

UMA CONTRIBUIÇÃO PARA O PROBLEMA DE ROTEIRIZAÇÃO DINÂMICA DE VEÍCULOS COM JANELAS DE TEMPO

Orivalde Soares da Silva Júnior

José Eugenio Leal

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

RESUMO

O Problema de Roteirização Dinâmica de Veículos com Janela de Tempo tem como objetivo determinar as rotas de custo mínimo para uma frota de veículos de mesma capacidade, atendendo a demanda de um conjunto de clientes dentro de um intervalo de tempo, denominado janela de tempo. Além disto, novos clientes podem ser inseridos ao conjunto de clientes durante a realização das rotas pelos veículos, o que caracteriza o problema como sendo dinâmico. Este trabalho reúne diversos métodos propostos na literatura para solução deste problema, os quais são categorizados em métodos estocásticos, métodos de operações locais rápidas e métodos de re-roteirização. Uma estratégia de divisão do horizonte de planejamento em faixas de tempo foi detalhada, a qual foi utilizada no algoritmo de re-roteirização proposto para resolver o problema dinâmico.

ABSTRACT

The goal of the Dynamic Vehicle Routing Problem with Time Window is to determine minimum cost routes for a fleet of vehicles of the same capacity, meeting the demand of a set of customers within a given time interval, known as time window. In addition, new customers can be inserted to the set of clients during the execution of the vehicles routes, which characterizes the problem as dynamic. This work brings together various methods proposed in the literature for solving this problem, which are categorized as stochastic methods, fast local operations methods and re-routing methods. A strategy of splitting planning horizon in time slots was detailed, which was used in the re-routing algorithm proposed for solving the dynamic problem.

1. INTRODUÇÃO

No problema de roteirização de veículos com janelas de tempo (*Vehicle Routing Problem with Time Windows - VRPTW*), uma frota de veículos com capacidade limitada deve ser roteirizada para atender um conjunto de clientes através de uma sequência com custo mínimo (distância total percorrida ou o tempo total de viagem do veículo) e dentro dos intervalos previamente estipulados pelos clientes. Este problema é conhecido como um problema estático, pois todos os pedidos de serviço e dados dos clientes, tais como localização, demanda e janela de tempo, são conhecidos antes da construção das rotas e estes dados não se alteram.

O problema de roteirização dinâmica de veículos com janelas de tempo (*Dynamic Vehicle Routing Problem with Time Windows - DVRPTW*) é uma nova classe de problemas que emergiu nas últimas décadas devido aos recentes avanços tecnológicos na comunicação e tecnologias de informação como a troca eletrônica de dados (*Electronic Data Interchange - EDI*), sistemas de posicionamento global (*Geographic Positioning Systems - GPS*), sistemas de informações geográficas (*Geographic Information Systems - GIS*) e sistemas de transporte inteligente (*Intelligent Transportation Systems - ITS*). Estas tecnologias permitem o processamento de novas informações, tais como a quebra, ou atraso de um veículo, a chegada de uma nova requisição de cliente que deve ser atendida dentro do período, o cancelamento de pedidos, e a alteração nos tempos e custos de trajetos.

Dentro deste novo contexto, surgem diversas áreas ainda pouco exploradas neste problema. A incerteza pode estar associada às diversas variáveis do problema, que são reveladas ao longo do horizonte de planejamento. Neste trabalho, a incerteza vem da ocorrência de novos pedidos de serviço que devem ser atribuídos em tempo real para um veículo apropriado.

Problemas de roteirização dinâmica podem ser aplicados em diferentes áreas, tais como, sistemas expressos (*feeder systems*), ou serviços conhecidos como *dial-a-ride* e que consiste no transporte de passageiros com requisitos necessidades especiais (Gendreau e Potvin, 1998), serviços de coleta e entrega realizada pelo serviço de correios (*courier services*), no qual o veículo vazio parte do depósito e coleta e entrega as encomendas dos clientes (Gendreau et al., 1999), entrega de produtos derivados do petróleo ou gases industriais, no qual os veículos são carregados no depósito geralmente com apenas um tipo de produto e entregam uma parcela da carga para cada cliente (Bell et al., 1983, Brown et al. 1987, Bausch et al. 1995) e serviços de emergência (Gendreau et al., 1997).

Os objetivos deste trabalho são revisar, na literatura, os trabalhos sobre roteirização dinâmica e propor um algoritmo para resolvê-lo. O problema tratado será aplicado a uma frota homogênea de veículos. O trabalho está organizado como se segue. Na seção 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica do problema estático. Na seção 3, apresenta-se o problema dinâmico. Na seção 4 apresenta-se a estratégia da divisão da jornada de trabalho em faixas de tempo. Na seção 5 apresenta-se o algoritmo proposto para resolver o problema dinâmico. Finalmente, na seção 6, são apresentadas as conclusões da pesquisa.

