

ARTIGO

Modelagem e otimização de rotas logísticas para transporte de embutidos

Cláudio Ferreira Felício, Rafael Fernandes Guidine & Bruno Dore Rodrigues¹

¹Faculdade Machado Sobrinho

Disponível *on-line* em <http://www.machadosobrinho.com.br/revista_online/index.php>

RESUMO: Problemas de roteirização de veículos são os mais usuais em empresas de logística e suas soluções tem alto impacto estratégico. Este artigo discorre sobre o uso de metodologias de pesquisa operacional como ferramenta de auxílio a análise e tomada de decisões corporativas. O objetivo deste artigo é ressaltar o importante papel da tecnologia de modelagem para a otimização e racionalização de recursos envolvidos em um sistema logístico complexo. O trabalho apresenta o processo de roteirização de veículos de uma distribuidora de alimentos embutidos do interior de Minas Gerais. Realizou-se uma pesquisa de campo aplicada, em que os parâmetros definidos para a geração de rotas reproduzem fielmente as condições reais de entregas da empresa. Utilizou-se na otimização o algoritmo simplex para resolver o problema típico de otimização de rotas com restrições. A partir dos resultados da otimização foi possível mensurar os impactos financeiros nos custos de transporte e encontrar o impacto dos benefícios em outras áreas da empresa. Os ganhos estratégicos com a otimização das rotas possibilitaram a empresa a reduzir os custos significativamente e alcançar um melhor nível de serviço no atendimento aos clientes.

Palavras-chave: Logística, otimização, roteamento, pesquisa operacional.

ABSTRACT: Vehicle routing problems are the most common in logistics and their solutions have a high strategic impact on the results. This article discusses the use of operational research methodologies as a tool to improve analysis and corporate decisions. The objective of this article is to highlight the important role of modelling in optimizing and rationalizing the resources involved in a complex logistics system. This paper presents the vehicle routing process of a food distributor in the interior of Minas Gerais. An applied field survey was carried out, in which the parameters defined for route generation accurately reproduce the actual conditions of the company's deliveries. In the optimization, the simplex algorithm was used to solve the typical problem of optimization of restricted routes. From the results of the optimization was possible to measure the financial impacts on transportation costs and to find the impact of the benefits in other areas of the company. The strategic gains with the optimization of the routes allowed the company to significantly reduce costs and reach a better level of service.

Key-words: Logistics, modelling, routing, operational research.

INTRODUÇÃO

O investimento em logística no Brasil, principalmente com transporte e armazenagem, é cerca de 15% do Produto Interno Bruto – PIB - aproximadamente R\$150 bilhões (CARVALHO, 2010). O valor é expressivo, mas considerado insuficiente para um país com dimensões continentais. Com isso, as organizações perdem competitividade no cenário global pelo alto custo logístico oriundo de problemas na infraestrutura de estradas, ferrovias, portos e aeroportos.

Atualmente as empresas buscam ofertar seus produtos e serviços de maneira mais rápida, barata e eficiente que seus concorrentes. Para isso, é necessária uma excelência na infraestrutura dos modais e softwares capazes de auxiliarem na otimização e racionalização dos recursos envolvidos em um sistema logístico complexo. A utilização de softwares é uma solução para

tratar problemas de entregas, possibilitando a otimização de rotas, redução de custos de produtos, aumento de margens financeiras, além de melhoria substancial no nível de serviço relacionado a distribuição.

O objetivo mais comum é minimizar o custo total incluindo combustível, pessoal e depreciação dos veículos. O uso de tecnologia avançada como softwares de roteirização oferece uma série de benefícios importantes para as operações de transporte em geral. A redução de distâncias é o foco primordial, pois melhores rotas conduzem a uma menor distância percorrida no total, reduzindo significativamente os custos. Além disso, há menor emissão de dióxido de carbono, visto que fazer o mesmo trabalho com menos viagens significa menos uso de combustível e menor emissão deste tipo de gás (GALVÃO, 1997).

De acordo com Galvão (1997), existem várias restrições a serem consideradas em problemas de roteamento, tais como: capacidade da frota, capacidade máxima dos veículos, janelas temporais relativas aos horários dos motoristas e clientes, velocidades médias conforme zonas geográficas e diversas outras. Segundo Bodin *et al.* (1983), para que a etapa da entrega seja realizada de forma eficiente, as organizações devem desenvolver o planejamento e a execução da atividade de transporte de forma racional. A programação deve ser feita de tal maneira que satisfaça os pedidos e, em tempo médio, diminua a distância da distribuição total. Segundo Bodin *et al.* (1983), dado um conjunto de entregas a serem cumpridas e um conjunto de caminhões disponíveis, o uso do software é o meio mais eficiente para programações robustas de descrição de rotas.

Dentre diversas empresas que fazem o roteamento de veículos, encontra-se a JP Alimentos, que lida com encaminhamento de veículos diariamente para diversos estados do país com um amplo mix de produtos. O presente trabalho consiste em um estudo aplicado feito nesta empresa, visto que as decisões acerca das rotas de entrega atualmente são feitas simplesmente usando a experiência adquirida pela equipe de logística ao longo do tempo. A roteirização não adequada na JP Alimentos gera prejuízos, como a elevação dos custos de entrega e a inevitável perda de competitividade. Portanto, este artigo busca soluções eficientes de roteamento de veículos para o caso concreto. O trabalho estrutura-se em seis tópicos principais mais o embasamento teórico, que discorre desde o processo de modelagem em si a exemplos reais que utilizam otimização.

REFERENCIAL TEÓRICO

O problema de roteamento de veículos, ou *Vehicle Routing Problem* (VRP), é uma área de extrema importância para os teóricos de pesquisa operacional, bem como muito útil para aplicações do mundo real. Pesquisas neste campo têm proporcionado avanços significativos na formulação de problemas, na elaboração e análise de algoritmos. Estima-se que um considerável percentual do valor da mercadoria que chega aos clientes é de exclusiva responsabilidade dos gastos obtidos através de sua distribuição. Este valor é estimado no intervalo de 10% a 15% do preço dos produtos (CARVALHO, 2010).

