

PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS PARA ATENDIMENTO DE ORDENS EMERGENCIAIS EM CONCESSIONÁRIA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Vinícius Jacques Garcia

Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Maria
viniciusjg@ufsm.br

Olinto de Araújo Bassi

Colégio Técnico Industrial, Universidade Federal de Santa Maria
olinto@ctism.ufsm.br

Guilherme Dhein

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria
gdhein@redes.ufsm.br

Daniel Pinheiro Bernardon, Ghendy Cardoso Júnior

Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência, Universidade Federal de Santa Maria
dpbernardon@ufsm.br, ghendy@ufsm.br

RESUMO

Neste trabalho é proposto um modelo matemático para o problema de roteamento de veículos para atendimentos de clientes comerciais e emergenciais em concessionária de distribuição de energia elétrica. As rotas inicialmente atribuídas às equipes de atendimento, compostas por clientes comerciais, podem exigir um procedimento de reprogramação em resposta ao surgimento de atendimentos de emergência. A minimização da latência é o critério de avaliação utilizado para o atendimento de emergências, e as rotas envolvendo todos os clientes são criadas de modo a reduzir o *makespan* e o tempo total percorrido. Os experimentos computacionais demonstram que o modelo é consistente e representa adequadamente o problema abordado.

PALAVRAS CHAVE: serviço de emergência, atendimento ao consumidor, otimização combinatória, roteamento de veículos.

Área principal: Otimização Combinatória, Programação Matemática, PO na Área de Energia

ABSTRACT

In this paper is proposed a mathematical model for the vehicle routing problem for commercial and emergency services in electrical energy distribution utilities. Routes initially designated to the service teams, composed by commercial services only, may need a reprogramming procedure in response to the arrival of new emergency services. The minimization of the latency is the evaluation criterion for the treatment of the emergencies, and the routes with all the clients are created in order to minimize the makespan and the total traveled time. Computational experiments demonstrate that the model is consistent and adequately represents the problem addressed.

KEYWORDS: emergency service, customer service, combinatorial optimization, vehicle routing

Main area: Combinatorial: Optimization, Mathematical Programming, OR in Energy

1. Introdução

Gerenciar o atendimento de consumidores guarda especial dificuldade quando é considerada a premência dos serviços e os recursos humanos e materiais disponíveis. Atender a demanda de serviços sem deixar de observar as orientações do órgão regulador (ANEEL, 2011) é o desafio que se impõe no cotidiano das empresas de distribuição de energia elétrica.

O tempo para atendimento é o fator crítico quando são considerados cenários de emergência, geralmente envolvendo situações em que os riscos, inclusive a terceiros, são aspectos determinantes e de particular importância quando são tratados pelos centros de operação.

O despacho de ordens emergenciais no centro de operação de uma distribuidora de energia elétrica contempla um horizonte de 24 horas a cada dia e 7 dias por semana. Tal contexto, associado à premência com que os serviços devem ser tratados, aponta para um sistema de tempo real que realize uma operação de vincular uma ordem de trabalho (OT) a uma equipe.

Assumindo a oportunidade de desenvolver um sistema capaz de realizar esta tarefa de atribuir uma OT a uma equipe, os seguintes objetivos estratégicos devem ser contemplados:

1. Reduzir o tempo de despacho das equipes;
2. Aprimorar a segurança na operação da rede, quando da execução de serviços;
3. Aperfeiçoar o uso de recursos de campo, na forma de garantia de segurança ao menor custo possível;
4. Obter melhora no processo de relacionamento interno por meio da sistematização e transparência dos critérios de despacho.

Considerando que todos os objetivos direta ou indiretamente relacionam a tarefa inerente ao despacho de ordens emergenciais, ou seja, associar a cada OT pendente uma equipe para executá-la, este contexto sugere que a resolução do problema de despacho de ordens emergenciais tem uma importância definitiva no atendimento destes objetivos. Tal motivação é exatamente a origem deste trabalho: o estudo das características do problema de otimização combinatória associado ao despacho de ordens emergenciais.

