0”, caso contrário. De forma complementar, a empresa XYZ estabeleceu a restrição de que o motorista não pode realizar mais do que 15 entregas e coletas de funcionário por roteiro, uma vez que essa é a capacidade de passagei-

ros do veículo. Portanto, foi adicionada a restrição (10) ao modelo matemático.

3.3 Algoritmo dos Savings de Clarke e Wright

O algoritmo construtivo heurístico dos *Savings* (economias) de Clarke & Wright (*Savings* de C&W), de 1964, é um dos algoritmos heurísticos clássicos para a construção de rotas (Gonçalves, Steiner & Souza, 2013). A Figura 3 apresenta os passos deste algoritmo.

3.4 Meta-heurística Simulated Annealing

Segundo Kripka e Kripka (2013), o *Simulated Annealing* (SA; ou Recozimento Simulado) apresenta uma estratégia diferente quanto aos métodos exatos, visto que a partir de critérios probabilísticos aceita soluções que “pioram” a função objetivo para escapar de mínimos locais. O método foi proposto por Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi (1983) que se baseou no trabalho de Metropolis, segundo Metropolis, Rosenbluth, Rosenbluth, Teller e Teller (1953). A terminologia recozimento é decorrente do processo de aquecimento de um sólido até o seu ponto de fusão, seguido de um suave resfriamento. O procedimento do resfriamento lento é necessário para a manutenção do

Algoritmo dos *Savings* de Clarke e Wright

INÍCIO

Passo 1: Iniciar pelo vértice “1”;

Passo 2: Calcular os *savings*:

$$S_{ij} = C_{1i} + C_{1j} - C_{ij}$$

para todo $i, j = 2, 3, 4 \dots, n$. Considerar $s_{ij} = 0$, se $i = j$, $i = 1$ e $j = 1$;

Passo 3: Ordenar os *savings* em ordem decrescente;

Passo 4: Iniciando do topo da lista dos *savings*, ou seja, pelo maior valor, forme sub-rotas maiores até formar um único ciclo, fazendo a ligação dos nós i e j apropriados.

FIM

Figura 3: Passos do Algoritmo dos *Savings* de Clarke e Wright.

Fonte: Gonçalves, Steiner e Souza (2013).

equilíbrio térmico para os átomos se reorganizem com uma mínima energia.

A função objetivo representa a energia do sólido de maneira aproximada ao recozimento em termodinâmica. Caso seja obtida uma solução viável, ela será aceita, caso contrário, ela poderá ser aceita ao atender o critério probabilístico (12).

$$p = \exp\left(\frac{-\Delta f}{T}\right) \quad (12)$$

onde: p = função aceite da nova solução determinada aleatoriamente; Δf = variação da função objetivo; T = parâmetro de temperatura que mede a probabilidade de piora da função objetivo.

Neste caso, a nova solução será aceita se p for maior que um número pertencente ao intervalo (0,1), gerado randomicamente; caso contrário, será mantida a solução anterior. O valor de T decresce por conta do fator de redução α , até que o critério de parada seja atendido.

É calculada a variação de cada novo vizinho s' de s , onde:

- $\Delta f < 0$: a nova solução s' é aceita e ela passa a ser a nova solução, pois houve redução de energia;
- $\Delta f = 0$: a nova solução s' é aceita e passa a ser a nova solução, porém, não ocorre alteração de energia;
- $\Delta f > 0$: a solução depende do critério probabilístico para ser aceita, pois há um aumento de energia.

No momento em que a temperatura está elevada, aumentam as chances de “escapar” de mínimos locais em relação a temperaturas inferiores. O procedimento finaliza quando as soluções não são mais aceitas e a temperatura chega próximo

de “0”. O procedimento da meta-heurística SA é apresentado na Figura 4.

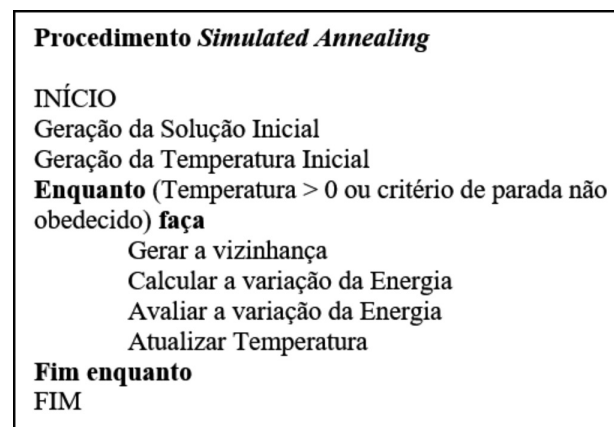


Figura 4: Procedimento da meta-heurística *Simulated Annealing*

Fonte: Adaptado de Kripka e Kripka (2013).

3.5 Meta-heurística Busca Tabu

Segundo Detro (2013), considera-se que Glover (1986) é o pai da meta-heurística Busca Tabu (BT) devido à grande quantidade de trabalhos publicados neste contexto. O método segue a premissa da busca local, onde movimentos são gerados a cada iteração obtendo-se soluções vizinhas. O algoritmo BT possui três premissas: a primeira se refere ao uso de uma estrutura de dados (uma lista) para armazenar o histórico da evolução do processo de busca. A segunda se refere ao uso de um mecanismo de controle para o aceite ou não da nova solução, com base nos registros da lista tabu referente às restrições e critério de aspiração. Por fim, a terceira e última, visa a incorporação de procedimentos que modificam as estratégias de diversificação e de oscilação.