Considera-se problema de distribuição aqueles em que os veículos com base em uma instalação central (depósito) são obrigados a visitar durante um determinado período de tempo os clientes geograficamente dispersos, a fim de satisfazer as necessidades dos mesmos. O problema aparece em um grande número de situações práticas em matéria de distribuição de produtos e é conhecido pelo nome genérico: o problema de roteamento de veículos (VRP). O VRP também é conhecido na literatura como o “veículo de programação” (CLARKE e WRIGHT, 1964; GASKELL, 1967), “caminhão de expedição” (DANTZIG e RAMSER, 1959; KRÓLAK, FELTS e NELSON, 1972) ou simplesmente “problema de entrega” (HAYS, 1967), e aparece com frequência em situações não relacionadas com a entrega das mercadorias. Por exemplo, o recolhimento de correio a partir de caixas de correio ou moedas de telefone, rota de vendedor porta a porta e inspeção de manutenção preventiva (STERN e DROR, 1979). Esses exemplos são VRPs em que a operação de entrega pode ser uma coleta e/ou entrega ou nenhum dos dois, em que os requisitos do cliente e os veículos podem tomar várias formas, algumas das quais nem

mesmo são de natureza física. Dantzig & Ramser (1959) originalmente propuseram o VRP. Desde então, ele tem sido extensivamente estudado.

O VRP pode ser classificado em classes de acordo com suas características, conforme descrito na Tabela 01. A classificação dos tipos de VRP dá uma dimensão de sua grande versatilidade e aplicabilidade em modelos reais do dia a dia.

Tabela 01. Classificação dos VRPs.

	CARACTERÍSTICAS	OPÇÕES
1	Tamanho da frota	Um veículo Múltiplos veículos
2	Tipo da frota	Homogêneo Heterogêneo Veículo especial
3	Depósito de veículos	Único Múltiplo
4	Natureza da demanda	Determinística Estocástica
5	Natureza do produto	Homogênea Heterogênea
6	Rede subjacente	Unidirecional Multidirecional
7	Operações	Coletas Entregas Coletas e entregas em uma viagem única
8	Custos	Fixos Variáveis
9	Janela de tempo	Rígida Flexível
10	Horizonte	Período único Períodos múltiplos
11	Objetivos	Minimizar o tempo total de distribuição ou distância Minimizar a soma dos custos fixos e variáveis Minimizar o número de veículos requeridos Maximizar a função de utilidade baseado no serviço ou conveniência.

Fonte: Bodin *et al.* (1983).

As atividades do processo de modelagem podem ser resumidas da seguinte forma: inicia-se pela construção do modelo, seguido pela transformação do modelo conceitual em modelo computacional e por fim os testes experimentais (simulação propriamente dita) que buscam as melhores alternativas (CARVALHO, 2010). Segundo Bodin *et al.* (1983), o processo de modelagem é uma experimentação computacional, em que são utilizados modelos de um sistema real ou idealizado para o estudo de problemas reais de natureza complexa, com o objetivo de testar diferentes alternativas operacionais a fim de encontrar e propor melhores formas de operação que visem à otimização do sistema como um todo.

Para Carvalho (2010), construir um modelo que melhor represente o funcionamento do problema em estudo é uma das principais etapas do processo de simulação, pois exige, necessariamente, um conhecimento minucioso do cenário ou arranjo estudado. A etapa de modelagem é caracterizada por uma mistura de doses de empirismo com outras doses de técnicas. Mesmo com ferramentas muito poderosas, nenhuma ferramenta pode superar o poder criativo, mas potencializá-lo. O modelo nasce com uma natureza lógica, através de esquemas e representações gráficas. Em seguida, com o aporte tecnológico dado pela ferramenta computacional (programa de modelagem e simulação), o modelo lógico é transformado em um modelo computacional.

Na modelagem computacional utiliza-se uma série de ações coordenadamente planejadas para transformar o modelo lógico em um modelo operacional. De acordo com Carvalho (2010), tais ações, fundamentais no processo de modelagem e simulação, inicia-se com a coleta de dados e sua modelagem estatística. Após o tratamento desses dados é feita a programação, utilizando um software apropriado à natureza do problema. Enfim realiza-se a verificação e validação de dados. Desse modo, uma operação ou sistema é traduzido em termos de regras, ações e tempos de processo.

Após a construção e validação do modelo computacional, a fase experimental faz com que várias alternativas propostas sejam consideradas e testadas. É nessa fase que ocorrem as otimizações, em que são feitas análises a fim de avaliar o efeito de possíveis alterações antes que elas ocorram de fato. Isso implica uma otimização significativa de recursos, uma vez que os mesmos só serão investidos em propostas exaustivamente testadas e que comprovadamente tenham o retorno esperado (CARVALHO, 2010).

PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE

O problema do caixeiro viajante é um caso específico do problema de roteamento de veículos. Trata-se de um problema de otimização combinatória considerado de difícil resolução por diversos autores da área de pesquisa operacional e computação. O problema foi formulado pela primeira vez em 1930 por Karl Menger e é um dos problemas mais intensamente estudados na área de otimização. Ele é usado como *benchmark* para outros métodos de otimização. Mesmo que o problema seja computacionalmente difícil, um grande número de heurísticas e algoritmos são conhecidos na literatura, de modo que alguns casos com dezenas de milhares ou mesmo milhões de cidades podem ser resolvidos completamente com erros na ordem de 1%. Não existe na literatura uma heurística que garanta a otimalidade da solução final, mas sim soluções rápidas, de boa qualidade e com erros pequenos.

O problema do caixeiro viajante (PCV) descreve um vendedor que precisa visitar todos os seus clientes localizados em diferentes cidades da sua região. Ele procura encontrar a rota mais curta que garanta que todas as cidades foram visitadas. Ao fazer uma formulação matemática desses problemas, utiliza-se, na maioria das vezes, uma estrutura de rede. As cidades são chamadas então de nós, e as estradas que conectam as cidades são chamadas de arcos. Nilsson (1982) estabelece que o pressuposto básico no PCV é supor que o vendedor tem de retornar ao nó onde ele inicia a viagem. Este nó é geralmente referido como a cidade-base ou depósito. Para um tour fechado, qualquer nó pode ser selecionado como o nó de partida, mas, por razões práticas, o nó 1 é definido como sendo o nó inicial. O nó 1 é então a cidade-base ou depósito. Na figura 1, a cidade de partida é o depósito (*Depot*), onde i representa a cidade atual e j a cidade a ser visitada. A distância d_{X_i, Y_j} está associada com cada arco e representa a distância do nó X_i ao nó Y_j .

