

PROPOSTA DE MODELO MATEMÁTICO PARA O PROBLEMA DO DESPACHO DE ORDENS DE SERVIÇO 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 despacho de emergências em concessionária de distribuição de energia elétrica. As equipes disponíveis são multitarefa, e são as mesmas designadas para a solução de ordens comerciais. O problema consiste na inclusão das ordens emergenciais em rotas previamente planejadas para o atendimento das comerciais. A solução é construída de modo a atender o número máximo possível de emergências, minimizando a latência. Ao mesmo tempo, durante o processo de inserir de ordens de emergência em rotas comerciais, a solução deve reduzir a postergação de ordens comerciais em momentos após o final dos turnos das equipes e ainda reduzir o tempo total de deslocamento. Experimentos computacionais com dados reais de uma concessionária de distribuição de energia elétrica demonstram que o modelo é consistente e representa adequadamente o problema abordado.

PALAVRAS CHAVE: serviço de emergência, problema *online*, tempo real, otimização combinatória, roteamento de veículos.

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

ABSTRACT

In this paper, a mathematical model for the emergency order dispatching problem in electrical energy distribution utilities is proposed. The available teams are multitask, and they are the same designated to solve commercial orders. The problem consists in including the emergency orders in routes pre-planned to serve the commercial ones. The solution is constructed in order to satisfy as much as possible of the emergencies, minimizing their latency. At the same time, while inserting the emergency orders in the commercial routes, the solution must reduce the assignment of commercial orders to times after the teams' shifts, and also reduce the total travel time. Computational experiments with real data from a electrical energy distribution utility demonstrate that the model is consistent and adequately represents the problem addressed.

KEYWORDS: emergency service, online problem, real time, combinatorial optimization, vehicle routing

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

1. Introdução

Entre as principais atribuições das companhias de distribuição de energia elétrica está o fornecimento de energia com qualidade para os usuários de uma região de concessão. Para a manutenção da qualidade do fornecimento, as empresas se encontram cotidianamente frente a demandas que são absorvidas na forma de ordens de serviço, e exigem tratamento por parte de suas equipes técnicas.

Parte destas demandas são situações que não apresentam a necessidade de urgência no tratamento, como, por exemplo, ações de expansão na rede, troca preventiva de equipamentos, ou simples situações de ligação ou corte de fornecimento a pedido de clientes. Por não haver a necessidade de urgência no tratamento, estas demandas assumem uma característica de previsibilidade, pois existe folga razoável nos intervalos de tempo entre as ações de agendamento, planejamento e execução. As ordens de serviço criadas a partir destas demandas são chamadas de ordens comerciais.

Outras demandas, pelo contrário, surgem por falhas no fornecimento e por situações que representem risco para a população. Neste caso, o atendimento deve ser imediato, buscando solucionar o problema no menor tempo possível. Estas demandas apresentam ainda uma característica agravante que é imprevisibilidade das situações causadoras, como fenômenos climáticos extremos ou acidentes envolvendo a rede elétrica. As ordens de serviço, neste caso, são chamadas de emergenciais.

Como forma de atender as ordens de serviço e responder às demandas, as empresas possuem centros de operação responsáveis por gerirem os recursos disponíveis, que são suas equipes técnicas. Mesmo para ordens comerciais, em que existe a disponibilidade de tempo para o planejamento, a tarefa de destinar estes recursos não é trivial, devido ao grande volume de ordens de serviço a serem destinadas a equipes.

No caso de ordens emergenciais, é importante lembrar que o atendimento em campo das emergências é feito pelas mesmas equipes para as quais são destinadas inicialmente as ordens comerciais. Deste modo, o operador, em um curto espaço de tempo, deve avaliar um grande número de possibilidades e determinar como alterar o planejamento comercial de modo a designar da melhor maneira possível as equipes para as emergências e minimizar prejuízos inerentes ao processo.

O foco deste trabalho é exatamente o tratamento de ordens emergenciais considerando que as rotas das equipes são planejadas *a priori* contemplando somente ordens comerciais. O que se tem, então, é um problema de roteamento de veículos não capacitado para o qual não se tem conhecimento de todos os dados *a priori*. O trabalho formaliza as características do problema em um modelo matemático e apresenta resultados computacionais obtidos a partir deste modelo, usando instâncias criadas a partir de dados reais obtidos junto a uma concessionária de distribuição de energia elétrica da região sul do país.

O artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 são abordados alguns trabalhos correlatos e na seção 3 o problema é descrito em maiores detalhes. Na seção 4 é apresentado o modelo, e na seção 5 são descritos alguns resultados. A seção 6 apresenta considerações finais.

2. Trabalhos correlatos

Este trabalho aborda 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 conceito de definir as rotas para o deslocamento de um ou mais servidores (ou equipes) de modo a atender um conjunto de demandas generaliza um grande conjunto de problemas de otimização, todos relacionados ao Problema do Caixeiro

Viajante (Lawler et al., 1985) e sua variação para múltiplas rotas, como também o Problema do Roteamento de Veículos (Toth e Vigo, 2001).