O procedimento BT inicia a partir de uma solução inicial. Cada passo do algoritmo gera uma solução vizinha da solução atual e na sequência, pesquisa o “melhor vizinho”, que passará a ser (ou não) a solução vigente. A lista tabu tem o objetivo de explorar opções adicionais de soluções enquanto o movimento permanecer na

lista. Vale ressaltar que alguns movimentos, mesmo proibidos, poderão ser executados desde que atendam o critério de aspiração estabelecido; em geral, este critério permite o movimento tabu se a solução encontrada for melhor do que qualquer solução obtida até o momento. O algoritmo finaliza ao alcançar o critério de parada que normalmente é um número pré-estabelecido de iterações. A Figura 5 apresenta o procedimento da meta-heurística BT.

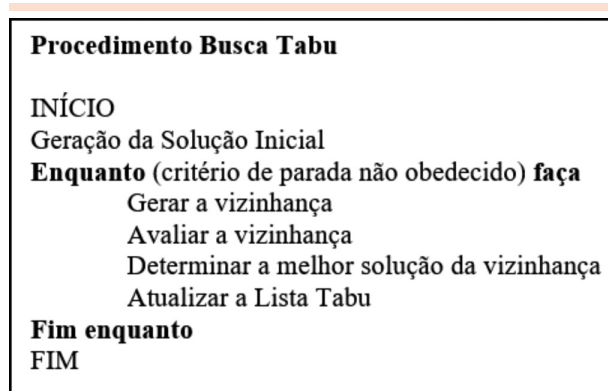


Figura 5: Procedimento da meta-heurística Busca Tabu
Fonte: Adaptado de Alves (2015).

3.6 Meta-heurística Iterated Local Search

A meta-heurística *Iterated Local Search* (ILS) é um método de busca local que explora o espaço de soluções por meio de perturbações em ótimos locais gerados ao decorrer da busca. Assim, considera inicialmente um ótimo local por um método de busca local. Na sequência, obtém uma solução intermediária por meio de uma perturbação na solução ótima local recém-visitada. O algoritmo possui o objetivo de utilizar ótimos locais como novas soluções de partida, ao invés de utilizar uma solução aleatória. Neste contexto, o ILS concentra sua busca em um conjunto menor de soluções, ou seja, apenas ótimos locais e não todo o espaço de busca, segundo Ferreira (2016).

A Figura 6 apresenta os procedimentos da meta-heurística ILS. O algoritmo inicia com um ótimo local e entra em um *loop* para encontrar melhores ótimos locais. Assim, utiliza a perturbação e a busca local; quando atende ao critério de aceitação atualiza a solução. O *loop* quando um critério de parada for satisfeito (Guersola, 2013).

Procedimento Iterated Local Search

INÍCIO

$s_0 \leftarrow$ Geração da Solução Inicial;

$s \leftarrow$ Busca Local (s_0);

enquanto (critério de parada não obedecido) **faça**

$s' \leftarrow$ Perturbação (s , histórico);

$s'' \leftarrow$ Busca Local (s');

$s \leftarrow$ Critério de aceitação (s , s'' , histórico);

fim-enquanto

FIM

Figura 6: Procedimentos da meta-heurística Iterated Local Search
Fonte: Adaptado de Guersola (2013).

3.7 Programa Brasileiro GHG Protocol

De acordo com FGVces (2014), o Programa GHG *Protocol* é uma ferramenta criada em 1998, nos Estados Unidos, pelo WRI – *World Resource Intitute* com intuito de compreender, mensurar e gerenciar emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Essa ferramenta é atualmente utilizada por empresas e governos ao redor do Mundo em inventários de GEE, uma vez que se adequa aos parâmetros do IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

No contexto nacional, o Programa foi instaurado em 2008 através de parceria do WRI, FGVces, Ministério do Meio Ambiente, Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável e Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável. Visto isso, FGVces (2014) declara que o Programa Brasileiro GHG *Protocol* tem diversos objetivos, tais como

enraizar uma cultura permanente de divulgação dos inventários de GEE, aqui no Brasil; meio científicos para a elaboração dos inventários de GEE; a capacitação e o engajamento das Empresas Membro; criar uma plataforma pública e transparente para promover a publicação dos inventários realizados; estabelecer um espaço público para o *benchmark* entre as organizações engajadas na iniciativa.

A Ferramenta de cálculo *GHG Protocol* é disponibilizada em arquivo do *software Microsoft Excel®*, via site do Programa Brasileiro *GHG Protocol*, e abrange escopos de emissões diretas e indiretas de GEE, conforme Figura 7.

A partir da Figura 7, mais especificamente, no Escopo 3, é disponibilizada seção de Emissões por deslocamento casa-trabalho, na qual é viabilizado o cálculo de emissões de GEE no deslocamento de funcionários em três opções: por tipo e ano de fabricação da frota de veículos, tipo de combustível ou por distância.

3.8 Legislação Trabalhista e o Transporte de Colaboradores

Segundo a Lei nº 7.418 de 16 de dezembro de 1985:

Art. 1º Fica instituído o vale-transporte, que o empregador, pessoa física ou jurídica, antecipará ao empregado para utilização efetiva em despesas de deslocamento residência-trabalho

e vice-versa, através do sistema de transporte coletivo público, urbano ou intermunicipal e/ou interestadual com características semelhantes aos urbanos, geridos diretamente ou mediante concessão ou permissão de linhas regulares e com tarifas fixadas pela autoridade competente, excluídos os serviços seletivos e os especiais. (...) Art. 4º - A concessão do benefício ora instituído implica a aquisição pelo empregador dos Vales-transportes necessários aos deslocamentos do trabalhador no percurso residência-trabalho e vice-versa, no serviço de transporte que melhor se adequar. (Brasil, 1985)

Isto posto, é determinado pela Lei que o empregador arcará com os custos de deslocamento do trabalhador no que exceder 6% de seu salário básico.