Para um PCV padrão há sempre uma solução viável e todos os nós são visitados. Existem sempre soluções alternativas, a rota pode ir em qualquer direção (custos são simétricos) e na rota ótima cada nó é visitado apenas uma vez.

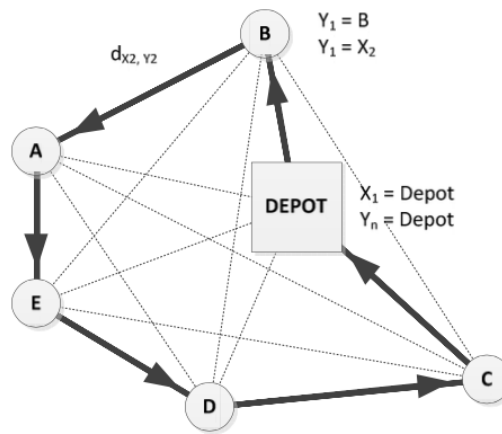


Figura 01. Ilustração de um PCV.

O PCV foi formulado como um programa linear inteiro (DANTZIG, 1963; TUCKER, 1960). Rotula-se as cidades com os números 1 a M e define-se:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o caminho passa pela cidade } i \rightarrow j \\ 0 & \text{se o caminho não passa pela cidade } i \rightarrow j \end{cases}$$

Dada a situação de que cada nó só pode sair uma seta, temos que adicionar restrições para que não ocorram subcircuitos, ou seja, evitar a formação de aglomerados de cidades sem ligação. O número de permutações para uma solução de "M" cidades é M! (M fatorial). O problema, portanto, é formulado da seguinte forma:

$$\min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m c_{ij} x_{ij}$$

talque $\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1$ para $i = 1, \dots, m$

$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1$ para $j = 1, \dots, m$

$\sum_{i \in K} \sum_{j \in K} x_{ij} \leq |K| - 1$ para todo i, j

$x_{ij} = 0$ ou 1 para todo i, j

Onde:

- *K é um subconjunto não vazio das cidades 1, ..., M;
- *O custo c_{ij} pode ser diferente do custo c_{ji} .

Segundo Bodin *et al.* (1983), heurísticas de construção de rotas para o Problema do Caixeiro Viajante são algoritmos que geram um circuito viável partindo de conjunto inicial de nós e modificando esse conjunto a cada iteração, utilizando algum critério de escolha. Este processo busca boas soluções a um custo computacional razoável, porém, sem ser capaz de garantir otimalidade ou até, em vários casos, de estabelecer quão perto de uma dada solução viável esta dada solução ótima. Inicialmente as rotas serão calculadas utilizando as seguintes técnicas de construção de rotas (CUNHA e BONASSER, 2002):

- *Procedimento do vizinho mais próximo;
- *Inserção do mais próximo;
- *Inserção do mais distante;
- *Inserção mais rápida.

Existem ainda outros procedimentos de construção de rotas que podem ser citados, tais

como Inserção do Mais Barato, Inserção Arbitrária, Cobertura Convexa, Inserção do Maior Ângulo e outros descritos detalhadamente em Bodin *et al.*, (1983).

METODOLOGIA

ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS EM UMA EMPRESA DE EMBUTIDOS

A JP Tripas & Alimentos Ltda é uma empresa que distribui e representa diversos produtos para fabricação de embutidos e similares, como para produção de presuntos, linguiças, salames e salsichas. A companhia possui cerca de 2000 clientes ativos, distribuídos majoritariamente nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e Espírito Santo. No seu corpo técnico conta com mais de 50 colaboradores diretos e possui frota própria para entregas dos produtos. A empresa realiza suas próprias entregas, ainda que os custos sejam altos, para manter o alto padrão de qualidade e satisfatório relacionamento com os clientes.

A empresa objeto de estudo possui um setor de logística que faz a programação de rotas de veículos semanalmente. A frota total é composta por onze veículos, entre caminhões de médio porte e carros de pequeno porte. Cada entregador rotineiramente faz as entregas de segunda-feira à quinta-feira da mesma semana. Portanto, na segunda-feira ele começa a viagem a partir da matriz da empresa em Matias Barbosa/MG, passa por todas as cidades em que possui clientes e por fim volta à matriz. Como vários parâmetros não são considerados de forma dinâmica no processo e as decisões acerca das rotas de entrega são feitas simplesmente usando a experiência adquirida pela equipe de logística, verificou-se que a roteirização de veículos da companhia possui um grande potencial de melhorias para a empresa.

O problema de programação de veículos a ser estudado neste trabalho se caracteriza como o de programação de veículos com restrições de comprimento de caminho, de acordo com Pelizaro (2000). Este problema considera restrições de distância percorrida pelo veículo antes de voltar para o depósito único. Esta restrição é usualmente encontrada na prática de diversas transportadoras para redução de consumo de combustível, mão de obra, manutenção, entre outras. A função objetivo busca minimizar os custos de transporte ao reduzir o número de caminhos ou trajetos realizados.

Neste projeto, os parâmetros definidos para a geração de rotas otimizadas reproduzem fielmente as condições reais de cenários da empresa. Para tanto, a JP Alimentos participou do levantamento e elaboração do trabalho, fornecendo dados quantitativos históricos e indicando possíveis alterações na configuração dos cenários de entregas. Assim, são geradas diversas rotas otimizadas, sendo que em cada uma delas os parâmetros são diferentes, buscando refletir situações de decisão ou procedimentos operacionais reais da empresa.

Em posse do banco de dados da empresa, as informações de entregas foram exportadas para o software Microsoft Excel e procede-se a modelagem computacional usando o pacote de otimização Solver.

O presente estudo apresentou um volume de dados superior ao que o Solver pode processar, por isso instalou-se o plug-in Premium Solver Platform para lidar com grande número de variáveis e restrições. Para chegar às soluções ótimas, o Premium Solver Platform trabalha com algoritmo genético.