Este trabalho propõe um modelo matemático para o problema de despacho de ordens de serviço emergenciais, enfatizando a análise das particularidades que advém do cenário prático e avaliando os resultados com um estudo de caso. As contribuições deste trabalho estão relacionadas com a definição das particularidades e atributos do problema, além da conveniência na utilização de três funções objetivo para o referido problema.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: a seção 2 define o problema abordado, seguido da descrição do modelo matemático (seção 3); um estudo de caso é apresentado na seção 4 e finalmente as conclusões são apresentadas na seção 5.

2. Definição do problema

Os eventos relativos aos problemas na rede elétrica correspondem àqueles identificados pela própria distribuidora através de um centro de operação, que considera o fluxo das atividades e subprocessos que são apresentados na Figura 1. O foco do trabalho contempla o tratamento para a atividade grifada como “Operação manual”. Esta etapa consiste no processo de restabelecimento de energia envolvendo o despacho, o acompanhamento da execução e o encerramento da OT.

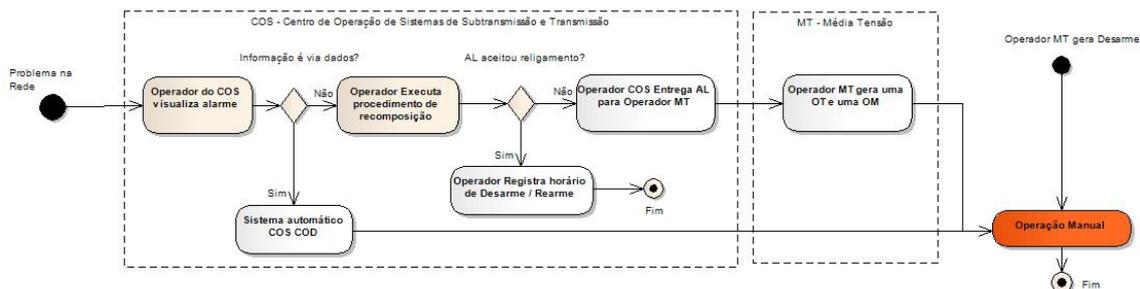


Figura 1. Fluxograma do processo “Resolução de problemas na rede elétrica”

Neste processo, a necessidade de reduzir o custo de deslocamento para atender um conjunto de clientes levou à definição de um conjunto de problemas de roteamento, de acordo com a especificidade de cada situação. No presente trabalho, é descrito um problema que emerge das características específicas da construção de rotas para atender clientes de uma distribuidora de energia elétrica, em específico frente ao surgimento de ordens emergenciais. O princípio de análise que culminou no modelo matemático para representar e solucionar o problema de despacho tem origem na grande gama de problemas relacionados ao clássico problema do Caixeiro Viajante (Lawler et al., 1985) e a sua famosa variação: o problema de roteamento de veículos (Toth e Vigo, 2001).

Na distribuidora em questão, um conjunto de solicitações de serviço deve ser tratado por equipes de atendimento, estabelecendo, portanto, a criação de múltiplas rotas. As equipes se concentram inicialmente em um depósito, e não necessitam retornar para ele após o atendimento do último cliente atribuído.

A principal característica, que estabelece a especificidade do problema, está na definição dos tipos de tarefas, e principalmente no fato de que nem todas são conhecidas ao mesmo tempo e antes das equipes iniciarem os atendimentos. As tarefas são divididas em dois tipos: os atendimentos aos clientes comerciais, conhecidos *a priori*, e os atendimentos de emergência, que podem surgir a qualquer momento. Todas as equipes disponíveis têm a capacidade de atender tanto demandas comerciais quanto emergenciais.

No início da sua atividade, as equipes têm atribuídas a si rotas compostas apenas por atendimentos a clientes comerciais. A ocorrência de situações de emergência gera a necessidade de atendimentos que se sobrepõem em importância aos atendimentos comerciais e estabelecem uma prioridade. De acordo com o número e a localização das emergências, uma ou mais equipes serão deslocadas de suas rotas iniciais para o atendimento prioritário.

O problema derivado desta descrição diz respeito à necessidade de reestruturar rotas de modo a acomodar os atendimentos de emergência. Em função da prioridade, os atendimentos comerciais programados são postergados para o atendimento imediato de emergências. As novas rotas são construídas pela distribuição dos atendimentos emergenciais entre as equipes, seguidos dos atendimentos comerciais. Existe, portanto, a reprogramação de todas as rotas, ao contrário do proposto em (Raduan, 2009), em que apenas uma rota é alterada. Não há compromisso com a manutenção das características das rotas anteriores à chegada das emergências, de forma que atendimentos comerciais podem ser reatribuídos a novas equipes.