Diversos problemas são definidos dentro deste escopo, gerados por variações na função objetivo, nas características do serviço prestado nos pontos, pela associação com outros problemas, entre outras possibilidades. Um exemplo do primeiro caso é apresentado em (Dewilde et al., 2010), que trata do Problema do Reparador Viajante com Lucro (TRPP, sigla do inglês), em que a função objetivo incorpora a minimização da latência ao invés do custo percorrido na rota. A variação nas características do serviço prestado no cliente pode ser exemplificada pelo problema conhecido como *dial-a-ride* (Calvo e Touati-Moungla, 2011), em que o atendimento corresponde a um deslocamento entre dois pontos. No trabalho de (Kovacs et al. 2011) é ilustrada a possibilidade de associar dois problemas, pois o roteamento de equipes de técnicos é tratado em conjunto com a definição das equipes.

Em (Ghiani et al., 2003) é descrita uma forma de classificar as variações do Problemas do Roteamento de Veículos, mas que pode ser estendida para outros problemas de roteamento, através de quatro categorias: problemas estáticos determinísticos ou estocásticos, e problemas dinâmicos determinísticos ou estocásticos.

Na categoria dos problemas estáticos determinísticos, todos os dados necessários para o planejamento da atividade são conhecidos antes da execução do algoritmo, e não há a necessidade de prever alterações no roteamento construído. Nesta categoria se enquadram os problemas já descritos nesta seção.

Nos problemas estáticos e estocásticos, algumas variáveis do problema são conhecidas como aleatórias. Neste caso, é possível que os valores tidos como aleatórios no momento do planejamento provoquem infactibilidades no momento em que a solução é de fato utilizada. Portanto, o planejamento é feito de modo a atender às restrições dentro de certa probabilidade. Outra abordagem para o tratamento seria a realização de uma fase de ajustes quando a aleatoriedade estiver dissipada. Porém, conforme (Pillac et al., 2012), “é assumido que as rotas são construídas *a priori* e apenas pequenas modificações são aceitas após”.

Nos problemas dinâmicos e determinísticos, toda a informação necessária é conhecida antes da construção das rotas, mas alguns elementos dependem do tempo para estarem disponíveis. É o caso, por exemplo, de roteamentos com janelas de tempo, como em (Li et al., 2009) e em (Calvo e Touati-Moungla, 2011), ou com equipes com turnos com horários variados.

Na quarta categoria, dos problemas dinâmicos e estocásticos, parte (ou a totalidade) da informação de entrada é desconhecida *a priori*, sendo revelada em partes durante a execução das rotas. Mas existe um conhecimento estocástico sobre as características das informações ainda não conhecidas que pode ser explorado. Em (Weintraub et al., 1999), por exemplo, estatísticas sobre o histórico de problemas na rede elétrica são usadas para a previsão das demandas de equipes de atendimento. Isto evita, por exemplo, que áreas sujeitas a falhas fiquem descobertas em função do envio de todas as equipes para áreas distantes.

Esta classificação não cobre uma quinta situação, em que as informações também são reveladas durante a execução das rotas, porém não existe informação de onde se possa inferir um conhecimento estocástico. Na classificação alternativa, proposta por (Pillac et al., 2012), são os problemas com esta característica que são agrupados sob a categoria de problemas dinâmicos e determinísticos. No próprio (Pillac et al., 2012), mas também em (Klundert e Wormer, 2010), são colocados como sinônimos dos problemas desta classe os problemas referenciados na literatura como problemas em tempo real ou ainda problemas *online*.

Esta descrição abrange de forma mais coerente o problema trabalhado neste artigo. Porém, os termos “problema dinâmico”, “problema em tempo real” e “problema *online*” não serão considerados como sinônimos. Para problema dinâmico, será considerado o conceito já descrito, relacionado especificamente à característica de que os dados de entrada do problema estão total ou parcialmente ocultos.

Já problema em tempo real e problema *online* serão considerados dentro de um contexto relacionado à forma como o algoritmo aborda o fato de estar trabalhando com informação incompleta. Ou seja, estão relacionados ao método de solução, e não necessariamente

ao problema. O termo “tempo real” será usado para referir algoritmos em que se considera a necessidade de responder prontamente à nova informação disponível, de modo a respeitar requisitos quanto ao tempo disponível para que uma nova solução seja apresentada para atender às situações que se revelam. Os métodos de (Klundert e Wormer, 2010), que trabalham com o problema de designar servidores para demandas surgidas durante o turno de trabalho, e de (Li et al., 2009), que trabalham com a necessidade de replanejar se algum veículo falha (problema mecânico ou acidente) durante o atendimento da sua rota, são exemplos de métodos em tempo real. (Grotschel et al, 2001) também caracteriza o tempo real como a necessidade de resposta em curto espaço de tempo, e considera este não como sinônimo e sim como requisito de alguns problemas dinâmicos.

Nestes trabalhos referidos, (Grotschel et al, 2001), (Pillac et al., 2012) e (Klundert e Wormer, 2010), o termo *online* é usado para referenciar algoritmos que tomam uma (nova) decisão sempre que nova informação torna-se acessível e perturba a solução anterior. Mas a reorganização de uma solução anterior para contemplar novas informações deve ser apenas uma das características para definir um método como *online*. Em uma situação como esta, se a possibilidade de perturbações futuras não é considerada e cada decisão sucessiva é tomada baseada apenas no conhecimento disponível no momento, a dinamicidade acaba sendo tratada como a resolução de sucessivas instâncias estáticas. Ou seja, a nova informação é incluída na instância conhecida e a nova instância gerada é tratada como a instância definitiva, estática, sobre a qual um novo roteamento é criado.