Além disso, a referida Lei também prevê a concessão de outros meios de transporte por parte do empregador “Art. 8º - Asseguram-se os benefícios desta Lei ao empregador que proporcionar, por meios próprios ou contratados, em veículos adequados ao transporte coletivo, o deslocamento integral de seus trabalhadores”. (Brasil, 1985). Logo, o serviço de transporte fretado contratado por empresas para a o deslocamento de seus colaboradores se enquadra no artigo supracitado.

Abas gerais	Introdução	Resumo	Fatores de emissão	Fatores variáveis	Aeroportos	Fatores de conversão	Menu de navegação	
	Combustão estacionária	Combustão móvel	Emissões fugitivas	Processos industriais	Agrícolas	Mudanças no uso do solo	Resíduos sólidos	Efluentes
Escopo 1								
Escopo 2	Compra de Energia Elétrica	Compra de Energia Térmica						
Escopo 3	Categorias de Escopo 3	Transporte & Distribuição (upstream)	Resíduos sólidos gerados na operação	Efluentes gerados na operação	Viagens a negócios	Deslocamento casa-trabalho	Transporte & Distribuição downstream	

Figura 7: Menu de Navegação Ferramenta GHG Protocol Versão 2017.4
 Fonte: Ferramenta GHG Protocol Versão 2017.4.

3.9 Trabalhos Correlatos

Existem diversos artigos referentes ao PCV, sendo que nesta seção são apresentados alguns deles. Souza e Villas (2015) apresentaram um Sistema de Transporte Inteligente baseado em comunicações inter-veículos, com o propósito de minimizar os congestionamentos em rodovias. A proposta visa contribuir para a redução do tempo de trajeto, consumo de combustível e emissão de CO₂.

Lin, Bian e Liu (2016) expuseram um algoritmo híbrido baseado nas meta-heurísticas BT e SA com uma estrutura de vizinhança dinâmica para melhorar a eficiência de busca e, assim, reduzir a aleatoriedade da vizinhança usualmente atribuída ao 2-opt. O algoritmo proposto e a estrutura de vizinhança apresentaram maior eficiência na maioria dos casos, em relação as técnicas clássicas ao serem aplicados em instâncias da literatura.

Pena, Carpenente e Amiana (2017) aplicaram os algoritmos meta-heurísticos, também baseados em BT e SA, nas atividades operacionais de uma cooperativa agrícola na Espanha, onde abordaram o PCV com *clusters* e *time Windows*. Os procedimentos foram adotados nas atividades regulares de planejamento da empresa.

Ferreira, Steiner e Guersola (2017) abordaram a otimização de um processo operacional de uma empresa de transportes rápidos, no município de Curitiba, PR. Os autores tinham como objetivo definir de forma otimizada os grupos de pontos de demanda a serem atendidos pelos veículos, através do PFL, e os seus itinerários dentro de cada grupo, pelo PCV. Os autores utilizaram as meta-heurísticas SA e BT, além de um algoritmo híbrido. A partir dos cenários apresentados, foi possível obter 39,7% de otimização.

Ezugwu, Adewumi e Frîncu (2017) propuseram um algoritmo híbrido baseado no *Symbiotic Organisms Search* (SOS) com o SA. O algoritmo SOS reproduz as estratégias de relacionamento

simbiótico dos organismos no ecossistema para garantir a sua sobrevivência.

Shi, Boudouh, Grunder e Wang (2018), apresentaram um problema de roteamento para assistência médica domiciliar, onde a modelagem considera a resolução de problemas de *delivery and pick-up* com viagens estocásticas e tempos de atendimento a domicílio. O problema foi aplicado um estudo de caso com o objetivo de disseminar a técnica.

Portanto pode-se verificar que poucos problemas de Otimização Combinatória, como os relatados anteriormente, podem ser resolvidos de forma exata. Isto porque o PCV é um problema classificado como *NP-hard*, ou seja, de difícil solução, pois o grau de dificuldade em resolvê-lo aumenta exponencialmente conforme o tamanho do problema. Neste contexto, a solução mais viável é o uso de algoritmos heurísticos e/ou meta-heurísticos. Eles em sua essência se aproximam, mas normalmente não alcançam a solução ótima, todavia o cálculo computacional é mais rápido, justificando a sua aplicação.

4 Metodologia

Como primeiro passo, foi definida a matriz das distâncias e a matriz dos tempos entre os diversos pontos de demanda da empresa XYZ com o auxílio do *Google Maps*. Desta forma, se tornou necessário consultar a relação que cada endereço possui com os demais. Esta importante ferramenta apresenta a melhor distância, a proposta de trajetória e o tempo estimado.

É válido relatar que não há relação entre o tempo para chegar ao percurso e a distância, tendo em vista as variações no tráfego, como semáforos, locais para estacionar, congestionamentos, conversões proibidas à esquerda, vias de sentido único, dentre outros mais. O Quadro 1 apresen-

Endereço	1	2	3	4	5	6	7	8	9	XYZ
1	0	25	31	28	29	31	22	33	33	29
2	24	0	6	14	15	16	18	22	23	30
3	26	8	0	9	10	11	14	18	19	13
4	29	16	16	0	1	2	4	9	9	4
5	31	16	16	3	0	1	4	8	8	19
6	32	19	18	6	6	0	2	7	7	18
7	31	20	21	10	9	7	0	5	5	16
8	26	24	23	13	12	11	11	0	1	11
9	26	24	23	13	12	12	12	3	0	11
XYZ	22	31	31	24	23	22	19	13	14	0

Quadro 1: Matriz dos tempos em minutos de percurso para o problema proposto

Fonte: Elaborado pelos autores com o uso do *Google Maps*.

ta os tempos e o Quadro 2 se refere às distâncias entre os 9 endereços (pontos de coleta/entrega) e a empresa XYZ.