2. O PROBLEMA ESTÁTICO

A versão estática do problema estudado neste trabalho é conhecida como o problema de roteirização de veículos com janelas de tempo (VRPTW). O VRPTW pode ser descrito por um grafo $G(N,A)$, onde N é um conjunto contendo todos os nós, e A é um conjunto contendo todas as arestas. Os nós representam os clientes e o depósito, os quais são representados através dos índices i ou j . O depósito, de onde partirão as rotas, usualmente é representado pelo nó com índice 0. As arestas representam os caminhos que ligam estes nós e são acessadas através do par ordenado ij . Considera-se o grafo como sendo completo, o que não representa de forma alguma uma redução da dificuldade do problema. Cada aresta ij possui um custo c_{ij} associado. Este custo é, usualmente, o comprimento de cada arco. No caso do VRPTW, este custo será o tempo necessário para percorrer cada aresta.

No depósito, existem V veículos homogêneos v à disposição, com uma capacidade K_v . Cada cliente i possui uma demanda $d_i \geq 0$ associada, bem como um tempo de serviço s_i . Além disso, cada cliente possui também sua janela de tempo, durante a qual deverá ser servido. Esta janela é dada por $[a_i, b_i]$, sendo que a_i representa o horário de início do atendimento e b_i a hora limite para que um veículo chegue ao cliente para ser atendido. O depósito possui demanda zero, tempo de serviço zero e sua janela de tempo se estende desde a hora zero até uma hora que representa o fim da jornada de trabalho.

O objetivo do problema é encontrar rotas de tempo total mínimo que atendam todos os clientes, respeitando as restrições de capacidade dos veículos e das janelas de tempo. Além disso, deseja-se encontrar o número mínimo de veículos necessários para a realização da tarefa. Na literatura, é comum definir uma hierarquização de objetivos para este problema, na qual a minimização do número de veículos é mais importante que o custo variável das rotas. Para isto, devem ser associados custos aos veículos utilizados, assim como no trabalho de Cunha e Gualda (1999), que atribui para cada veículo, um custo unitário variável com a distância, um custo fixo diário total e um custo horário. No entanto, o modelo matemático apresentado a seguir visa apenas a minimização do tempo total percorrido pelos veículos.

2.1. Modelo matemático para o VRPTW estático

O modelo matemático do VRPTW estático apresentado neste trabalho foi proposto por Kohl et al. (1999), tendo sido realizadas apenas algumas alterações na notação matemática e a inserção de um índice para capacidade dos veículos. Este modelo visa a minimização do tempo total de entrega de cargas, considerando as restrições de janelas de tempo e de capacidade dos veículos. As demandas a serem transportadas são determinísticas e conhecidas a priori e todos os veículos possuem a mesma capacidade (frota homogênea).

Seja N o número de clientes a serem atendidos. Cada cliente $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ deve ser visitado uma única vez. A cada cliente $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ estão associados:

- um tempo de atendimento $s_i \geq 0$;
- uma janela de tempo $[a_i, b_i]$, $a_i \leq b_i$, que define, respectivamente, o horário mais cedo e o horário mais tarde em que pode ser iniciado o atendimento;
- uma demanda $d_i \geq 0$ de carga a ser entregue.

O nó 0 e sua cópia indicada por $N+1$ representam, respectivamente, a base de saída e de chegada dos veículos (depósito). A cada um destes nós estão associados tempos de atendimento e demanda iguais à zero e janelas de tempo que indicam os horários permitidos de saída e de chegada dos veículos às base.

Para o atendimento dos N clientes dispõe-se de uma frota composta de V veículos. Para cada veículo v da frota disponível, $v = 1, 2, \dots, V$ é definida uma capacidade máxima K_v . A formulação matemática do VRPTW compreende as seguintes variáveis de decisão:

$$x_{ij}^v = \begin{cases} 1, & \text{se } j \text{ é atendido após } i \text{ pelo veículo } v \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

T_i = horário de início de atendimento em i , $i \in \{1, 2, \dots, N\}$

O modelo matemático do VRPTW é apresentado a seguir:

$$(VRPTW) \min \sum_{v=1}^V \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^{N+1} c_{ij} x_{ij}^v \quad (1)$$

$$\sum_{v=1}^V \sum_{j=1}^{N+1} x_{ij}^v = 1 \quad i = 0, 1, 2, \dots, N; i \neq j \quad (2)$$

$$\sum_{j=0}^{N+1} x_{0j}^v = 1 \quad v = 1, 2, \dots, V \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^N x_{ij}^v - \sum_{i=1}^{N+1} x_{ji}^v = 0 \quad j = 1, N; v = 1, 2, \dots, V \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^{N+1} x_{i, N+1}^v = 1 \quad v = 1, 2, \dots, V \quad (5)$$

$$a_i \leq T_i \leq b_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$T_i + s_i + t_{ij} - T_j \leq (1 - x_{ij}^v) M_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N; j \neq i; v = 1, 2, \dots, V \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^N d_j x_{ij}^v \leq K_v \quad v = 1, 2, \dots, V \quad (8)$$

$$x_{ij}^v \in \{0, 1\} \quad i = 0, 1, 2, \dots, N; \quad j = 0, 1, 2, \dots, N+1; \quad v = 1, 2, \dots, V \quad (9)$$