É preciso lembrar que as informações surgem enquanto as rotas estão sendo executadas. Por isso, uma decisão tomada em resposta a uma perturbação tem influência direta na qualidade das soluções para as perturbações seguintes. Deste aspecto surge uma segunda característica que também é importante para um método *online*: a construção da solução deve ser feita considerando o possível surgimento de novas perturbações em função de eventos não conhecidos no momento. Os métodos *online* são, portanto, aqueles que fazem mais do que apenas incorporar novas informações em soluções anteriores: eles constroem as rotas de forma a reduzir o risco de prejuízo severo em decisões futuras. Isto se aplica a problemas com informação estocástica, como no caso referido anteriormente de construir rotas considerando as probabilidades de número e posição de futuras demandas. E se aplica também quando a informação estocástica não existe, evitando-se heurísticamente situações de risco, ou incorporando fatores como a clarividência, que é a possibilidade de conhecer de antemão algumas das demandas que surgirão num futuro próximo.

O problema OL-TSP, derivado do clássico problema do caixeiro viajante com o acréscimo do componente *online*, é estudado em (Allulli et al, 2008) como forma de avaliar a influência teórica da “clarividência”. Sempre considerando a competitividade do método, que é a relação do resultado do método *online* frente à solução ótima *offline* (reduzindo o problema à situação de estático e determinístico, com o conhecimento prévio de todas as demandas que surgirão), os autores demonstram que o ganho na competitividade em função da clarividência varia de acordo com o objetivo considerado. Abordando três variações do OL-TSP, eles demonstram, pelo cálculo de limitantes inferiores para a competitividade de algoritmos, que o acréscimo de clarividência não representa ganho de competitividade para o OL-TSP com rota fechada, e há espaço para ganho se a rota for aberta. Apontam ainda que a clarividência apresenta vantagem empírica quando a função objetivo é a latência das rotas, embora neste caso não exista algoritmo *online* competitivo, tanto com quanto sem clarividência.

Por fim, é importante considerar que, embora neste trabalho métodos em tempo real e métodos online não sejam tratados como sinônimos, também não são opostos ou excludentes, e as características que os definem podem coexistir em um mesmo método. É possível construir algoritmos do tipo *online* que respondam às informações novas surgidas durante a execução de um roteamento levando em consideração a possibilidade de perturbações futuras, e mesmo assim o façam dentro de restrições de tempo que permitam que sejam considerados métodos em tempo real.

3. Descrição do Problema

As empresas de distribuição recebem diariamente demandas na forma de ordens de serviço, decorrentes das necessidades de atualização, expansão e/ou manutenção da rede elétrica. Por suas características, as ordens de serviço podem ser classificadas em comerciais ou emergências. As ordens comerciais englobam as demandas que não apresentam urgência e são designadas às equipes de campo em planejamento *offline*, antes dos turnos de trabalho. Caso algumas destas ordens não sejam atendidas, então são consideradas no planejamento do dia seguinte.

Ainda sobre as ordens comerciais, a cada uma é associado um nível de prioridade, que pode variar entre 0 e 3. O nível de prioridade de uma ordem corresponde, principalmente, a prazos ou regras estabelecidos pelo órgão regulador. As ordens de nível 0 são as de maior prioridade, enquanto as de nível 3 são as de menor prioridade. O planejamento comercial diário busca reduzir o custo do roteamento respeitando estas prioridades.

As ordens emergenciais decorrem de situações que exigem um tratamento imediato, ou seja, o planejamento de sua execução deve ser feito imediatamente após a identificação da demanda, em tempo real. É importante ressaltar que o caráter de planejamento imediato para as emergências não se reflete necessariamente em caráter de atendimento imediato pelas equipes. É possível que uma ordem emergencial tenha sua execução planejada para um momento após a execução de uma ordem comercial, em função de uma avaliação global do problema no qual são considerados todos os custos envolvidos.

As ordens emergenciais representam, portanto, perturbações no planejamento das ordens comerciais, pois implicam modificação dos planos para atender situações que, por suas características, tenham prioridade sobre (algumas ou todas) ordens comerciais.

O número de equipes é limitado, e os horários de trabalho devem atender a restrições trabalhistas. De modo a evitar a postergação de ordens, é possível considerar o pagamento de hora-extra ou ainda a convocação de equipes em sobreaviso. As decisões sobre a inclusão de equipes fora de seus turnos normais são tomadas pelos operadores do sistema e o planejamento é feito já com o conhecimento das equipes disponíveis e do tempo de sua disponibilidade. As equipes têm habilidades para resolver um conjunto específico de ordens de serviço comerciais, no entanto, todas as equipes são capazes de atender a todas as ordens de emergências.

Uma limitação importante a ser considerada quando é realizado o planejamento é a impossibilidade de rearranjar as rotas comerciais. Por motivo de restrição tecnológica na comunicação com as equipes, estas já partem para o seu turno de trabalho com as informações da rota comercial programada e a comunicação com a equipe durante o dia se limita ao envio de informações de ordens emergenciais que a equipe deverá atender. Na avaliação das perturbações representadas pelas ordens emergenciais, é necessário definir qual equipe deverá atender a emergência e em que momento, mas não é feita nenhuma reestruturação na rota comercial. Após o atendimento de uma emergência, a equipe pode ser destinada para o atendimento de outra emergência ou voltar para o seu plano original de ordens comerciais.