Endereço	1	2	3	4	5	6	7	8	9	XYZ
1	0	16,8	18,1	18,8	19,2	20,1	21,2	24	24,4	25,1
2	16,7	0	1,2	5,1	5,5	6,4	7,5	10,4	10,7	18,1
3	17,4	1,8	0	3,8	4,2	5,1	6,1	9	9,3	5,9
4	19	5,7	4,9	0	0,4	1,3	2,3	5,2	5,6	2,1
5	19,8	6,2	5,4	1	0	0,9	1,9	4,8	5,2	13,1
6	21,1	7,3	6,5	2,4	2,1	0	1	3,9	4,3	12,2
7	20,1	7,8	7,7	3,7	3,4	2,2	0	2,9	5,2	11,2
8	25,8	11,2	10,4	7,3	6,1	5,6	3,8	0	0,4	8,3
9	25,4	11,4	10,6	7,5	6,2	5,8	4,1	0,8	0	7,9
XYZ	23,1	18,9	25,9	15,9	14,6	13,7	13	9,1	9,4	0

Quadro 2: Matriz das distâncias em quilômetros de percurso para o problema proposto

Fonte: Elaborado pelos autores com o uso do *Google Maps*.

O modelo matemático do PCV utilizado está de acordo com as equações/inequações de (1) a (5) apresentadas. Para o cálculo exato, foi realizada a modelagem no *software* LINGO 12.0 (*Language for Interactive General Optimizer*) e uma interface com o *Microsoft Excel*. Já no caso das heurísticas, foi utilizado o *software* MATLAB 13.0 e programado em sua linguagem própria.

O algoritmo BT considerou como solução inicial, a obtida por meio da aplicação da heurística *Savings* de C&W. Para a aplicação da BT

foram considerados os seguintes parâmetros: número de rodadas = 10; número de iterações = 100; tempo tabu = número de iterações; número de movimentos = 10, os movimentos consistem na troca de dois vértices aleatórios do roteiro.

Para o algoritmo ILS, também considerou-se como solução inicial a obtida por meio da aplicação do algoritmo dos *Savings* de C&W. Para a Perturbação foi utilizada a heurística *4-opt* ou *Double Bridge*. Na Busca Local foi utilizada a heurística *3-opt* (o procedimento *3-opt* e *4-opt* podem ser vistos em Lin e Kernighan (1973)). Como Critério de Aceitação utilizou-se a solução de menor custo. Também foi atribuído número de rodadas igual a 10 e número de iterações equivalente 100.

Aqui, tem-se o objetivo de apresentar três cenários, onde no Cenário 1 é realizada a comparação entre as diferentes técnicas com o roteiro utilizado pela indústria XYZ. O Cenário 2 difere por ter uma maior quantidade de passageiros (pontos de coleta e/ou entrega), conforme a proposta de expansão do transporte fretado. O Cenário 3, utilizando os resultados obtidos no Cenário 2, faz uso de uma ferramenta

com o objetivo de medir as emissões atmosféricas de dióxido de carbono, a fim de gerenciar as atividades de forma a minimizar seus efeitos nocivos, além de verificar uma forma factível de se realizar o transporte. Visto isso, a informação de distância total percorrida, obtida após a solução dos modelos matemáticos, será aplicada na ferramenta *GHG Protocol*, do inglês *Greenhouse Gases Protocol*, para obter informação das emissões atmosféricas de dióxido de carbono ligadas ao estudo.

5 Obtenção dos resultados

Foram desenvolvidos três cenários comparativos conforme descritos a seguir.

5.1 Cenário 1

A Tabela 4 apresenta, de forma resumida, o cenário atual e os resultados das técnicas utilizadas, mais especificamente, o modelo matemático do PCV, a heurística de C&W, as meta-heurísticas SA, BT e ILS. Todas as técnicas apresentam desempenho ótimo, visto a simplicidade do problema abordado, com um percurso de 58,4 quilômetros em 83 minutos. A representação gráfica pode ser visualizada na Figura 1.

Tabela 4: Programação otimizada para os roteiros (proposta com 9 pontos de demanda)

Técnica	Caminho	Tempo trajeto (min)	Custo (Km)
Atual	(XYZ - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - XYZ)	83	58,4
Exata	(XYZ - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - XYZ)	83	58,4
C&W	(XYZ - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - XYZ)	83	58,4
SA	(XYZ - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - XYZ)	83	58,4
BT	(XYZ - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - XYZ)	83	58,4
ILS	(XYZ - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - XYZ)	83	58,4

Fonte: Autores.

5.2 Cenário 2

Os resultados obtidos encontram-se sintetizados na Tabela 5, onde pode-se observar a técnica utilizada, a quantidade de iterações, o tempo computacional em segundos, o tempo percorrido, a quilometragem percorrida (custo), o erro percentual e a rota. O método exato levou 1:45:30s para apresentar a solução. Os erros percentuais das técnicas heurísticas foram de 0,4%, 2,1% e 4,5% para a BT e SA, ILS e *Savings* de C&W, respectivamente. Como referência para os cálculos foi utilizada a matriz de distâncias.

A Figura 8 apresenta as diferentes propostas de roteirização apresentadas na Tabela 5.