A função objetivo (1) representa o tempo total a ser minimizado. As restrições (2) asseguram que cada cliente seja visitado uma única vez e por um único veículo; as restrições (3) asseguram que todo veículo inicie uma rota a partir do depósito (nó 0); as restrições (4) impõem que todo veículo deve entrar e sair de um cliente; as restrições (5) impõem que todo veículo termine uma rota no depósito (nó $N+1$). Caso o veículo não seja utilizado, ele segue o caminho do arco direto ligando a base de partida (nó 0) à base de chegada (nó $N+1$). As restrições (6) impõem que o horário de início de atendimento de cada nó ocorra dentro da sua respectiva janela de tempo. As restrições (7) estabelecem a relação entre o horário de partida do veículo a partir de um cliente e seu sucessor imediato, garantindo também a eliminação de sub-rotas. As restrições de capacidade de carga são dadas pela expressão (8). Por fim, as restrições (9) asseguram a integralidade da solução. As restrições (7) foram obtidas a partir da linearização das restrições originais não-lineares representadas pela expressão (10), o que foi possível através da condição de integralidade representadas pelas restrições (9). O valor da constante M_{ij} nas restrições pode ser substituído por $\max(b_i + s_i + t_{ij} - a_i, 0)$, $i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$.

$$x_{ij}^v (T_i + s_i + t_{ij} - T_j) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, N; \quad j \neq i; \quad v = 1, 2, \dots, V \quad (10)$$

Uma segunda abordagem, conforme a expressão (12), foi proposta por Desrochers e Laporte (1991) para as restrições de eliminação de sub-rotas. Uma comparação entre o desempenho computacional destas duas abordagens pode ser encontrada no trabalho de Silva Júnior e Hamacher (2010).

$$T_i - T_j + (b_i + t_{ij} + s_i + a_i) \leq b_i - a_i \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad j = 1, 2, \dots, N; \quad j \neq i \quad (11)$$

3. O PROBLEMA DINÂMICO

Na versão dinâmica do problema abordado neste trabalho, um conjunto de veículos é encaminhado ao longo de um horizonte de tempo específico (geralmente um dia) para atender aos pedidos conhecidos até o momento, enquanto são realizados novos pedidos pelos clientes em tempo real. A cada novo pedido, a solução atual pode ser reconfigurada para melhor atendê-lo, assim como aqueles que já foram atribuídos às rotas. Segundo Gendreau et al. (1999), esta situação influencia o método de resolução do problema estático de várias formas, como descrito a seguir:

Tempo limite de processamento de pedidos: Os pedidos devem ser recebidos antes de um prazo fixado para ser atendido no mesmo dia. Aqueles que forem recebidos após o prazo não são atendidos ou podem ser mantidos para o dia seguinte. O dia de operações, portanto, começa com um número de pedidos pendentes ou estáticos para que uma solução possa ser previamente construída.

Incerteza do problema: A incerteza vem de uma única fonte que é a ocorrência de novas solicitações de serviços. Não há incerteza associada com a localização do serviço, tempos de viagem, demanda e janelas de tempo.

Atualização cíclica ou em Tempo real: A comunicação entre a central e os motoristas é realizada em tempo real ou em intervalos pré-definidos para informar os próximos pedidos a serem atendidos. Então os motoristas conhecem parte dos clientes ou apenas o próximo cliente a ser atendido, ao contrário do problema estático em que o motorista conhece a rota completa.

Preemptivo e Não-preemptivo: Se estiver prevista alguma espera dos motoristas no próximo destino, eles são convidados a esperar na sua localização atual. Esta é uma estratégia de compromisso dos pedidos, pois todo movimento é realizado no último minuto possível, para permitir que sejam realizadas alterações recentes na rota devido à chegada dos pedidos de novos pedidos. Uma vez que um motorista está a caminho de seu próximo destino, deverá atender esta localização. Por esta característica, o problema recebe o nome de não-preemptivo, ou seja, não são permitidos desvios ou interrupções na rota. A figura 1 ilustra o funcionamento do roteirização dinâmica sem e com a possibilidade de desvio do destino atual.