DADOS DO PROBLEMA

Objetivando uma maior flexibilidade na análise de dados, escolheu-se trabalhar neste estudo apenas com dois caminhões da frota. As entregas normalmente são feitas para diversos estados da região sudeste do Brasil, no entanto, foca-se aqui majoritariamente nas cidades do sul de Minas Gerais e região norte de São Paulo, dada a maior complexidade de rotas.

Foram selecionadas quatro rotas típicas de entregas feitas por entregadores em 2016, as quais segundo a empresa apresentam mais complexidade e um maior volume de negociações. A relação de cidades englobadas na análise está demonstrada na tabela 02.

Tabela 02. Relação de cidades por rota.

ROTA	1	2	3	4
VEÍCULO	M. BENZ ATEGO 1719	M. BENZ ATEGO 1719	M. BENZ ACCELO 815	M. BENZ ACCELO 815
1	Arcos	Cambuquira	Amparo	Alfenas
2	Bom Despacho	Carmo da Cachoeira	Andradas	Alterosa
3	Cachoeira de Minas	Divinópolis	Bom Jesus dos Perdões	Aparecida
4	Campo Belo	Elói Mendes	Borda da Mata	Areado
5	Conceição dos Ouros	Itaúna	Bragança Paulista	Bandeira do Sul
6	Cristina	Lavras	Caldas	Botelhos
7	Cruzeiro	Mateus Leme	Cambui	Cabo Verde
8	Formiga	Matias Barbosa	Córrego do Bom Jesus	Caçapava
9	Itajubá	Nepomuceno	Espirito Santo do Pinhal	Cachoeira Paulista
10	Itamonte	Pará de Minas	Extrema	Campestre
11	Itanhandu	Paraguaçu	Heliodora	Canas
12	Itapeçerica	Perdões	Ibitiura de Minas	Caraguatatuba
13	Maria da Fé	Pitangui	Inconfidentes	Carvalhópolis
14	Matias Barbosa	Santana da Vargem	Ipuiuna	Guaranésia
15	Moema	Três Corações	Lambari	Guaratinguetá
16	Oliveira	Três Pontas	Matias Barbosa	Guaxupé
17	Paraisópolis	Varginha	Monte Alegre do Sul	Itatiaia
18	Passa Quatro	-	Monte Sião	Jacarei
19	Pedralva	-	Nazaré Paulista	Lorena
20	Piranguinho	-	Ouro Fino	Machado
21	Pouso Alegre	-	Pinhalzinho	Matias Barbosa
22	Santana do Jacaré	-	Piracaia	Mogi das Cruzes
23	Santo Antônio do Monte	-	Poço de Caldas	Monte Belo
24	São Francisco de Paula	-	Santa Rita de Caldas	Muzambinho
25	São Lourenço	-	Santo Antônio do Jardim	Paraibuna
26	-	-	Vargem	Pindamonhangaba
27	-	-	-	Poço Fundo
28	-	-	-	São José dos Campos
29	-	-	-	São Pedro da União
30	-	-	-	Taubaté
TOTAL	25	17	26	30

Fonte: JP Tripas & Alimentos Ltda.

O problema visa a minimização da distância total percorrida, isto é, o número total de quilômetros rodados nas rotas especificadas. Em alguns casos, transportadoras podem até preferir o critério de tempo mínimo, mas tal cenário não será abordado neste estudo. Em ambos os casos, porém, é muito difícil obter dados precisos para a matriz de entrada de coeficientes. Usualmente os sistemas onlines de mapas não demonstram distâncias rodoviárias com precisão, então divergências ocorrem de acordo com a fonte utilizada. As matrizes de distâncias foram elaboradas entre o ponto de partida (Matias Barbosa/MG) e todas as outras cidades, baseando-se no website *Google Maps*. Importante ressaltar que os deslocamentos urbanos para realizar entregas são consideravelmente menores que as distâncias rodoviárias, então a matriz traz

exclusivamente distâncias rodoviárias para a otimização. Sempre as distâncias mais curtas foram selecionadas nos trajetos entre as cidades, evitando, assim, deslocamentos desnecessários.

Quanto a análise financeira do transporte, as Gerências de Manutenção e Compras levantaram os principais dados de custos junto a fornecedores habituais de autopeças e combustível. As informações relevantes recolhidas foram: dados do caminhão, impostos, seguros, combustível, óleo, pneus, salário de motoristas, filtros, peças e manutenção em geral.

OTIMIZAÇÃO DAS ROTAS

Após descrever e desenvolver o modelo de otimização utilizando um algoritmo evolutivo, que reduz significativamente o número de iterações necessárias para resolver um problema e também melhora muito a probabilidade de encontrar a solução exata, chegou aos resultados apresentados na Tabela 03.

Tabela 03. Quantitativo de distâncias totais entre rotas.

ROTA	ROTA ATUAL (km)	ROTA OTIMIZADA (km)	DIFERENÇA (km)
01	1651	1605	46
02	1369	1271	98
03	1578	1405	173
04	1825	1745	80
TOTAL	6423	6025	398

As quatro diferentes rotas correntes foram melhoradas após o uso do software de otimização. As demandas das rotas 1, 2, 3 e 4 podem ser plenamente atendidas se os veículos utilizarem novas rotas com 46, 98, 173 e 80 km a menos, respectivamente. A seguir temos o detalhamento dos resultados e ganhos por rota.

1. ROTA 01

A rota 01 atual possui uma distância total de 1651 km e a rota otimizada possui 1605 km, ou seja, há uma redução de 46 km. A otimização trouxe mudanças de trajeto a partir da cidade de São Francisco de Paula/MG, cidade que ficava na terceira posição e posteriormente passou para a décima primeira no trajeto. Devido a tal mudança, cidades originalmente entre Itapecerica/MG e Santana do Jacaré/MG se deslocaram para frente no trajeto. O conjunto de cidades entre Santana do Jacaré/MG e Cruzeiro/MG não sofreram alteração na ordem de entrega. As figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, a sequência de cidades para o trajeto atual e otimizado da rota 01, junto com um mapa ilustrativo.