5.3 Cenário 3

Tendo em vista o aumento considerável do tempo para cumprimento da rota, na Tabela 6, de aproximadamente 3 horas, faz-se necessário identificar alternativas para redução desse tempo, a fim de proporcionar maior comodidade aos usuários e melhorar aproveitamento da frota em outras atividades.

Logo, aplicou-se o Modelo Matemático das p -Medianas, conforme equações/inequações de (6) a (11), no *software* LINGO 12.0, no qual foram adotados dois grupos ($p = 2$) de pontos de coleta/entrega, com objetivo de estabelecer percursos com menor tempo e distâncias possíveis.

Além disso, adotou-se restrição de 15 usuários por *cluster*, para que a rota atendida por um micro-ônibus com capacidade para 32 passageiros (que atende 26 passageiros) possa ser substituída por duas rotas alternativas, atendidas por duas vans com capacidade para 15 passageiros cada uma.

Solucionado o problema, verifica-se que as duas p -Medianas selecionadas estão localizadas nos endereços 6 e 14. Os resultados alcançando na roteirização para o primeiro e segundo *cluster* estão descritos na Tabela 7.

A *clusterização* viabiliza a redução do tempo de percurso, uma vez que foram analisados apenas os endereços denominados no processo de localização de facilidades. A representação, na Figura 9, mostra a rota para os endereços do primeiro e segundo *clusters* (rotas 1 e 2), com base no critério de menor distância total. Os cruzamentos se justificam, pois, foi utilizado o critério da menor distância real considerando as ruas a serem percorridas (que podem ser de sentido único, por exemplo)

Tabela 5: Resultados obtidos para os roteiros da indústria XYZ (25 pontos de demanda)

Técnica	It.	Tempo comp.(s)	Custo (Km)	Erro (%)	Rota
Exato	-	6330	74,65	-	XYZ - 12 - 19 - 21 - 20 - 3 - 4 - 6 - 5 - 24 - 23 - 22 - 25 - 9 - 8 - 2 - 18 - 14 - 1 - 17 - 15 - 16 - 10 - 13 - 11 - 7 - XYZ
C&W	-	0,2	78,15	4,7%	XYZ - 12 - 19 - 13 - 20 - 21 - 4 - 6 - 5 - 25 - 24 - 23 - 22 - 3 - 9 - 8 - 2 - 18 - 14 - 1 - 17 - 10 - 16 - 15 - 11 - 7 - XYZ
SA	100 it	0,2	74,95	0,4%	XYZ - 12 - 19 - 13 - 20 - 21 - 4 - 6 - 5 - 24 - 23 - 22 - 25 - 3 - 9 - 8 - 2 - 18 - 14 - 1 - 17 - 15 - 16 - 10 - 11 - 7 - XYZ
BT	100 it	0,2	74,95	0,4%	XYZ - 12 - 19 - 13 - 20 - 21 - 4 - 6 - 5 - 24 - 23 - 22 - 25 - 3 - 9 - 8 - 2 - 18 - 14 - 1 - 17 - 15 - 16 - 10 - 11 - 7 - XYZ
ILS	100 it	0,3	76,25	2,1%	XYZ - 12 - 19 - 13 - 20 - 21 - 4 - 6 - 5 - 25 - 22 - 23 - 24 - 3 - 9 - 8 - 2 - 18 - 14 - 1 - 17 - 10 - 16 - 15 - 11 - 7 - XYZ

Fonte: Autores.

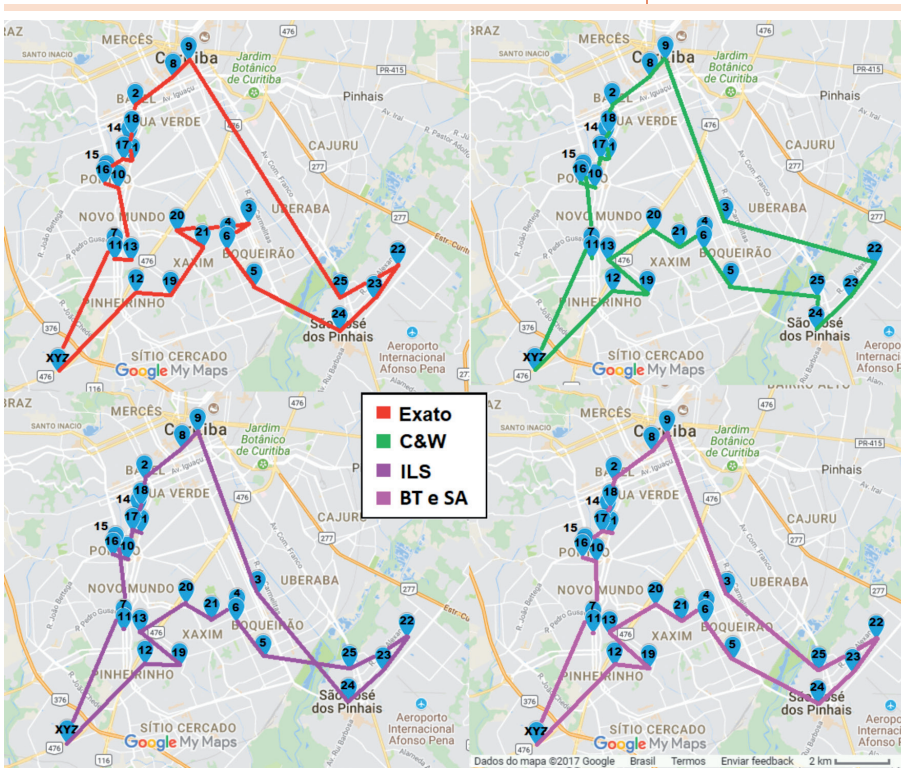


Figura 8: Obtenção das rotas otimizadas para a Indústria XYZ apresentadas na Tabela 5

Fonte: Autores com o auxílio do Google Maps.

e não a menor distância entre dois pontos cartesianos, usual pelos pesquisadores.