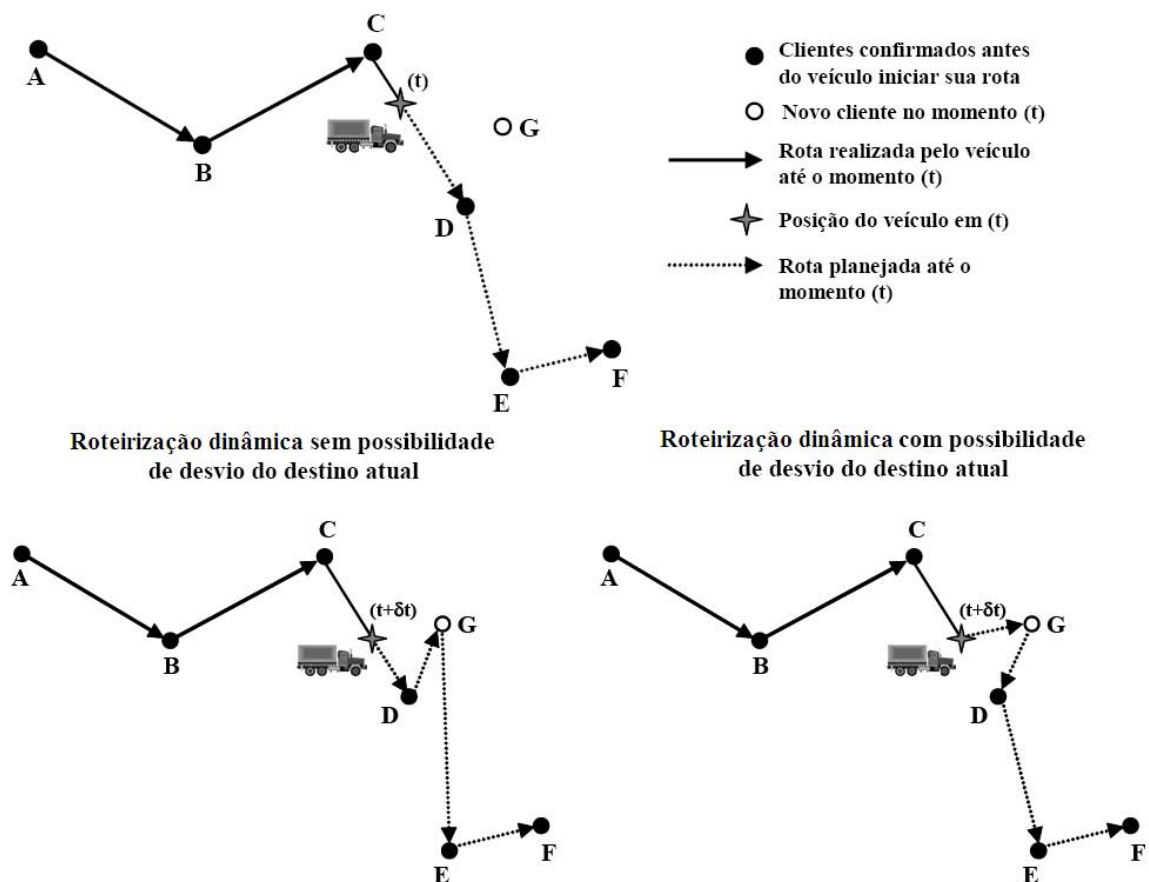


Figura 1: Exemplo de Roteirização Dinâmica

Outras diferenças entre os problema estático e dinâmico são discutidas por Psaraftis (1988) e (1995). Psaraftis (1988) também diferencia as duas classes de problemas em termos de atributos da informação utilizada como entrada para os respectivos tipos de problemas.

Um aspecto importante em problemas de roteirização dinâmica é o percentual de ordens de serviço que são dinâmicas, o qual é denominado grau de dinamismo. Larsen et al. (2002) propõe um quadro de sistemas de roteirização baseando neste grau de dinamismo. Os sistemas são divididos em fracamente, moderadamente e fortemente dinâmicos, e seus graus de dinamismo são, respectivamente, 0-30%, 30-80% e 80-100%.

Para Larsen et al. (2002), o grau de dinamismo influencia diretamente na escolha do método a ser utilizado para obter as rotas. Para sistemas fracamente e moderadamente dinâmicos, são obtidos melhores resultados com métodos de re-roteirização. Já para sistemas fortemente dinâmicos, são obtidos melhores resultados com os métodos de operações locais rápidas, como os métodos de inserção e do vizinho mais próximo. E para sistemas moderadamente e fortemente dinâmicos são obtidos bons resultados utilizando métodos estocásticos.

3.1. Métodos estocásticos

Os trabalhos endereçados ao problema dinâmico investigam a inclusão de informações dinâmicas e/ou elementos estocásticos na roteirização de veículos. Neste contexto, existem duas vertentes importantes para esta classe de problema, que são modelos de otimização baseados em informações conhecidas a priori e modelos de otimização baseados em informações conhecidas em tempo real.

Os modelos baseados em informações conhecidas a priori significam que o planejador determina uma ou mais rotas com base em informações probabilísticas sobre futuros pedidos, como a posição dos clientes, as demandas, os tempos de viagem e outros parâmetros. Dentro deste cenário, as rotas são planejadas antes dos veículos deixarem o depósito e o problema é resolvido como um problema de natureza estática. A principal dificuldade destes modelos consiste na necessidade de possuir informações históricas suficientes para determinar a ocorrência de novos pedidos e o momento em que são solicitados. Estes modelos podem ser encontrados nos trabalhos de Jezequel (1985), Bertsimas (1993) e Powell et al. (1995).

Já nos modelos baseados em informações conhecidas em tempo real, as rotas são construídas durante o dia de trabalho, quando os veículos já saíram do depósito e estão realizando a efetivação das rotas. Diferente dos modelos a priori, nestes modelos não são considerados elementos estocásticos. Todos ou parte dos pedidos são revelados em tempo real. Inicialmente, os veículos são programados para atender os pedidos já conhecidos. Novos pedidos surgem, em tempo real, durante o dia de operações e são inseridos nas rotas já programadas. Esta inserção é geralmente uma tarefa complicada e que leva ao re-planejamento parcial ou até total das rotas. A complexidade de um problema de roteirização é diretamente afetada pela dificuldade de inserir pedidos dinâmicos nas rotas. A presença de janelas de tempo no problema contribui significativamente na dificuldade de inserção, podendo levar à rejeição de alguns destes pedidos.