A necessidade de resposta rápida no despacho das ordens de serviço emergenciais gera uma grande diferença no tratamento destas ordens em relação às ordens comerciais. O processo de decisão sobre o atendimento de ordens emergenciais é feito sempre que uma nova ordem surge, ou sempre que, havendo emergências pendentes, uma equipe fica livre.

O fato de que as ordens emergenciais são atendidas pelas mesmas equipes que as comerciais gera um conflito entre objetivos antagônicos. Se por um lado as emergências trazem consigo uma necessidade de urgência no atendimento, por outro é desejável reduzir o impacto que o atendimento destas tem sobre o planejamento inicial, de modo a realizar o máximo possível de ordens comerciais, em especial as de prioridade 0.

É importante favorecer que as ordens de serviço emergenciais sejam efetivamente atribuídas a equipes, evitando que sejam desconsideradas ao surgirem e deixadas para o planejamento do dia seguinte. O cálculo do custo efetivo de cada ordem emergencial faz com que o planejamento do atendimento destas ordens seja tratado como um problema de latência.

O impacto da inserção de ordens emergenciais no planejamento comercial é avaliado considerando os atrasos no planejamento *offline* e o tempo restante até o final do turno para atendimento de ordens comerciais, principalmente de prioridade 0.

Um último objetivo a ser observado é a redução no custo total das rotas percorridas pelas equipes para o atendimento das ordens. Este é um objetivo de caráter econômico, visando reduzir os custos para deslocamento entre os locais de atendimento.

É interessante salientar que o planejamento comercial já é feito considerando um distritamento, de modo que as equipes de um roteamento têm a sua área de atuação limitada a uma região relativamente pequena. Por isso, o modelo proposto neste trabalho, embora tenha a característica de alterar uma solução pré-planejada em função de informações novas, está focado em uma abordagem real time, e não na característica online de construir soluções visando perturbações futuras.

4. O modelo proposto para o problema do despacho de emergências

No modelo apresentado, são considerados cinco critérios para a composição da função objetivo. Os três primeiros, que visam reduzir o impacto da inserção de emergências nas rotas comerciais, são: a minimização no atraso das ordens comerciais em relação ao final dos turnos das equipes, a diminuição do risco destes atrasos, considerando o intervalo entre o final do atendimento das ordens (quando dentro dos turnos das equipes) em relação ao final dos turnos, e a redução do tempo total de deslocamento. Os dois critérios restantes tratam, respectivamente, da redução da latência das emergências e do prejuízo causado pelo não atendimento de uma emergência. Cada um destes cinco critérios está representado por um componente da função objetivo, cada um ponderado por um peso específico.

Inicialmente, são apresentados os parâmetros envolvidos:

0	:	ordem artificial que representa o ponto final de todas as rotas; a distância de qualquer ponto para este é nula.
V_e	:	conjunto de ordens emergenciais;
V_c	:	conjunto de ordens comerciais;
V_s	:	conjunto de pontos de saída ou posições iniciais das equipes;
V	:	$V = V_e \cup V_c \cup V_s \cup \{0\}$
R	:	conjunto de rotas/equipes;
$t0$:	tempo referente a posição das equipes
T	:	tempo final do turno
$suc(i)$:	o ponto sucessor do ponto i na rota comercial original, $i \in V_c$
$pre(i)$:	o ponto antecessor do ponto i na rota comercial original, $i \in V_c$
$rC(i)$:	a rota em que está inserido o ponto i , ou a equipe que atenderá o ponto i , $i \in V_c$
te_i	:	tempo da ocorrência de uma emergência, $i \in V_e$
ts_i	:	tempo de duração do serviço de atendimento de uma ordem, $i \in V \setminus \{0\}$
C	:	custo atribuído às ordens emergenciais não incluídas nas rota
E	:	$E = \{ \langle i, j, r \rangle; i \in V_e, j \in V, r \in R, r = rC(j) \} \cup \{ \langle i, j, r \rangle; i \in V, j \in V_e, r \in R, r = rC(i) \} \cup \{ \langle i, j, r \rangle; i \in V_e, j \in V_e, r \in R, i \neq j \} \cup \{ \langle i, 0, r \rangle; i \in V_e, j \in V, r \in R \}$
$c_{i,j}$:	o tempo de deslocamento entre os locais das ocorrências i e j
M	:	Um valor grande, tipicamente $2T$

W_1, W_2, W_3, W_4, W_5 : pesos dos componentes da função objetivo, com
 $W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 = 1$.