Vale destacar que, de acordo com Soleimani, Chaharlang e Ghaderi (2018), as emissões de GEE são preocupantes, em especial as de dióxido de carbono por ter consequência direta para a saúde humana. Nesse sentido, a roteirização de veículos vem sendo empregada não somente para redução de custos logísticos, mas também para a redução de emissões atmosféricas.

Conforme indica Lin, Choy, Ho, Chung, Lam (2014), três variáveis bási-

Tabela 6: Resultados obtidos para roteiros de coleta/entrega na indústria XYZ (25 pontos de demanda)

Condição	Critério	Técnica	Nº de usuários	Distância (Km)	Tempo (min)	Rota
Inicial	Distância e Tempo	Exato	11	58,4	83	XYZ - 1 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - XYZ
Cenário 2	Distância	Exato	26	74,65	179	XYZ - 12 - 19 - 21 - 20 - 3 - 4 - 6 - 5 - 24 - 23 - 22 - 25 - 9 - 8 - 2 - 18 - 14 - 1 - 17 - 15 - 16 - 10 - 13 - 11 - 7 - XYZ

Fonte: Autores.

Tabela 7: Resultados obtidos para roteiros de coleta/entrega do primeiro e segundo clusters

Condição	Técnica	Nº de usuários	Distância (Km)	Tempo (min)	Rota
Rota primeiro cluster	Exato	13	53,4	117	XYZ - 12 - 19 - 5 - 24 - 23 - 22 - 25 - 3 - 4 - 6 - 21 - 20 - 13 - XYZ
Rota segundo cluster	Exato	13	39,5	98	XYZ - 16 - 15 - 1 - 2 - 9 - 8 - 18 - 14 - 17 - 10 - 11 - 7 - XYZ

Fonte: Autores.

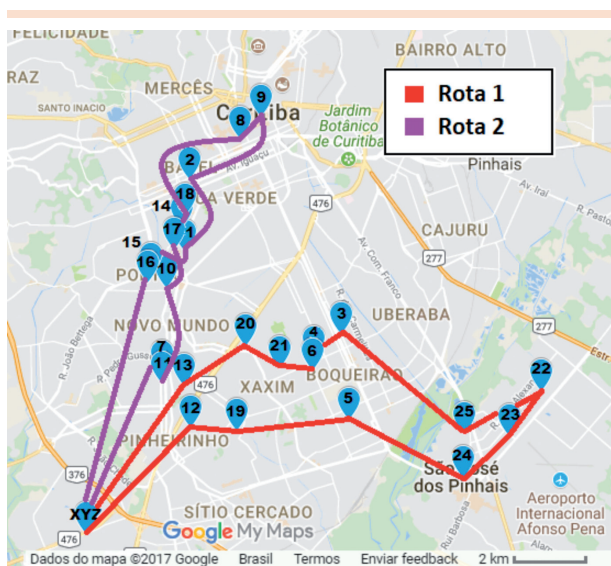


Figura 9: Representação da rota proposta nos pontos de coleta/entrega do primeiro e segundo clusters do trajeto para a Indústria XYZ

Fonte: Os autores com auxílio do Google Maps.

cas impactam as emissões de CO₂, o combustível utilizado, as configurações do motor da frota e a distância percorrida. Tendo em vista que o levantamento realizado pela indústria XYZ, para identificar os colaboradores interessados em usar o transporte fretado, não contemplava informações referentes ao tipo de veículo e de combustível, foi aplicada opção de cálculo por distância percorrida da ferramenta *GHG Protocol 2017.4*, a fim de determinar as emissões atmosféricas de dióxido de carbono aproximadas.

Para tanto, foram utilizadas as seguintes informações:

- a) distância total percorrida, obtida através da pesquisa e processo de roteirização;

- b) configurações dos veículos, conforme Tabela 8;
- c) informações cedidas pela empresa prestadora de serviço, quando se tratava de frota fretada e;
- d) informações inferidas para efeitos de cálculo, quando se tratava de veículo particular utilizado pelos colaboradores da indústria XYZ.

Tabela 8: Configurações de Veículos

Tipo de Frota	Ano	Número de Passageiros
Automóvel Flex a Gasolina	2016	5
Van a Diesel	2016	15
Micro-ônibus a Diesel	2016	32

Fonte: Autores.

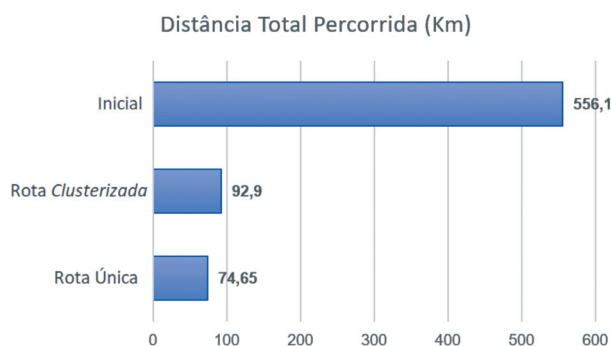
Uma vez conhecidas as informações elas foram aplicadas na ferramenta *GHG Protocol 2017.4* a fim de obter resultados para três condições: inicial, rota proposta e rota *clusterizada*. Logo, na condição inicial foi considerada a distância percorrida pelo micro-ônibus fretado, para atendimento de 11 usuários, somada a distância percorrida pelos colaboradores, interessados em utilizar o transporte fretado, mas que atualmente fazem uso de veículo particular para seu deslocamento de casa ao trabalho e do trabalho para casa. Já para a rota proposta, foi adotada distância percorrida pelo micro-ônibus fretado para o atendimento de 26 usuários. Enquanto isso, para rota *clusterizada*, foi considerado a soma da distância percorrida nas rotas dos *clusters* 1 e 2, cada uma delas atendida por uma van fretada. A Tabela 9 apresenta os resultados das emissões atmosféricas, no período de um ano, para as três condições indicadas acima.