3.2. Métodos de operações locais rápidas

Estes métodos fornecem soluções rápidas e os mais conhecidos são: método de inserção e método do vizinho mais próximo. O método de inserção consiste em construir a solução a partir de inserções consecutivas de ordens de serviço dinâmicas na solução atual a medida que estão sendo solicitadas. As ordens de serviço são sempre inseridas entre todos os possíveis pares de nós. A solução escolhida será aquela que não viola as restrições do problema e que possui o menor custo.

O método do vizinho mais próximo consiste em construir a solução partindo do depósito e atribuindo sequencialmente à solução, a ordem de serviço mais próxima da posição atual. Quando não houver mais vizinhos disponíveis, devido às restrições do problema, realiza-se o retorno ao depósito. Uma revisão mais detalhada sobre a aplicação e adaptação destes

métodos pode ser encontrada nos trabalhos de Trudeau et al. (1989), Wilson e Colvin (1977), Rousseau e Roy (1988), Solonki (1991) e Madsen et al. (1995).

Estes métodos são fáceis de se implementar e são apropriados em ambientes onde o tempo de reação é mais importante que a qualidade das soluções. Entretanto, esta é uma aproximação míope porque as soluções são produzidas por inserções consecutivas. Para cobrir esta lacuna, alguns autores combinam operações locais com procedimentos de melhora ou re-otimização. Estes são caracterizados pela execução de um conjunto de inserções seguidas por uma busca local, como por exemplo o procedimento de trocas sucessivas do tipo k-opt, como o procedimento 2-opt proposto por Lin (1965). Para diferentes aplicações reportadas na literatura, veja Rivard (1981), Roy et al. (1985), Gendreau et al. (1996a, 1996b).

3.3. Métodos de re-roteirização

Estes métodos são mais sofisticados que os métodos de operações locais rápidas e envolvem tipicamente a re-otimização das rotas a partir da ocorrência de novas entradas de dados no problema. Muitos pesquisadores tem utilizado esta aproximação como Bell et al. (1983), Hill et al. (1988), Brown et al. (1987), Psaraftis (1980, 1983), Psaraftis et al. (1985), Powell et al. (1988), Dial (1995), Lackner (2004) e Silva Júnior e Leal (2009). Esta aproximação requer um tempo computacional maior que os métodos de execução rápida, devido à execução repetitiva do algoritmo estático. Esta desvantagem é mais crítica quando novos eventos ocorrem frequentemente e quando a execução do algoritmo estático é requerida mais vezes. Por outro lado, esta aproximação fornece melhores soluções.

Basicamente, os métodos de re-roteirização consistem em resolver uma sequência de problemas estáticos utilizando todas as ordens de serviço pendentes, ou seja, que não foram atendidas até instante atual dentro do horizonte de planejamento. As soluções parciais definirão uma solução final, a qual será obtida por completo ao fim da jornada de trabalho.

Contudo, os métodos de solução de problemas estáticos necessitam de algumas adaptações para resolverem esta sequência de problemas estáticos.

3.4. Adaptações realizadas no problema estático

Uma boa aproximação para solução do problema dinâmico utilizada por diversos autores consiste na adaptação do problema estático para o problema dinâmico. Basicamente, o problema dinâmico consiste numa sequência de problemas estáticos PE_n que são resolvidos individualmente para um horizonte de planejamento. O primeiro problema estático, PE_0 , contém os pedidos realizados no dia anterior. Este problema pode ser resolvido através do método original de solução de problemas estáticos, sem necessidade de adaptações. A partir das soluções obtidas por este método, são criadas rotas parciais para os veículos.

Após o término do intervalo pré-definido (*Atualização cíclica*) ou a entrada de um pedido (*Tempo real*), são atualizadas as informações dos veículos e é resolvido um novo problema estático PE_I . Este problema contém os pedidos não atendidos juntos com os novos pedidos. Para resolver este problema, o método de solução de problemas estáticos necessita das seguintes adaptações:

- Deve ser criado um novo conjunto PA, que contém as posições atuais (último cliente atendido) de cada veículo v ;

- O conjunto de pontos N deve conter o depósito, os pedidos não-atendidos, os novos pedidos e os elementos de PA;
- O veículo v deve iniciar a rota a partir de PA_v e não a partir do depósito;
- A capacidade K_v para todo veículo v deve ser inicializada com a capacidade residual, ou seja, com o valor da capacidade original subtraída pela demanda d_i dos pedidos i já atendidos pelo veículo v ;
- O horário de início de atendimento T_i para todo pedido $i \in PA$, deve ser fixado com o valor de T_{PA_v} , ou seja, com o horário de início de atendimento do último pedido atendido pelo veículo v .
- O problema passa a ter mais de um objetivo. Além de minimizar o tempo total das rotas, deve-se maximizar o número de pedidos dinâmicos atendidos.

A partir das soluções obtidas, são criadas novas rotas parciais para os veículos e, na sequência, novos problemas estáticos PE_3, \dots, PE_{n-1} são resolvidos. Finalmente, após o recebimento do último pedido do dia, tem-se o PE_f com as informações completas. É interessante apontar também que a resolução exata da sequência de subproblemas $PE_1, PE_2, PE_3, \dots, PE_{n-1}$ não leva necessariamente à melhor solução de PE_f , mas é uma boa aproximação para a solução do problema dinâmico.