Uma definição importante diz respeito ao objetivo do problema. Existe uma série de objetivos que podem ser considerados, inclusive conflitantes entre si. Um destes objetivos é reduzir o tempo final para o atendimento das emergências. Esta característica é fundamental, pois no ramo da distribuição de energia elétrica, demandas emergenciais podem implicar inclusive em riscos para os clientes e devem ser solucionadas com a maior brevidade.

Outro objetivo, de caráter econômico, diz respeito ao desejo de reduzir o custo total das rotas, considerado aqui como a soma dos tempos para concluir todas as rotas. Neste caso, tanto atendimentos comerciais quanto de emergência contribuem para o custo. É interessante notar que já entre estes dois objetivos existem um conflito estabelecido pelo tratamento prioritário de emergências, mesmo que leve a um custo total maior.

Uma terceira característica que pode ser trabalhada é a justiça na distribuição de tarefas entre as equipes, o que pode ser avaliado sob duas perspectivas diferentes. A primeira, talvez mais intuitiva, sugere a necessidade de equilibrar o *workload*, ou custo das rotas. Em (Okonjo-Adigwe, 1988), é proposto um método para a geração de rotas balanceadas para o problema do roteamento de veículos, em que a partir de uma solução heurística original são estabelecidos limites máximos e mínimos para o tempo da rota, e o problema, incorporados estes limites, é resolvido na otimalidade. (Chandran et al., 2006) tratam do balanceamento do *workload* através de algoritmo construtivo de clusterização, e o roteamento de cada cluster é feito na sequência. Já (Weintraub et al., 1999) tratam do despacho de veículos de emergência em uma empresa de energia, e o balanceamento é considerado em um procedimento de pós-otimização, realizado

após etapas de agrupamento e roteamento, e executado através de trocas de tarefas das equipes mais carregadas para as menos carregadas.

O trabalho de (Anbuudayasankar, 2009) observa que, em certas atividades, o trabalho da equipe não se resume ao deslocamento entre clientes, mas também inclui atividades perigosas e/ou desgastantes durante o atendimento. Neste caso, a equidade a ser buscada não se limita ao custo da rota, mas também (e talvez apenas) ao número de clientes atendidos.

Não é difícil verificar que o objetivo de equalizar as rotas, seja em relação ao custo ou ao número de clientes, se configura conflitante com os dois objetivos citados anteriormente. O fato de um conjunto de rotas balanceadas apresentar potencialmente um custo total acumulado maior do que outro conjunto sem esta característica pode tornar a solução balanceada pouco atrativa do ponto de vista da empresa. Porém, discrepâncias grandes entre as atribuições das equipes podem levar a desgastes na relação do pessoal com a empresa e com colegas (outras equipes) e até a uma piora no relacionamento com o cliente e no serviço prestado. Por esta razão, a tentativa de estabelecer uma distribuição mais igualitária pode ser interessante e tratada como um dos objetivos.

No presente trabalho, a distância associada a cada arco entre clientes é sempre relativa ao tempo de deslocamento do cliente de origem ao cliente de destino. É importante observar que o tempo de serviço no cliente de destino é incorporado ao custo do arco, o que estabelece a assimetria na matriz de distâncias.

3. O modelo proposto

No modelo apresentado, são considerados três objetivos. O primeiro é reduzir a espera nos clientes com atendimentos de emergência. Desta forma, a construção dos trechos de rota que comportam o atendimento às emergências é tratada como um problema de latência mínima.

Os atendimentos aos clientes comerciais são incorporados à função objetivo de duas formas. Com o objetivo de balancear as rotas geradas, aproximando seus custos, a inclusão dos atendimentos comerciais nas rotas é tratada como um problema de minimização do *makespan*. Este objetivo tem ainda o efeito de aproximar os tempos de atendimento do primeiro e do último clientes.

Mesmo com uma avaliação apenas intuitiva é possível perceber que rotas equilibradas podem ser obtidas através da equiparação das rotas menores à maior, ou seja, forçando o aumento do custo das rotas menores, o que é um contrassenso do ponto de vista econômico. Por isso, existe ainda o tratamento do roteamento, incluindo atendimentos comerciais e de emergência, como um problema de minimização do tempo total. Para unir estes três objetivos conflitantes (latência mínima das emergências, minimização do *makespan* e do custo total das rotas) na função objetivo, uma combinação convexa é utilizada.