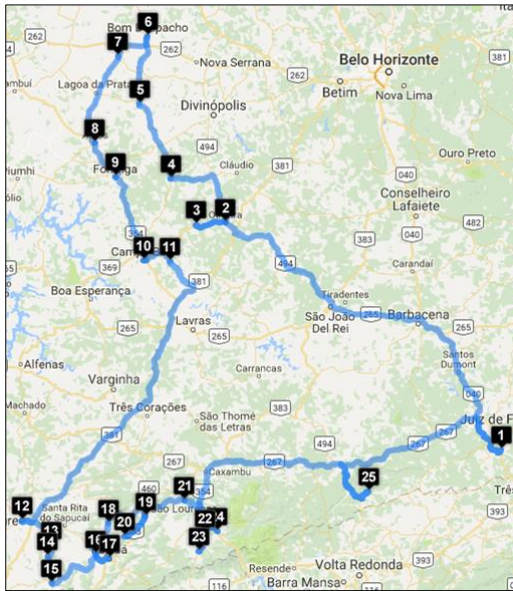


Figura 3. Rota 01 atual.

- | | | | |
|----|------------------------|----|----------------|
| 1 | Matias Barbosa | 16 | Piranguinho |
| 2 | Oliveira | 17 | Pedralva |
| 3 | Itapecerica | 18 | Itajubá |
| 4 | Santo Antônio do Monte | 19 | Maria da Fé |
| 5 | Bom Despacho | 20 | Cristina |
| 6 | Moema | 21 | São Lourenço |
| 7 | Arcos | 22 | Itamonte |
| 8 | Formiga | 23 | Itanhandu |
| 9 | Campo Belo | 24 | Passa Quatro |
| 10 | Santana do Jacaré | 25 | Cruzeiro |
| 11 | São Francisco de Paula | 26 | Matias Barbosa |
| 12 | Pouso Alegre | | |
| 13 | Cachoeira de Minas | | |
| 14 | Conceição dos Ouros | | |
| 15 | Paraisópolis | | |

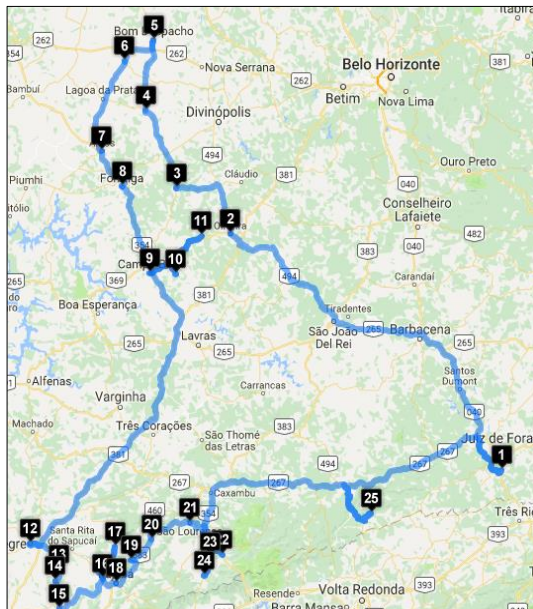


Figura 4. Rota 01 otimizada.

- | | | | |
|----|------------------------|----|----------------|
| 1 | Matias Barbosa | 16 | Piranguinho |
| 2 | Oliveira | 17 | Itajubá |
| 3 | São Francisco de Paula | 18 | Pedralva |
| 4 | Itapecerica | 19 | Cristina |
| 5 | Santo Antônio do Monte | 20 | Maria da Fé |
| 6 | Bom Despacho | 21 | São Lourenço |
| 7 | Moema | 22 | Itanhandu |
| 8 | Arcos | 23 | Passa Quatro |
| 9 | Formiga | 24 | Itamonte |
| 10 | Campo Belo | 25 | Cruzeiro |
| 11 | Santana do Jacaré | 26 | Matias Barbosa |
| 12 | Pouso Alegre | | |
| 13 | Cachoeira de Minas | | |
| 14 | Conceição dos Ouros | | |
| 15 | Paraisópolis | | |

2. ROTA 02

A rota 02 atual percorre 1369 km e a rota otimizada passa por 1271 km, uma minimização de 98 km. A mudança no trajeto acontece a partir de Mateus Leme/MG, cidade que aparecia na décima quinta posição da lista e, posteriormente à otimização, passou a figurar na segunda posição. Nota-se comparativamente que o sentido do ciclo feito pelo veículo muda completamente. Antes, cidades mais próximas a Belo Horizonte/MG como Pitangui/MG, décima sétima na rota atual, passa a ser a quinta a ser atendida, assim como outras que também sofreram alterações no sequenciamento. As figuras 5 e 6 detalham o trajeto atual e otimizado da rota 02, junto com o mapa ilustrativo.

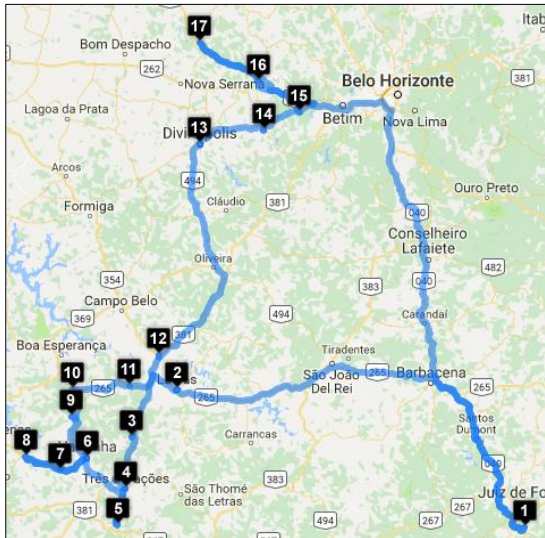


Figura 5. Rota 02 atual.