Analisando esta decomposição em subproblemas, poderia-se imaginar que a melhor solução para o problema é dada pela resolução exata do PE_f . No entanto, esta situação não existe, pois nenhum veículo haveria iniciado a sua rota no momento em que o PE_f é conhecido. Alguns autores utilizam elementos estocásticos em seus métodos para realizar uma previsão sobre como será o PE_f . No entanto, segundo Larsen (2002), a inclusão de elementos estocásticos pode trazer bons resultados em sistemas moderadamente e fortemente dinâmicos, nos quais não se conhece a maior parte dos pedidos antes dos veículos deixarem o depósito.

4. ESTRATÉGIA DA DIVISÃO DA JORNADA DE TRABALHO

Kilby et al. (1998) e Montemanni et al. (2002) utilizaram-se desta estratégia em seus métodos e que consiste no conceito de dividir o dia de trabalho em faixas de tempo de tamanhos iguais. Portanto, para um dia de trabalho que possui um total T segundos é dividido em n_{ts} faixas de tempo, cada faixa de tempo T_{ts} possui T/n_{ts} segundos. Com o decorrer do tempo são recebidos novos pedidos e para cada faixa de tempo é resolvido um problema estático do VRPTW.

Todos os novos pedidos recebidos antes de um dado tempo limite T_{co} (*time of cutoff*) são aceitos e processados durante o dia de trabalho. Os pedidos recebidos depois do tempo limite T_{co} não são atendidos no dia atual e são atribuídos ao próximo dia de trabalho. Por exemplo, se o um dia de trabalho inicia às 7h e termina às 17h (total de 10 horas de trabalho) e a política da empresa consiste em aceitar novos pedidos até metade às 12h, então T_{co} será igual a 5. No primeiro problema estático são considerados apenas os pedidos não atendidos do dia anterior, os quais são utilizados para obter a primeira solução.

No final de cada faixa de tempo, analisa-se a melhor solução encontrada pelo algoritmo estático e atribuem os novos pedidos aos veículos. Dado que, o tempo de processamento T_p (*Process Time*) representa o horário de chegada do veículo somado ao tempo de serviço, atribui-se aos veículos os pedidos com o valor $T_{ts(i)} \leq T_p \leq T_{ts(i+1)}$, onde i representa o índice da faixa de tempo atual. Desta forma, os motoristas dos veículos conhecerão seus destinos à medida que avança a faixa de tempo.

Um problema que surge desta consideração anterior é que ao atender o último pedido, o veículo deverá aguardar o recebimento de seus próximos destinos. Para contornar este problema foi utilizada uma estratégia denominada tempo de compromisso avançado, T_{ac} (*advanced commitment time*) a qual consiste em comprometer as ordens com tempo de processamento iniciando nos próximos $T_{ts} + T_{ac}$ segundos, conforme ilustra a figura 2. Esta estratégia permite que seja comprometido ao menos o próximo destino do veículo.

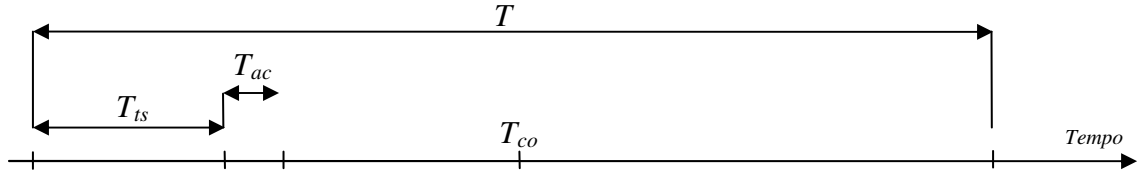


Figura 2: Conceito da divisão da jornada de trabalho em faixas de tempo

Uma exceção desta estratégia ocorre quando o veículo deve retornar ao depósito. Assim, o retorno ao depósito ocorre apenas em duas condições. A primeira ocorre quando todos os clientes do dia de trabalho já foram atendidos e a segunda quando a capacidade do veículo for totalmente utilizada. Quando nenhuma destas condições ocorrerem e o veículo não conhecer seu próximo destino, então ele deverá aguardar novas instruções no cliente atual. Isto ocorre porque as rotas podem ser replanejadas e novos pedidos podem ser atribuídos aos veículos.

Após o primeiro problema estático, no qual os veículos saem dos depósitos com sua capacidade totalmente disponível, cada problema passa a considerar como ponto inicial para suas rotas os últimos pedidos atendidos pelos veículos. São considerados: o momento em que o veículo finalizou o serviço no último pedido atendido e a capacidade residual de cada veículo. Para isto, o algoritmo estático deve ser adaptado para considerar estes novos parâmetros.

A figura 3 ilustra as rotas de dois veículos obtidas a partir da execução de duas instâncias do problema estático. Os pontos representam o tempo de processamento T_p . Estes tempos são utilizados para definir os pedidos que serão comprometidos aos veículos. No primeiro tempo em $T_{ts(0)}$, os veículos iniciam suas rotas a partir do depósito com tempo atual e cargas iguais a zero. Comprometem-se então os pedidos que estão dentro da faixa de tempo. Os pedidos que estão fora da faixa de tempo atual não são comprometidos com nenhum veículo e serão utilizados novamente para criação das rotas do problema estático das faixas de tempo seguintes.