As variáveis de decisão do problema são definidas como:

$$\begin{aligned} x_{ijr} & \begin{cases} 1 \text{ se o ponto } j \text{ suceder o ponto } i \text{ na rota } r \\ 0 \text{ caso contrário.} \end{cases} \\ y_i & \begin{cases} 0 \text{ se a emergência } i \text{ está colocada em alguma rota} \\ 1 \text{ caso contrário} \end{cases} \\ t_i & : \text{Tempo de encerramento da ordem } i \\ ta_i & : \text{adiantamento no encerramento da tarefa em relação ao final do turno;} \\ & \quad ta_i = T - t_i \text{ se } t_i < T, 0 \text{ caso contrário} \\ td_i & : \text{atraso no encerramento da tarefa em relação ao final do turno; } td_i = t_i - T \\ & \quad \text{se } t_i > T, 0 \text{ caso contrário} \end{aligned}$$

$$\text{Min} \quad W_1 \sum_{i \in V_c} td_i + W_2 \sum_{i \in V_c} -ta_i + W_3 \sum_{\langle i, j, r \rangle \in E, i \in V_e} c_{ij} x_{ijr} + W_3 \sum_{\langle i, j, r \rangle \in E, i \in V_e} (c_{ij} - c_{i, \text{succ}(i)}) x_{ijr} + W_4 \sum_{i \in V_e} t_i + W_5 C \sum_{i \in V_e} y_i \quad (1)$$

S. a.

$$\sum_{\langle i, j, r \rangle \in E} x_{ijr} + y_i = 1 \quad \forall i \in V_e \quad (2)$$

$$\sum_{\langle i, j, r \rangle \in E} x_{ijr} + y_j = 1 \quad \forall j \in V_e \quad (3)$$

$$\sum_{\langle i, j, r \rangle \in E} x_{ijr} \leq 1 \quad \forall i \in V_c \cup V_s, \forall r \in R \quad (4)$$

$$\sum_{\langle i, j, r \rangle \in E} x_{ijr} \leq 1 \quad \forall j \in V_c, \forall r \in R \quad (5)$$

$$\sum_{\langle i, j, r \rangle \in E} x_{ijr} - \sum_{\langle j, l, r \rangle \in E} x_{jlr} = 0 \quad \forall j \in V_e, \forall r \in R \quad (6)$$

$$\sum_{\langle i, j, r \rangle \in E} x_{ijr} - \sum_{h \in V_e} x_{h, \text{succ}(i), r} = 0 \quad \forall i \in V_c \cup V_s, \forall r \in R \quad (7)$$

$$t_i = t_0 \quad \forall i \in V_s \quad (8)$$

$$t_j \geq t_i + (c_{ij} + ts_j) + \sum_{\langle i, j, r \rangle \in E} (x_{ijr} - 1)M \quad \forall j \in V, \forall i \in V \quad (9)$$

$$t_i \geq t_{\text{pre}(i)} + c_{\text{pre}(i), i} + ts_i \quad \forall i \in V_c \quad (10)$$

$$t_i + ta_i - td_i = T \quad \forall i \in V_c \quad (11)$$

$$t_i - ts_i \leq T \quad \forall i \in V_e \quad (12)$$

$$t_i - ts_i \geq te_i \quad \forall i \in V_e \quad (13)$$

$$ta_i \geq 0 \quad \forall i \in V_c \quad (14)$$

$$td_i \geq 0 \quad \forall i \in V_c \quad (15)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \in V \quad (16)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V_e \quad (17)$$

$$x_{ijr} \in \{0, 1\} \quad \forall \langle i, j, r \rangle \in E \quad (18)$$

A função objetivo é identificada por (1). Observe que, no que se refere ao custo total de

deslocamento, é mensurado o aumento do tempo de roteamento em relação a solução *offline*. Para isso é considerado além dos arcos inseridos, também os arcos retirados da solução. E isto é feito nos componentes da função objetivo cujo peso é $W3$, em que o custo do arco retirado é subtraído do custo do arco que liga a ordem comercial à (primeira) emergência.

As restrições identificadas por (2) e (3) indicam, respectivamente, que cada ponto referente a uma emergência deve ter sucessor e antecessor ou não é roteado, neste último caso a variável y assume valor 1. Na restrição (4) é definido que cada ponto de ordem comercial ou ponto de saída poderá ter no máximo um sucessor de emergência, e em (5) é definido que cada ordem comercial poderá ter um antecessor de emergência. A inclusão de uma emergência, ou de várias em sequência, implica no rompimento de uma rota comercial pela retirada de uma ligação entre dois pontos sucessivos. As restrições (6) e (7) garantem a reconstrução da rota, a primeira pela necessidade de que a emergência incluída seja ligada a outro ponto na mesma rota, e a segunda pela exigência de que exista uma ligação de um ponto de emergência com o restante da rota interrompida.

A restrição (8) estabelece os tempos nos pontos iniciais, e a restrição (9) define o tempo de finalização de uma emergência ou de uma ordem comercial que sucede uma emergência. A restrição (10) é semelhante, e define o tempo de finalização de uma ordem comercial que sucede outra comercial.

Pela restrição (11) é estabelecida a antecipação ou atraso de uma ordem em relação ao final do turno da equipe. Uma emergência pode ser terminada após o final do turno de uma equipe, mas deve ser iniciada antes, conforme a restrição (12). Além disso, conforme a restrição (13), uma emergência só pode ser incluída na rota em um instante posterior ao seu surgimento. As restrições (14) a (18) definem o domínio das variáveis de decisão.

É interessante observar que restrição (11) é igualmente satisfeita para qualquer par de valores em que $ta_i - td_i = T - t_i$, o que permite que ta_i cresça irrestritamente (acompanhado por td_i) quando o peso $W2$ for maior que $W1$. Por isso, na aplicação do modelo em situações práticas, foi considerada sempre a situação contrária, em que $W1 > W2$, caso em que a própria função objetivo restringe este crescimento pela importância dada à minimização de td_i .