Tabela 9: Emissões Atmosféricas Anual (tCO₂) no Deslocamento de Colaboradores

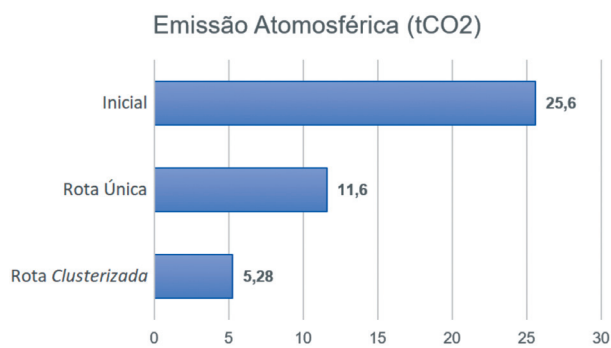
Condição	Distância Percorrida (Km) - Micro-ônibus	Distância Percorrida (Km) - Van	Distância Percorrida (Km) - Automóvel	Distância Total Percorrida (Km)	Emissão Atmosférica Anual (t CO ₂)
Inicial	58,4	-	497,7	556,1	25,60
Cenário 2	74,65	-	-	74,65	11,60
Rota do Cluster 1 e Rota do Cluster 2	-	92,9	-	92,9	5,28

Fonte: Autores.

Foi notório que o uso de transporte coletivo viabiliza a redução da distância total percorrida, de modo que contribui para a redução das emissões atmosféricas. Isto posto, vale ressaltar que em relação a condição inicial ambas as propostas, rota única e rota *clusterizada*, apresentam significativa otimização de distâncias, 86% e 83% respectivamente, bem como expressiva redução de emissão atmosférica de dióxido de carbono no período de um ano, 55% e 79% respectivamente, conforme Gráficos 1 e 2.

**Gráfico 1: Distância Total Percorrida (km)**

Fonte: Autores.

**Gráfico 2: Emissão Atmosférica Anual (tCO₂)**

Fonte: Autores.

Apesar de suas vantagens, a proposta de rota única, atendida por micro-ônibus com capacidade para 32 passageiros, eleva consideravelmente o tempo para cumprimento da rota, para aproximadamente 3 horas, fato esse que poderia desestimular os usuários do transporte fretado.

Visto isso, a solução alternativa indicada, após a *clusterização* dos pontos de demanda, é a adoção de duas rotas menores atendidas por vans, com capacidade de 15 passageiros cada uma. Dessa forma, o tempo para o cumprimento do percurso é reduzido, bem como é expressiva a melhora dos resultados de distância total percorrida e as emissões atmosféricas de dióxido de carbono.

Por conseguinte, vale destacar que apenas uma parcela de colaboradores faria uso do transporte coletivo fretado para seu deslocamento de casa para trabalho, uma vez que a aderência a esse tipo de transporte é voluntária.

6 Considerações finais e sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho, relacionado ao transporte de funcionários, que trata de um estudo e otimização de um caso real, buscou contribuir com a aplicação dos problemas que envolvem o uso de técnicas da área de PO.

No Cenário 1 foi realizada a comparação da prática adotada na empresa XYZ (cenário atual) com os resultados das técnicas utilizadas, mais



especificamente, o modelo matemático do PCV, as heurísticas de C&W, BT, SA e ILS. Todas as técnicas apresentam desempenho ótimo, visto a simplicidade do problema abordado.

No Cenário 2, os resultados obtidos por meio das heurísticas dos *Savings* de C&W, ILS, BT e SA foram satisfatórios visto a agilidade em retornar a solução com tempo computacional inferior a 1 segundo e boa proximidade do resultado ótimo com 4,5%, 2,1%, 0,4% e 0,4%, respectivamente.

No Cenário 3 foi utilizado o resultado do cenário 2, contemplando os 26 usuários (25 pontos de demanda), atendida por micro-ônibus em rota única, a qual resultou em redução de 86% da distância total percorrida e 55% das emissões de dióxido de carbono em relação a condição inicial. No entanto, essa solução apresentou tempo de percurso elevado, de aproximado de 3 horas, que motivou a busca por alternativa mais ágil. Logo, foi aplicado problema das *p*-Medianas (PLF), a fim de agrupar os pontos de demanda, seguido do PCV para estabelecer duas rotas, atendidas cada uma por uma van. Esse processo atenuou o tempo de percurso em ambas as rotas, assim como contribuiu, respectivamente, para a redução de 83% e 79% da distância total percorrida e das emissões de dióxido de carbono em relação a condição inicial.

Portanto, os objetivos propostos foram atendidos e as soluções apresentadas são satisfatórias, uma vez que os resultados alcançados promoveram a identificação de rotas ótimas em tempos viáveis, aliada a redução de emissões atmosféricas de dióxido de carbono. Assim, contribuindo para os objetivos de desenvolvimento sustentável propostos pela indústria XYZ e para a qualidade de vida dos colaboradores, tendo em vista a comodidade que o transporte fretado proporciona.

Com estes resultados, pode-se confirmar que este trabalho trata apenas de mais um *case* que comprova a viabilidade da PO no processo de tomada de decisões em empresas. O mais impor-

tante é que a metodologia empregada poderá ser utilizada aos mais diversos problemas, como em contextos organizacionais.