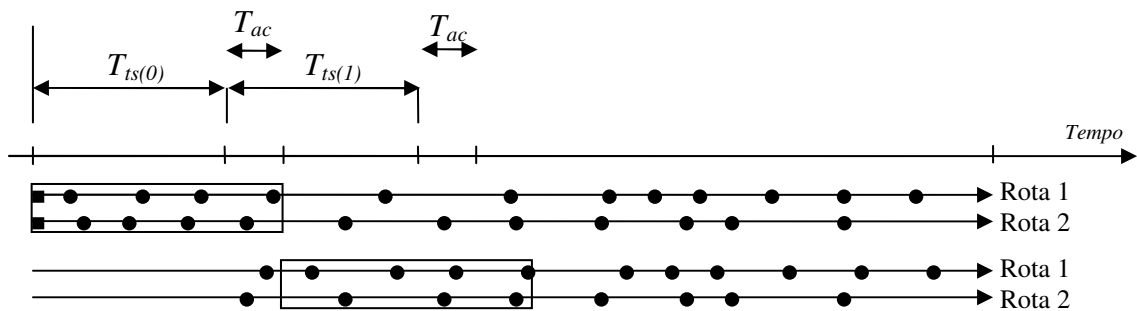


Figura 3: Funcionamento da estratégia de divisão da jornada de trabalho em faixas de tempo

No decorrer da faixa de tempo, novos pedidos são solicitados. Após o término da faixa, as rotas dos pedidos comprometidos são armazenadas e são atualizadas as posições dos veículos, os tempos atuais e as capacidades atuais. Com base nestas informações é resolvido o segundo problema estático de $T_{ts(1)}$. Comparando com a faixa de tempo anterior, nota-se que foram adicionados dois pedidos na Rota 1 e a Rota 2 manteve os mesmos pedidos definidos anteriormente, conforme ilustra a figura 3. Este processo continua até que todos os clientes sejam atendidos.

Uma exceção que pode ocorrer diz respeito à inviabilidade do atendimento de todos os pedidos com o número de veículos atualmente utilizado. Neste caso, pode ser tomada a decisão de não atender algum pedido solicitado recentemente, mesmo que tenha sido solicitado antes do tempo limite T_{co} ou pode ser utilizado um veículo adicional partindo do depósito, caso o depósito possua um veículo disponível.

5 UM ALGORITMO PARA O DVRPTW

A estratégia de solução do DVRPTW é resumida com auxílio do algoritmo da figura 4. O conjunto *OrdensPendentes* contém inicialmente todas as ordens conhecidas do dia anterior. As variáveis *Tempo* e *TempoVirtual* são inicializadas com 0 e a posição de todos os veículos é fixada no depósito.

Algoritmo DVRPTW

Tempo \leftarrow 0

TempoVirtual \leftarrow 0

OrdensPendentes \leftarrow ordens conhecidas antes do início do dia

Enquanto (*OrdensPendentes* $\neq \{ \}$ ou *Tempo* $< T_{co}$)

Se (*Tempo* > 0)

TempoVirtual = *Tempo* + T_{ac}

Fim se

ProblemaEstatico \leftarrow problema com *OrdensPendentes* e iniciando em *TempoVirtual*

 Executar AlgoritmoEstatico no *ProblemaEstatico*

OrdensComprometidas \leftarrow ordens com tempo de processamento \geq *Tempo* + T_{ts} + T_{ac}

 Entregar ordens de *OrdensComprometidas*

OrdensPendentes \leftarrow *OrdensPendentes* \setminus *OrdensComprometidas*

OrdensPendentes \leftarrow *OrdensPendentes* \cup {Ordens que apareceram nos últimos T_{ts} s}

Tempo \leftarrow *Tempo* + T_{ts}

 Atualiza as posições, capacidade e tempos de viagem dos veículos

Fim enquanto

Figura 4: Algoritmo do DVRPTW

Um processo iterativo é iniciado. Se o *Tempo* for maior que 0, então o *TempoVirtual* é atualizado para que sejam obtidas as próximas ordens que o veículo deve atender, conforme a estratégia do tempo de compromisso avançado (*advanced commitment time*). Um problema estático (*ProblemaEstatico*) é criado e resolvido com as ordens contidas em *OrdensPendentes* abrangendo a janela de tempo [*TempoVirtual*; *TempoVirtual* + T_{ts}] e algumas das ordens de serviço são comprometidas com os veículos e inseridas em *OrdensComprometidas*, conforme a estratégia de divisão do tempo (figura 12). *OrdensPendentes* é atualizado, removendo as ordens contidas em *OrdensComprometidas* e inserindo as novas ordens que apareceram nos

últimos T_{ts} segundos. A variável *Tempo* é somada ao tamanho da faixa de tempo T_{ts} , as posições, capacidades e tempos de viagem dos veículos.