- | | | | |
|----|--------------------|----|----------------|
| 1 | Matias Barbosa | 14 | Itaúna |
| 2 | Lavras | 15 | Mateus Leme |
| 3 | Carmo da Cachoeira | 16 | Pará de Minas |
| 4 | Três Corações | 17 | Pitangui |
| 5 | Cambuquira | 18 | Matias Barbosa |
| 6 | Varginha | | |
| 7 | Elói Mendes | | |
| 8 | Paraguaçu | | |
| 9 | Três Pontas | | |
| 10 | Santana da Vargem | | |
| 11 | Nepomuceno | | |
| 12 | Perdões | | |
| 13 | Divinópolis | | |

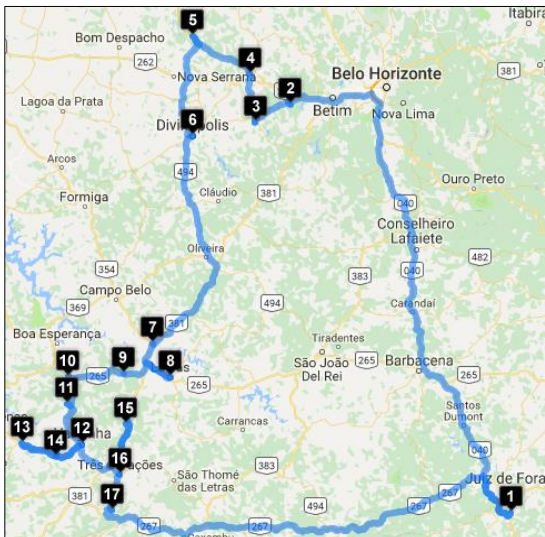


Figura 6. Rota 02 otimizada.

- | | | | |
|----|-------------------|----|--------------------|
| 1 | Matias Barbosa | 14 | Elói Mendes |
| 2 | Mateus Leme | 15 | Carmo da Cachoeira |
| 3 | Itaúna | 16 | Três Corações |
| 4 | Pará de Minas | 17 | Cambuquira |
| 5 | Pitangui | 18 | Matias Barbosa |
| 6 | Divinópolis | | |
| 7 | Perdões | | |
| 8 | Lavras | | |
| 9 | Nepomuceno | | |
| 10 | Santana da Vargem | | |
| 11 | Três Pontas | | |
| 12 | Varginha | | |
| 13 | Paraguaçu | | |

3. ROTA 03

A rota 03 percorre uma distância de 1578 km atualmente e a rota otimizada percorre 1405 km, representando uma diferença substancial de 173 km. Tal diferença é a maior entre as quatro rotas analisadas. A mudança de trajeto inicia-se a partir de Cambuí/MG, cidade que figurava na décima sexta posição e passou a ficar na segunda colocação. Devido a tal mudança, as cidades seguintes a esta sofreram mudanças de sequenciamento e o retorno final para Matias Barbosa/MG utiliza a BR-267 em vez da BR-116 e BR-393. As figuras 7 e 8 representam o trajeto atual e otimizado da rota 03.

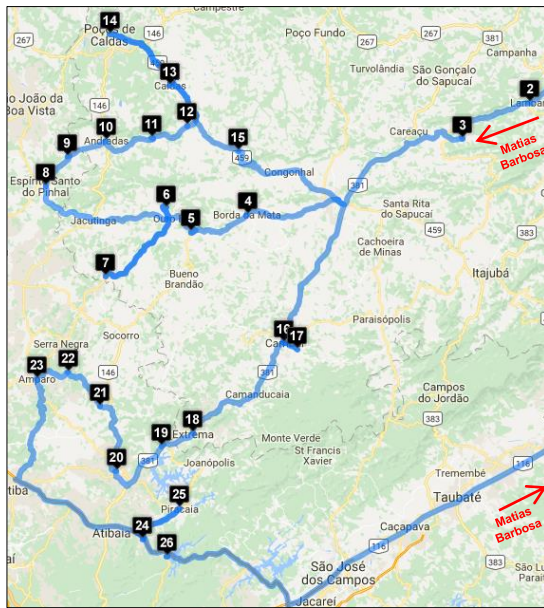


Figura 7. Rota 03 atual.

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| 1 Matias Barbosa | 15 Ipuiuna |
| 2 Lambari | 16 Cambuí |
| 3 Heliadora | 17 Córrego do Bom Jesus |
| 4 Borda da Mata | 18 Extrema |
| 5 Inconfidentes | 19 Vargem |
| 6 Ouro Fino | 20 Bragança Paulista |
| 7 Monte Sião | 21 Pinhalzinho |
| 8 Santo Antônio do Jardim | 22 Monte Alegre do Sul |
| 9 Espírito Santo do Pinhal | 23 Amparo |
| 10 Andradas | 24 Bom Jesus dos Perdões |
| 11 Ibitiura de Minas | 25 Piracaia |
| 12 Santa Rita de Caldas | 26 Nazaré Paulista |
| 13 Caldas | 27 Matias Barbosa |
| 14 Poço de Caldas | |

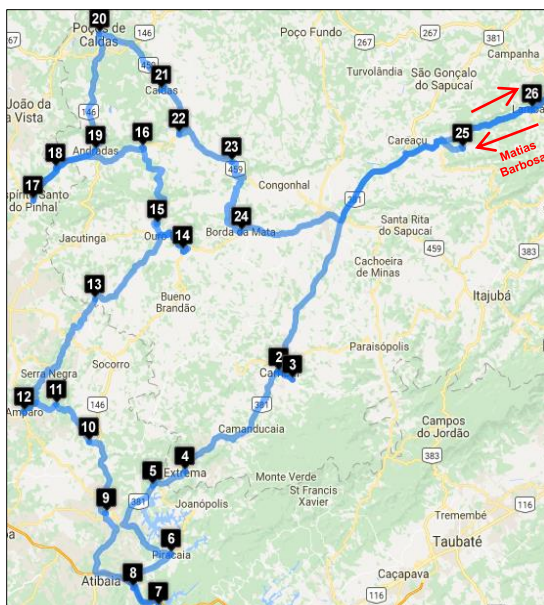


Figura 8. Rota 03 otimizada.

- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| 1 Matias Barbosa | 15 Ouro Fino |
| 2 Cambuí | 16 Ibitiura de Minas |
| 3 Córrego do Bom Jesus | 17 Espírito Santo do Pinhal |
| 4 Extrema | 18 Santo Antônio do Jardim |
| 5 Vargem | 19 Andradas |
| 6 Piracaia | 20 Poço de Caldas |
| 7 Nazaré Paulista | 21 Caldas |
| 8 Bom Jesus dos Perdões | 22 Santa Rita de Caldas |
| 9 Bragança Paulista | 23 Ipuiuna |
| 10 Pinhalzinho | 24 Borda da Mata |
| 11 Monte Alegre do Sul | 25 Heliadora |
| 12 Amparo | 26 Lambari |
| 13 Monte Sião | 27 Matias Barbosa |
| 14 Inconfidentes | |

4. ROTA 04

A rota 04 percorre no trajeto atual 1825 km, enquanto o trajeto otimizado possui 1745 km, diferença de 80km. Esta é a terceira melhor otimização de rotas, justificada pela mudança a partir da cidade de Carvalhópolis/MG, que figurava na décima quinta posição e passou a ficar na segunda posteriormente. Nesta rota não houve alterações de trajeto de Mogi das Cruzes/SP até o retorno para o depósito da empresa em Matias Barbosa/MG. As figuras 9 e 10 mostram a rota 04 com seu trajeto atual e otimizado, respectivamente.

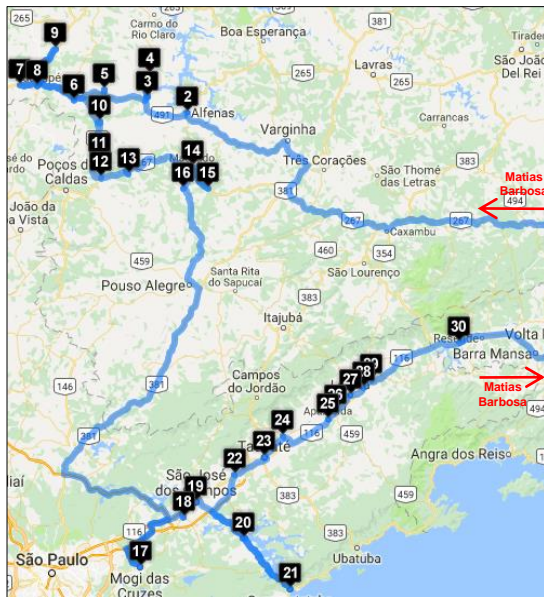


Figura 9. Rota 04 atual.

- | | |
|----------------------|------------------------|
| 1 Matias Barbosa | 17 Mogi das Cruzes |
| 2 Alfenas | 18 Jacaré |
| 3 Areado | 19 São José dos Campos |
| 4 Alterosa | 20 Paraibuna |
| 5 Monte Belo | 21 Caraguatatuba |
| 6 Muzambinho | 22 Caçapava |
| 7 Guaraniésia | 23 Taubaté |
| 8 Guaxupé | 24 Pindamonhangaba |
| 9 São Pedro da União | 25 Aparecida |
| 10 Cabo Verde | 26 Guaratinguetá |
| 11 Botelhos | 27 Lorena |
| 12 Bandeira do Sul | 28 Canas |
| 13 Campestre | 29 Cachoeira Paulista |
| 14 Machado | 30 Itatiaia - RJ |
| 15 Carvalhópolis | 31 Matias Barbosa |
| 16 Poço Fundo | |

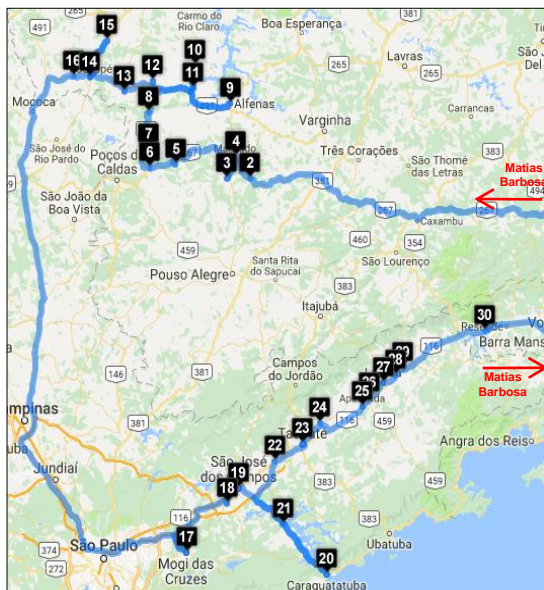


Figura 10. Rota 04 otimizada.

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1 Matias Barbosa | 17 Mogi das Cruzes |
| 2 Carvalhópolis | 18 Jacaré |
| 3 Poço Fundo | 19 São José dos Campos |
| 4 Machado | 20 Caraguatatuba |
| 5 Campestre | 21 Paraibuna |
| 6 Bandeira do Sul | 22 Caçapava |
| 7 Botelhos | 23 Taubaté |
| 8 Cabo Verde | 24 Pindamonhangaba |
| 9 Alfenas | 25 Aparecida |
| 10 Alterosa | 26 Guaratinguetá |
| 11 Areado | 27 Lorena |
| 12 Monte Belo | 28 Canas |
| 13 Muzambinho | 29 Cachoeira Paulista |
| 14 Guaxupé | 30 Itatiaia |
| 15 São Pedro da União | 31 Matias Barbosa |
| 16 Guaraniésia | |

ANÁLISE FINANCEIRA

A logística eficiente pode impactar positivamente as finanças de uma organização, gerando valor ao cliente e consequentemente maximizando lucros e reduzindo custos. Portanto, dadas as muitas variáveis que são impactadas, verificou-se os ganhos reais com a otimização de rotas na empresa em estudo.

Visando promover uma análise quantitativa de ganhos, levantou-se que o custo por quilômetro dos veículos M. Benz 1719 e M. Benz 815 são, respectivamente, R\$1,45 e R\$1,02. Considerou-se uma velocidade média em todos os trechos de 80km/h, seguindo dados históricos da empresa. A Tabela 4 apresenta os custos médios de transporte por quilômetro dos dois veículos da frota que realizam as rotas em estudo.

Tabela 4. Custos médios de transporte de veículos da frota.