Como sugestão, além de ampliar ainda mais o uso do transporte fretado, poderiam ser analisadas as suas particularidades de coleta/entrega em pontos distintos. Adicionalmente, deixa-se como sugestão a resolução deste problema por meio de outras metodologias como, por exemplo, pelo Problema dos Múltiplos Caixeiros Viajantes (PMCV) e/ou outros procedimentos meta-heurísticos, tais como, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)*, *Variable Neighborhood Search (VNS)*, dentre muitas outras.

Referências

- Alves, R. (2015). *Modelo matemático para seleção de rotas de patrulhamento escolar: o caso da patrulha escolar de ponta grossa*. Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, Brasil.
- Belfiore, P., Fávero, L. P. (2013). *Pesquisa Operacional: para cursos de Engenharia*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Brasil. *Lei nº 7.418, de 16 de dezembro de 1985*. Institui o Vale-Transporte e dá outras providências. Brasília, DF, 1985. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7418.htm>. Acesso em: 07 Agosto 2017.
- Detro, S. P. (2013). *Otimização na localização e na capacidade de armazenamento de soja e milho para o estado do Paraná*. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.
- Ezugwu, A.E., Adewumi, A.O., Frincu, M.E. (2017). Simulated annealing based symbiotic organisms search optimization algorithm for traveling salesman problem. *Expert Systems With Applications*, 77, 189-210.
- Ferreira, J.C. (2016). *Abordagem heurística e meta-heurística na otimização do processo operacional de uma empresa de transportes rápidos*. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.
- Ferreira, J.C., Steiner, M.T.A., Guersola, M.S. (2017). A Vehicle Routing Problem Solved Through Some Metaheuristics Procedures: A Case Study. *IEEE Latin America Transaction*, 15(5), 943-949.

Fundação Getúlio Vargas – Centro De Estudos Em Sustentabilidade (2014). *Programa Brasileiro GHG Protocol*, 2014. Disponível em: <<http://www.ghgprotocolbrasil.com.br/>>. Acesso em: 7 de agosto de 2017.

Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operational Research*, 13(5), 533-549.

Gonçalves, S. M., Steiner, M. T. A., Souza, L. V. Metodologia para o PRV: um Estudo de Caso para a Distribuição de Água Mineral. In: Lopes, H. S., Rodrigues, L. C. A., Steiner, M. T. A. (2013). *Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional*. (1a ed.) Curitiba: Omnipax.

Guersola, M. S. (2013). *Otimização na distribuição física de produtos a granel: uma aplicação à distribuição de gás*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.

IPPUC. *Nosso Bairro Cidade Industrial de Curitiba*, 2015. Disponível em: <<http://www.ippuc.org.br/nossobairro/anexos/75->>. Acesso em: 10 Março 2017.

IZIDORO, C. *Métodos quantitativos*. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

Kirkpatrick, S., Gelatt Jr, C. D., Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598), 671–680.

Kripka, R. M. L., Kripka, M. Simulated annealing aplicado ao problema de alocação de salas de aula com deslocamentos mínimos. In: Lopes, H. S., Rodrigues, L. C. A., Steiner, M. T. A. (2013). *Meta-Heurísticas em Pesquisa Operacional*. (1a ed.) Curitiba: Omnipax.

Lin, Y., Bian, Z., Liu, X. (2016). Developing a dynamic neighborhood structure for an adaptive hybrid simulated annealing – tabu search algorithm to solve the symmetrical traveling salesman problem. *Applied Soft Computing*, 49, 937-952.

Lin, C., Choy, K.L., Ho, G.T.S., Chung, S.H., Lam, H.Y. (2014). Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41, 1118-1138.

Lin, S., Kernighan, B.W. (1973). An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling Salesman Problem. *Operational Research*.

Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H., Teller, E. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics*, 21(6), 1087.

Penna, A.C., Carpete, L., Amiama, C. (2017). Optimized forage harvest routes as solutions to a traveling salesman problem with clusters and time windows. *Biosystems Engineering*, 164, 110-123.

Shi, Y., Boudouh, T., Grunder, O., Wang, D. (2018). Modeling and solving simultaneous delivery and pick-up problem with stochastic travel and service times in home health care. *Expert Systems With Applications*, 102, 218-233.

SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO SOCIAL DO SENADO FEDERAL. Pioneira, Curitiba exige novas soluções! *Em discussão!*, Brasília, v. 4, n. 18, p. 45, Novembro 2013. Disponível em: <<https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream>>. Acesso em: 22 Março 2017.

Soleimani, H., Chaharlang, Y., Ghaderi, H. (2018). Collection and distribution of returned-remanufactured products in a vehicle routing problem with pickup and delivery considering sustainable and green criteria. *Journal of Cleaner Production*. 172, 960-970.

Souza, A. M., Villas, L. A. (2015). A new Solution based on Inter-Vehicle Communication to Reduce Traffic jam in Highway Environment. *IEEE Latin America Transactions*, 13(3),721-726.

ZILLI, P. K. (2011). *Análise de algoritmos heurísticos para problemas “ricos” de roteamento de veículos*. Tese de doutorado, Unicamp, Campinas, SP, Brasil.

Recebido em 13 dez. 2017 / aprovado em 6 abr. 2018

Para referenciar este texto

Silva, A. L., Ferreira, J. C., & Steiner, M. T. A. Abordagem de roteamento de veículos com procedimentos exatos e heurísticos sob uma óptica ambiental: um estudo de caso. *Exacta*, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 171-197. jan./mar. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.5585/ExactaEP.v17n1.8171>>