Os seguintes parâmetros são considerados:

- V_s : conjunto de pontos de saída, que indicam as posições em que há equipes de atendimento no momento em que surge a necessidade de um atendimento de emergência;
- V_e : conjunto de pontos que correspondem às ordens emergenciais;
- V_c : conjunto de pontos que correspondem às ordens comerciais;
- c_{ij} : custo do deslocamento do ponto i até o ponto j ; como não há custo para o retorno ao depósito, $c_{i0} = 0$, $\forall i \in V_s \cup V_c \cup V_e$
- T : tempo restante para o final do turno de trabalho das equipes quando do surgimento das emergências
- N : número de equipes disponíveis, que estabelece o número de rotas;
- M : um valor grande, tipicamente igual a 100 vezes o número de pontos do problema.
- W_1, W_2, W_3 : pesos dos componentes da função objetivo, com $W_1 + W_2 + W_3 = 1$.

As variáveis de decisão do problema são definidas como:

- $x_{ij} \begin{cases} 1 & \text{Se o ponto } j \text{ suceder o ponto } i. \\ 0 & \text{Caso contrário.} \end{cases}$
- t_i : tempo de chegada no ponto i .

$$\text{Min } W_1 \sum_{i \in V_e} t_i + W_2 t_0 + W_3 \sum_{i \in V_s \cup V_c \cup V_e} \sum_{j \in V_s \cup V_c} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{j \in V_c \cup V_e \cup \{0\}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V_s \cup V_c \cup V_e \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V_s \cup V_e} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V_e \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V_s \cup V_c \cup V_e} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V_c \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V_s \cup V_c \cup V_e} x_{i0} = n \quad (5)$$

$$t_j \geq t_i + c_{ij} + (x_{ij} - 1)M \quad \forall i \in V_s \cup V_c \cup V_e; \forall j \in V_e \cup V_c \cup \{0\} \quad (6)$$

$$t_i = 0 \quad \forall i \in V_s \quad (7)$$

$$t_0 \leq T \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V_s \cup V_c \cup V_e; \forall j \in V_e \cup V_c \cup \{0\} \quad (9)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \in V_s \cup V_c \cup V_e \cup \{0\} \quad (10)$$

A função objetivo é identificada por (1). A restrição identificada em (2) indica que cada ponto deve ser sucedido por apenas um ponto dentre o depósito, os de emergência ou comerciais. Nas restrições (3) e (4) é definido que só há um antecessor para cada vértice. Conforme (3), os pontos de emergência só podem ser precedidos por pontos iniciais ou de emergência, enquanto os pontos clientes podem ser precedidos por ponto inicial, de emergência ou cliente, de acordo com (4). O número de rotas depende do número de equipes, conforme a restrição (5). A restrição (6) estabelece que o tempo de chegada a um ponto é dado pelo tempo do antecessor acrescido do

tempo de deslocamento. Dada esta restrição, o valor t_0 representará o maior tempo de chegada ao depósito, ou seja, o *makespan*. O tempo nos pontos iniciais é 0, conforme a restrição (7). Todas as rotas devem ser concluídas dentro de um tempo máximo, estabelecido pelo turno de trabalho das equipes, o que é garantido na restrição (8). As restrições (9) e (10) definem o domínio das variáveis de decisão.

4. Resultados computacionais

Os resultados preliminares foram obtidos com a resolução do modelo da seção anterior para um caso real, cujas características são descritas a seguir:

- 62 ordens comerciais para atendimento;
- 3 equipes com turno de trabalho de 8 horas;
- 4 ordens de emergência.

Neste estudo de caso, as 4 ordens de emergência ocorreram simultaneamente e após 2 horas do início de turno das equipes. Estas, por sua vez, iniciaram o turno de trabalho para atendimento das ordens comerciais exatamente às 8 horas, com previsão de atendimento de todas as 62 ordens.

Nos testes computacionais a seguir foi utilizado o pacote comercial CPLEX 12.1 e a função objetivo com o pesos $W_1=W_3=0,5$ e $W_2=0$. Tal ajuste foi necessário em razão da inviabilidade de consideração do *makespan* na função objetivo, em se tratando do tempo computacional para resolver o modelo desenvolvido.