Na Figura 1 é apresentado um trecho de rota comercial composto pelas ordens i, j e k , que sofre alteração pela inclusão da ordem emergencial l entre i e j . Obviamente, o tempo da ordem j após a inclusão, t'_j , pode ser calculado em função do tempo t_j (antes da inclusão) e dos arcos incluídos e retirados da rota:

$$t'_j = t_j - c'_{ij} + c'_{il} + c'_{lj}$$

Porém a inclusão de uma emergência em uma rota sempre provoca o atraso nas ordens de serviço posteriores. Isto permite que a definição do tempo t_i de uma ordem posterior a uma emergência seja calculado conforme a restrição (9), sem a necessidade de retirar explicitamente o custo do deslocamento entre i e j .

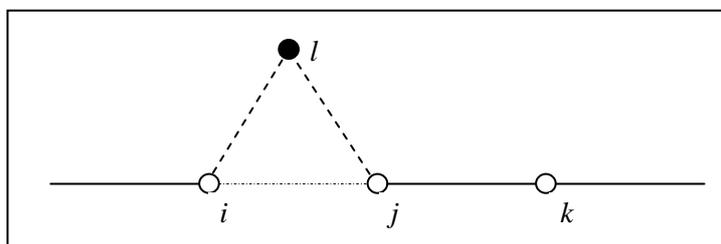


Figura 1. Alteração na rota pela inclusão de uma ordem emergencial

Por fim, é interessante notar a possibilidade de diferença de nas grandezas de valores entre os cinco componentes da função objetivo. Uma alternativa para tratar isso seria a normalização dos valores. Porém, o fato de que o roteamento é feito sempre dentro de limites estabelecidos pelo distritamento permite que se considere que cada fator se mantém sempre dentro de um intervalo de mesma ordem de grandeza entre uma execução e outra, e o tratamento

das variações entre os diferentes fatores em cada execução é feita através dos pesos.

5. Resultados

O modelo foi testado com instâncias reais, construídas a partir de históricos de eventos obtidos junto a uma concessionária de distribuição de energia elétrica, e se referem a ordens de serviço concentradas em uma região metropolitana da região sul do Brasil. Nestes dados, a localização dos pontos de atendimento das ordens de serviço é indicada por pares <latitude, longitude>, e o custo de deslocamento c_{ij} é calculado em função da distância euclidiana entre os pontos e da velocidade média das equipes. Esta é uma aproximação já usada pela própria concessionária na construção das rotas comerciais.

Para ilustrar o uso do modelo na inclusão das ordens de emergências nas rotas comerciais, será apresentada através de figuras a solução encontrada para uma instância com 3 equipes, 57 ordens comerciais e 9 ordens de emergência. Na Figura 2, é apresentada graficamente a instância: em (a) os pontos de atendimento comercial são identificados com pequenos círculos, enquanto as emergências são identificadas por 'x' e a base das equipes pelo pequeno quadrado no topo da figura; em (b), (c) e (d) são apresentadas as rotas comerciais das três equipes.

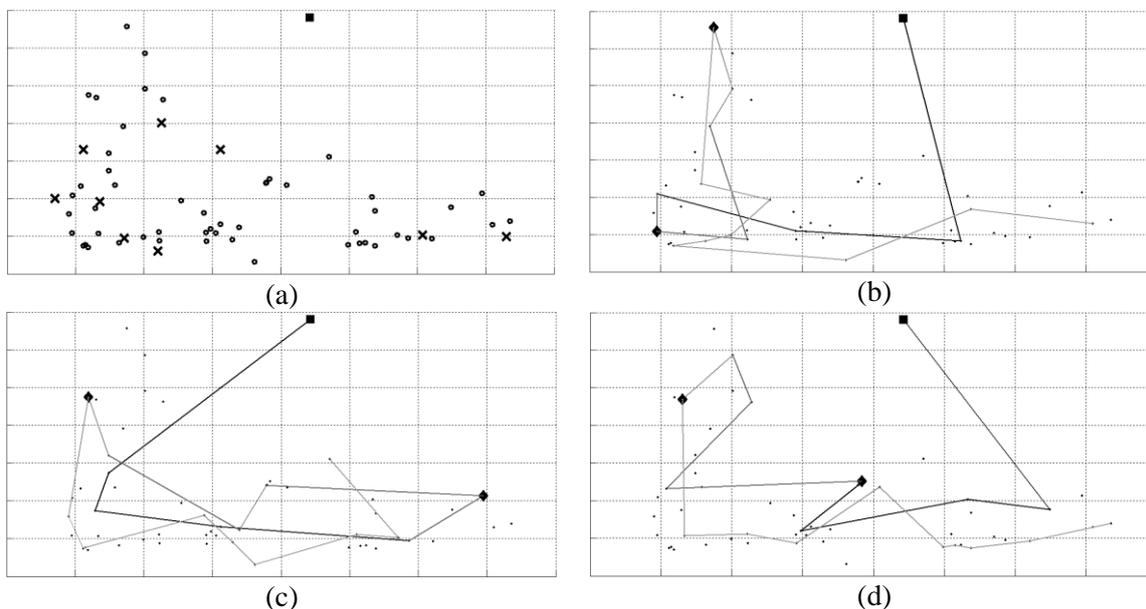


Figura 2. (a) Representação gráfica da instância, (b) rota comercial da equipe 1, (c) rota comercial da equipe 2, (d) rota comercial da equipe 3.