CUSTOS	M.BENZ 1719	M.BENZ 815
Combustível / km	R\$0,80	R\$0,55
Pneu / km	R\$0,30	R\$0,16
Salário / km	R\$0,30	R\$0,27
Óleo / km	R\$0,03	R\$0,03
Outros / km	R\$0,03	R\$0,02
CUSTO TOTAL / km	R\$1,45	R\$1,02

Por serem feitas quinzenalmente, cada rota se repete 24 vezes no ano. Assim, os dados mostram que pode-se chegar a uma redução total nos custos de entrega de R\$934,87 por mês e R\$11.218,46 por ano. Tal economia financeira é relativa a dois caminhões de uma frota total de onze veículos, ou seja, os ganhos para a empresa tendem a ser superiores caso todas as rotas passem por um estudo de otimização. Uma análise objetiva mostra que, seguindo o mesmo padrão de ganhos, a empresa pode chegar a uma redução média aproximada de R\$61.701,53 por ano. A tabela 5 mostra a redução de custos médios de cada rota.

Tabela 5. Redução dos custos de transporte.

ROTA	REDUÇÃO MENSAL	REDUÇÃO ANUAL
01	R\$133,92	R\$1.607,09
02	R\$283,47	R\$3.401,62
03	R\$353,76	R\$4.245,16
04	R\$163,72	R\$1.964,58
TOTAL	R\$934,87	R\$11.218,46

Ganhos qualitativos também devem ser destacados. Segundo Galvão (1997), motoristas que diminuem sua jornada têm ganhos na saúde física e mental, pois ao dirigirem uma distância menor apresentam menos fadiga. Isso implica mais satisfação, mais segurança, menos acidentes e menor gasto com a saúde do colaborador. Neste caso, a otimização de distâncias leva a uma redução média de 9,9 horas dirigidas mensalmente e 119,3 horas anualmente. Para completar, haverá também uma menor emissão de dióxido de carbono no ambiente, pois os veículos visitarão as mesmas cidades com menos uso de combustível.

CONCLUSÃO

O problema de otimização de rotas tem sido há décadas um importante tópico de pesquisa na área de pesquisa operacional e este artigo ilustra uma abordagem de solução eficiente para uma aplicação real do problema. O artigo demonstra a importância e os benefícios de se fazer a otimização de rotas logísticas através de uma programação adequada. A JP Tripas & Alimentos Ltda realiza entregas semanais para seus clientes no sudeste do país e verificou-se reduções de custos substanciais. Como exemplo, nas quatro rotas de entrega para o sul de Minas Gerais e norte de São Paulo foram analisadas e chegou-se à conclusão que a programação otimizada de entregas economizaria 398 km em distâncias rodoviárias quinzenalmente, o que representa 119,3 horas ao volante por ano. Isso equivale a uma redução mensal de custo com transporte de R\$934,87 e anual de R\$11.218,46. Ganhos estratégicos são conseqüentemente obtidos como esses resultados, como a diminuição de frota, flexibilidade de mão de obra e serviços de manutenção, além da facilidade em simular planos futuros e cenários hipotéticos com rapidez e eficiência. Por fim, há maior nível de serviço, pois os ganhos inerentes permitem acomodar exigências mais complexas de clientes.

Durante a análise de dados deste trabalho não houve ponderações quanto a restrições de janelas de tempo e precedência de tarefas, pois neste caso o problema deveria ser analisado como um combinado de roteirização e programação de frota. Além disso, procedimentos operacionais reais são influenciados por situações adversas, como rodovias interditadas, acidentes, manutenção não programada, atrasos, mal tempo e custo de eventuais pedágios rodoviários. Clientes também podem fazer pedidos urgentes que exigem uma entrega preferencial num determinado período de tempo.

REFERÊNCIAS

- BODIN, L. D., GOLDEN, B., ASSAD, A., BALL, M., **Routing and Scheduling of Vehicle and Crews: The State of the Art.** Computers and Operations Research, v. 10, n. 2, p.63-211, 1983.
- CARVALHO, L. S., **Modelagem e Simulação: Poderosa Ferramenta para a Otimização de Operações Logísticas.** Site da Logística, Bahia, 2010. Disponível em: <http://www.sitedalogistica.com.br/news>, Acessado em 17 de março de 2016.
- CLARKE, G.; WRIGHT, J.W., **Scheduling of Vehicles from A Central Depot to a Number of Delivery Points.** Operations Research, Vol. 12, p. 568-581, 1964.
- CUNHA, C. B.; BONASSER, U. O.; ABRAHÃO, F. T. M. **Experimentos computacionais com heurísticas de melhorias para o problema do caixeiro viajante.** São Paulo: ANPET, 2002. Acessado em 20 de agosto de 2016: www.ptr.poli.usp.br/ptr/docentes/cbcunha/files/2-opt_TSP_Anpet_2002_CBC.pdf
- DANTZIG, G. B., **Linear Programming and Extensions.** Princeton, NJ: PrincetonUP, p. 545, Sexta Edição, 1963.
- DANTZIG, G.B.; RAMSER, J.H., **The Truck Dispatching Problem.** Management Science. Vol. 6, p. 80-91, 1959.
- GALVÃO, R. D., **Roteamento de Veículos com Base em Sistemas de Informação Geográfica. Gestão e Produção.** V. 4, n. 2, p. 159-173, 1997.
- GASKELL, T.J., **Bases for vehicle fleet scheduling.** Operation Research, Vol. 18, p. 281-295, 1967.
- GOLDBERG, D. E., **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.** EUA, Addison-Wesley, 1989.
- GOLDEN, B. I.; ASSAD, A. A., **Vehicle Routing with Time-Window Constraints: Algorithmic Solutions.** Vol. 15 of American Series in Mathematical and Management Sciences. American Sciences Press, Inc., Columbus, Ohio, 1986.
- HAYS, R., **The Delivery Problem.** Report 106, Department of Management Science, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, PA, 1967.
- KROLAK, P.D., FELTS, W., NELSON, J.H., **A man-machine approach toward solving the generalized truck dispatching problem.** Transportation Science, Vol. 6, p. 49-170, 1972.
- NILSSON, N. J., **Principals of artificial intelligence.** New York: edição de Birkhauser,1982.
- PELIZARO, C., **Avaliação do Desempenho do Algoritmo de um Programa Comercial para Roteirização de Veículos.** São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, 2000.
- STERN, H.I., DROR, M., **Routing electric meter readers.** Computer & Operation Research, Vol. 6, p. 209-223, 1979.
- TUCKER, A. W., **On Directed Graphs and Integer Programs.** IBM Mathematical research Project, Princeton University, 1960.