A Figura 2 apresenta as rotas de atendimento que foram construídas para as três equipes, nomeadas como 100, 101 e 102. Todas estas três equipes iniciam o turno às 8 horas da manhã e finalizam às 18 horas. O cenário da Figura 2 é apresentado na Tabela 1, com a descrição da equipe, do início do seu turno, do horário de término previsto para o atendimento e também do número de ordens atendidas.

Tabela 1: Ocupação das equipes para o cenário da Figura 2.

<i>Número da equipe</i>	<i>Início do turno</i>	<i>Fim do atendimento</i>	<i>Número de ordens atendidas</i>
100	8:00	14:38	26
101	8:00	13:04	20
102	8:00	15:11	15



Figura 2. Cenário com as ordens comerciais programadas no dia anterior.

Ocorre que às 10:00 horas surgem 4 ordens emergenciais, conforme ilustra a Figura 3. É possível perceber que as equipes se encontram nos seus respectivos percursos e há que se considerar quais delas devem realizar os atendimentos de emergência destacados com a cor amarela na Figura 3, assumindo a premissa que todas as ordens emergenciais interromperão atendimentos comerciais e deverão causar o pronto deslocamento da(s) equipe(s) escolhida(s).

A Figura 4 ilustra o resultado deste princípio: deslocar as equipes para atender as ordens emergenciais com a interrupção dos serviços comerciais pendentes. O que se verifica na Figura 4 é um completo rearranjo das rotas, justamente porque está previsto o retorno aos atendimentos comerciais depois do atendimento das emergências. Com isso, todas as equipes alteraram a sua região de atuação e também as ordens comerciais que tinham nos respectivos calendários, em função do deslocamento provocado pela premência do atendimento das ordens emergenciais.

Os resultados evidenciados na Tabela 2 mostram que as equipes tiveram um adiamento no seu horário de turno previsto, o qual considerava apenas com as ordens comerciais programadas. Houve uma alteração em todas as equipes, justamente porque todas tiveram os atendimentos emergenciais incluídos e também houve uma readequação da rota restante. Este fato ocasionou também uma alteração no número de ordens atendidas por cada equipe, quando é comparado ao cenário apenas com as ordens programadas.

Ainda que sejam evidentes as alterações propostas, o impacto foi amenizado pela consideração do roteamento das ordens comerciais restantes após o atendimento das ordens emergenciais.