As configurações das três rotas da Figura 2 respeitam as prioridades das ordens de serviço comerciais. Por isso, foram inseridos nas figuras marcadores, na forma de losangos, que identificam o fim de um trecho de ordens de mesma prioridade. Em cada rota, o trecho entre a base e o primeiro losango representa o atendimento das ordens p_0 , de maior prioridade, e é seguido pelos trechos das ordens p_1 e depois p_2 . Não há, nestas rotas, atendimentos de ordens do nível de prioridade p_3 .

As emergências previstas na instância estão concentradas em dois intervalos de cerca de 30 minutos, um começando por volta de 10h e terminando por volta de 10h30min, e outro ocorrendo aproximadamente entre 16h e 16h30min. A concentração de emergências é comum, em virtude de serem decorrentes de eventos que afetam a rede, em geral eventos climáticos. Como decorrência da concentração, as emergências do primeiro intervalo coincidiram, em todas as três rotas, com a execução dos trechos de atendimento de ordens de prioridade p_0 , e as emergências do segundo intervalo coincidiram com a execução dos trechos de atendimento das ordens de prioridade p_2 .

A validação do modelo foi feita mediante a sua aplicação *offline*, gerando a solução a partir da leitura da instância antes da partida das equipes e com o conhecimento do local e do instante de surgimento de cada emergência. Este tipo de análise é interessante em problemas dinâmicos porque a solução ótima *offline* fornece um limitante inferior para o problema *online*. Os pesos da função objetivo foram definidos com os seguintes valores: $W1= 0,1$, $W2=0,04$, $W3=0,2$, $W4=0,33$ e $W5 = 0,33$. A Figura 2 apresenta as alterações nas rotas comerciais em função da inclusão das emergências, com os pontos emergenciais representados por círculos grandes, a rota de atendimento em linhas finas, e os arcos retirados das rotas destacados em linhas mais grossas.

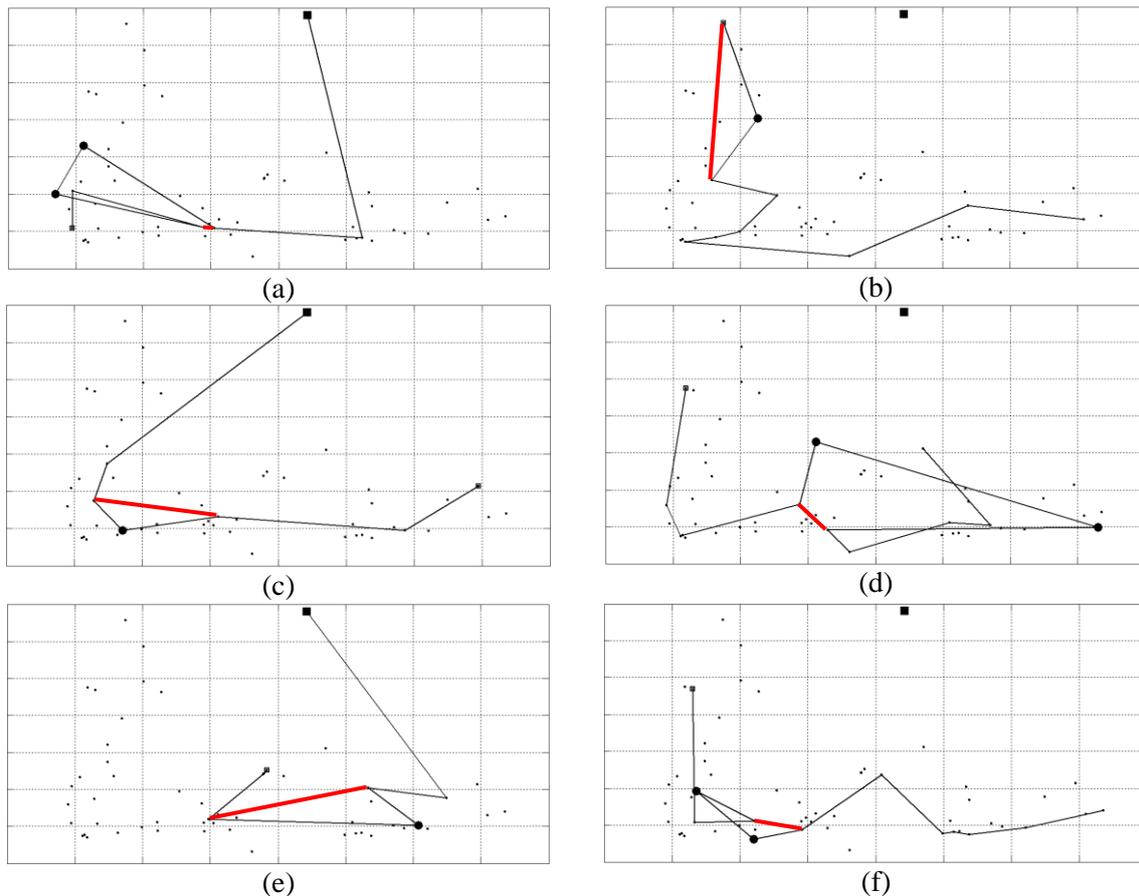


Figura 3. (a) Trecho p0 da rota 1, (b) trecho p2 da rota 1, (c) trecho p0 da rota 2, (d) trecho p2 da rota 2, (e) trecho p0 da rota 3, (f) trecho p2 da rota 3.