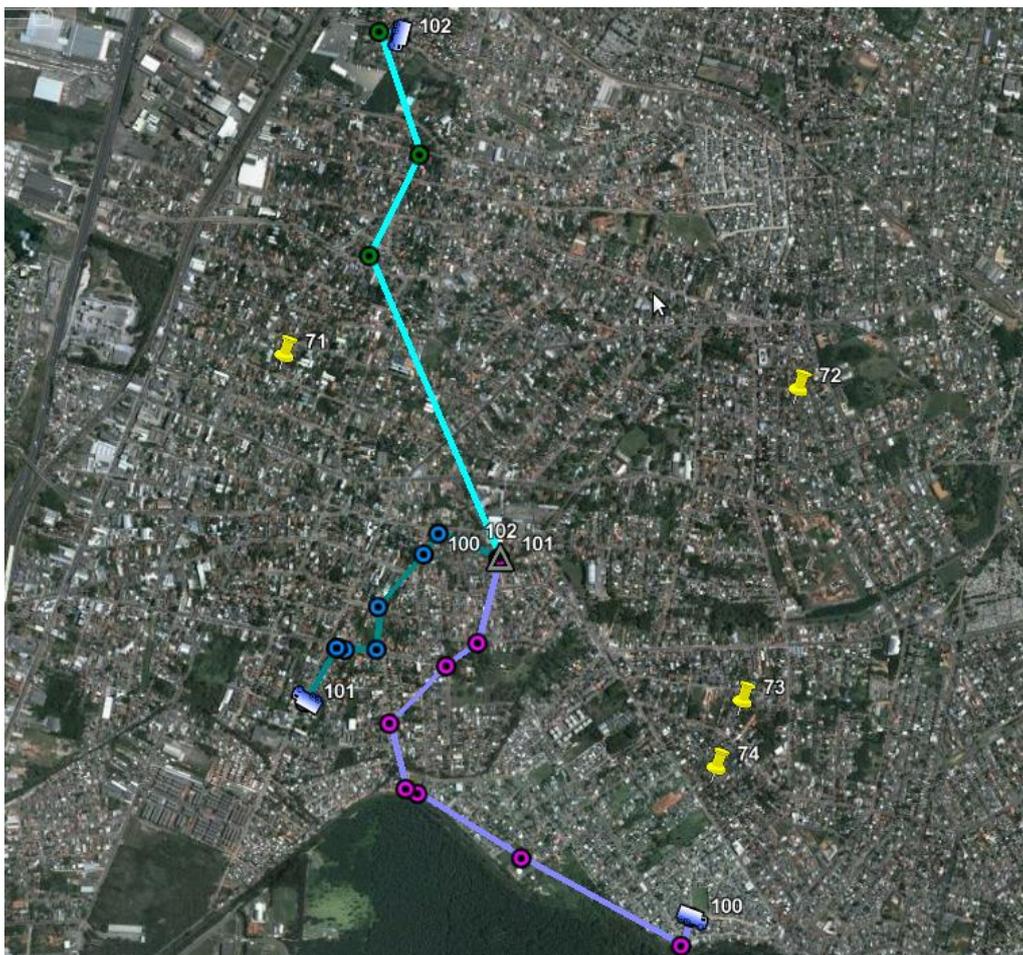


Figura 3. Cenário quando da ocorrência de 4 ordens emergenciais (71, 72, 73 e 74).



Figura 4. Rotas das equipes com o atendimento das emergências.

Tabela 2: Ocupação das equipes para o cenário após o atendimento das emergências.

<i>Número da equipe</i>	<i>Início do turno</i>	<i>Fim do atendimento</i>	<i>Número de ordens atendidas</i>
100	8:00	15:26	20
101	8:00	13:20	21
102	8:00	15:22	25

5. Conclusões

Este trabalho apresenta o problema matemático para o problema do roteamento de veículos com ordens emergenciais. Foram previstos três componentes na função objetivo, que representam os aspectos práticos relevantes do problema.

No estudo das particularidades do problema, foi prevista a elaboração deste modelo matemático como o subsídio necessário para avaliar a eficácia de alguns aspectos, tanto relativos às restrições como também, mais especificamente, na função objetivo. Foi observado que a consideração do *makespan* na função objetivo demandou um tempo computacional proibitivo, levando à definição de fatores de peso que apenas incluíram a latência e custo total de deslocamento das equipes, ponderados igualmente.

O fato de o modelo considerar o rearranjo das ordens comerciais remanescentes após o atendimento das emergências em novas rotas amenizou o impacto no custo total do roteamento.

Dada a complexidade inerente ao modelo, principalmente considerando o *makespan* com o objetivo de balancear as rotas, vislumbra-se como trabalho futuro o uso de heurísticas para reduzir o tempo computacional requerido quando este critério é utilizado.

Referências

- Anbuudayasankar, S. P., Ganesh, K., Lenny Koh, S. C., Mohandas, K.** (2009). Clustering-based heuristic for the workload balancing problem in enterprise logistics. *Int. J. Value Chain Management*, 3(3), 302-315.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA.** Procedimentos de Rede, Brasília, DF, 2011.
- Chandran, N., Narendran, T. T., Ganesh, K.** (2006). A clustering approach to solve the multiple travelling salesmen problem. *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, 1(3), 372-387.
- Lawler, E. L., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G., Shmoys, D. B.** *The Traveling Salesman Problem: A Guided Tour of Combinatorial Optimization*, Wiley, 1985.
- Okonjo-Adigwe, C.** (1988). An effective method of balancing the workload amongst salesmen. *Omega*, 16(2), 159-163.
- Raduan, A. C.** Roteirização parcialmente dinâmica aplicada a serviços de campo. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.
- Toth, P., Vigo, D.** The Vehicle Routing Problem. *Discrete Math, Siam Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, 2001.
- Weintraub, A.; Aboud, J.; Fernández, C.; Laporte, G.; Ramírez, E.** (1999). An Emergency Vehicle Dispatching System for an Electric Utility in Chile. *The Journal of the Operational Research Society*, 50, 690-696.