A observação das rotas da Figura 3 torna evidente a dificuldade causada pela limitação tecnológica, que impede o replanejamento da rota comercial. Em rotas como as da Figura 3 (a) e da Figura 3 (d), o custo de deslocamento para reconectar o primeiro trecho da rota comercial, anterior às emergências, com o segundo trecho, posterior às emergências, é muito grande. A retirada da restrição (6) do modelo torna possível que a inclusão de emergências em rotas provoque a troca nos trechos seguintes às emergência. Testes foram realizados retirando esta restrição, e a simples possibilidade de troca nos trechos posteriores às emergências já apresentou custo total do roteamento em média 1% menor. Foram testados também outros pesos na função objetivo, e o modelo apresentou comportamento de acordo com o esperado.

As soluções foram computadas usando ILOG CPLEX 12.4, em uma máquina com processador Intel Core i7-3612QM 2.10GHz, com 8 GB RAM e com sistema operacional Ubuntu 12.04.2 LTS. Os resultados da instância de exemplo apresentada foram obtidos com 500 segundos de execução.

6. Conclusões

Este trabalho apresenta um modelo matemático para o problema do despacho de ordens de emergência em uma concessionária de distribuição de energia elétrica. No planejamento do despacho, é necessário considerar a importância de que todas as emergências surgidas sejam incluídas no planejamento, e a latência do seu atendimento seja reduzida.

A execução das ordens de emergência é atribuição de equipes multitarefa, responsáveis também pela execução das ordens comerciais. A dificuldade de comunicação com as equipes em campo faz com que o roteamento comercial não possa ser alterado, ou seja, as ordens comerciais devem permanecer nas mesmas equipes e na mesma sequência entre si. Por isso, é necessário reduzir o prejuízo causado pela inclusão das ordens emergenciais nas rotas comerciais, e a função objetivo prevê componentes para evitar atrasos nas ordens comerciais além do turno das equipes, para reduzir o risco de que estes atrasos aconteçam, e para reduzir o custo total de deslocamento.

O modelo apresentado foi testado com dados reais obtidos junto a uma concessionária de distribuição de energia elétrica, demonstram que o modelo é consistente e representa adequadamente o problema estudado. Além disso, foi possível avaliar o prejuízo para o roteamento causado por limitações tecnológicas que impedem o replanejamento das rotas comerciais.

O modelo considera ainda que o atendimento das ordens de serviço não admite preempção. A possibilidade de abandonar o atendimento de uma ordem, principalmente uma ordem comercial frente a uma emergência, é uma característica a ser estudada futuramente.

Por fim, em situações de crise, como eventos climáticos extremos, é grande o volume de emergências surgidas em curtos espaços de tempo. Por isso, o tempo computacional necessário para gerar soluções a partir das instâncias testadas aponta para a necessidade de buscar novos métodos. Novas alternativas para a obtenção de soluções ótimas serão consideradas em trabalhos futuros, além de métodos heurísticos que representem vantagem no critério de tempo real.

Referências

- Allulli, L., Ausiello, G., Bonifaci, V., & Laura, L.** (2008). On the power of lookahead in on-line server routing problems. *Theoretical Computer Science*, 408(2-3), 116–128.
- Calvo, R. W., e Touati-Moungla, N.** (2011). A matheuristic for the dial-a-ride problem. *Network Optimization - 5th International Conference*.
- Dewilde, T., Cattrysse, D., Coene, S., Spieksma, F. C. R., e Vansteenwegen, P.** (2010). Heuristics for the Traveling Repairman Problem with Profits. 10th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS'10), 34–44.
- Ghiani, G., Guerriero, F., Laporte, G., e Musmanno, R.** (2003). Real-time vehicle routing: Solution concepts, algorithms and parallel computing strategies. *European Journal of Operational Research*, 151(1), 1–11.
- Grötschel, M., Krumke, S. O., Rambau, J., Winter, T. e Zimmermann, U. T.**, Combinatorial Online Optimization in Real Time. ZIB-Report, Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin, 2001.
- Klundert, J. van de, e Wormer, L.** (2010). ASAP: The After-Salesman Problem. *Manufacturing & Service Operations Management*, 12(4), 627–641.
- Kovacs, A. a., Parragh, S. N., Doerner, K. F., e Hartl, R. F.** (2011). Adaptive large neighborhood search for service technician routing and scheduling problems. *Journal of Scheduling*, 15(5), 579–600.
- 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.
- Li, J., Mirchandani, P., e Borenstein, D.** (2009). Real-time vehicle rerouting problems with time windows. *European Journal of Operational Research*, 194, 711–727.
- Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., e Medaglia, A. L.** (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*. 225(1), 1-11.

Toth, P. e Vigo, D. The Vehicle Routing Problem. *Discrete Math, Siam Monographs on Discrete Mathematics and Applications*, 2001.

Weintraub, A., Aboud, J., Fernández, C., Laporte, G. e Ramírez, E. (1999). An Emergency Vehicle Dispatching System for an Electric Utility in Chile. *The Journal of the Operational Research Society*, 50, 690-696.