6 CONCLUSÕES

Apresentou-se uma revisão dos métodos utilizados na literatura para resolver o problema de roteirização dinâmica de veículos com janelas de tempo (DVRPTW). Verificou-se que os métodos estocásticos são mais adequados para problemas moderadamente e fortemente dinâmicos, devido à necessidade de se conhecer todas as ordens de serviço a priori. Neste caso, as rotas são planejadas antes dos veículos deixarem o depósito e são utilizados algoritmos desenvolvidos para resolver o problema estático. Quanto aos métodos de operações locais rápidas, são adequados para sistemas fortemente dinâmicos, onde o tempo de resposta do planejador deve ser o menor possível. Já os métodos de re-roteirização são adequados para problemas fracamente e moderadamente dinâmicos, onde o tempo de resposta do planejador é maior e possibilita a execução de métodos mais elaborados, os quais fornecem melhores soluções que os métodos de soluções locais rápidas. Um algoritmo para solução do DVRPTW foi proposto.

Agradecimento

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bausch, D., Brown, G.G., and Ronen, D. "Consolidating and Dispatching Truck Shipments of Mobil Heavy Petroleum Products," *Interfaces*, 25, pp. 1-17, 1995.
- Bell, W.; Dalberto, L.; Fisher, M.; Greenfield, A.; Jaikumar, R.; Kedia, P.; Mack, R.; Prutzman, P. Improving the Distribution of Industrial Gases with an On-Line Computerized Routing and Scheduling Optimizer. *Interfaces*, v. 13, n. 6, p. 4-23, 1983.
- Bertsimas, D. J., L. H. Howell. Further results on the probabilistic traveling salesman problem. *Eur. J. Oper. Res.* 65 68-95, 1993.
- Brown, G.G., Ellis, C., and Ronen, D. "Real-Time, Wide Area Dispatch of MOBIL Tank Trucks," *Interfaces*, 17, pp. 107-120, 1987.
- Cunha, C. B; Gualda, N.D.F. "Heurísticas baseadas em Relaxação Lagrangiana para o Problema de Roteirização de Veículos com Restrições Operacionais". In: *Transporte em Transformação II – Trabalhos Vencedores do Prêmio CNT Produção Acadêmica 1997. Problemas e soluções dos transportes no Brasil*. São Paulo: MAKRON Books. p.81-94, 1999.
- Desrochers, M.; Laporte, G. Improvements and extensions to the Miller-Tucker-Zemlin subtour elimination constraints. *Operations Research Letters*;10:27-36, 1991.
- Dial, R. B. "Autonomous Dial-a-Ride Transit Introductory Overview," *Transp. Res.* 3C, 261-275, 1995.
- Gendreau, M. ; Guertin, F. ; Potvin, J.Y. ; Taillard, E. Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching. *Transportation Science*, Vol. 33, No 4, pp. 381-390, 1999.
- Gendreau, M.; Badeau, P.; Guertin, F.; Potvin, J. Y.; Taillard, E. "A Solution Procedure for Real-time Routing and Dispatching of Commercial Vehicles," Technical report CRT-96-24, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, Montréal, Canada, 1996a.
- Gendreau, M.; Guertin, F.; Potvin, J. Y.; Taillard, E. "Tabu Search for Real-Time Vehicle Routing and Dispatching," Technical report CRT-96-47, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, Montréal, Canada, 1996b.
- Gendreau, M.; Laporte, G.; Semet, F. Solving an ambulance location model by tabu search. *Location Science*, v. 5, n. 2, p. 75-88, 1997.
- Gendreau, M.; Potvin, J.Y. Dynamic vehicle routing and dispatching. in *Fleet management and logistic*. T.G. Crainic and G. Laporte editors, pp. 115-226, 1998.
- Hill, A.; Mabert, V.; Montgomery, D. "A Decision Support System for the Courier Vehicle Scheduling Problem," *Omega Int. J. Mgmt. Sci.* 16, 333-345, 1988.
- Jezequel, A. Probabilistic vehicle routing problems. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA, 1985.

- Kilby, P.; Prosser, P.; Shaw, P. Dynamic VRPs: a study of scenarios. Technical Report APES-06-1998, University of Strathclyde, U.K., 1998.
- Kohl, N.; Desrosiers, J.; Madsen, O.B.G.; Solomon, M.M.; Soumis, F. 2-path cuts for the vehicle routing problem with time windows. *Transportation Science*; 33:101–16, 1999.
- Lackner, A. “Dynamische Tourenplanung mit ausgewählten Metaheuristiken“, in Göttinger Wirtschaftsinformatik, Herausgeber: J. Biethahn, M. Schumann, Band 47, 2004.
- Larsen, A. (2000) The Dynamic Vehicle Routing Problem. PhD Thesis-Denmark Technical University, Lyngby.
- Larsen, A.; Madsen O.; Solomon M. Partially Dynamic Vehicle Routing-Models and Algorithms. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53, pp. 637-646, 2002.
- Lin, S. “Computer Solutions of the Traveling Salesman Problem,” *Bell System Tech. J.* 44, 2245–2269, 1965.
- Madsen, O. B. G., Ravn, H. F.; Rygaard, J. M. “A Heuristic Algorithm for a Dial-a-Ride Problem with Time Windows, Multiple Capacities and Multiple Objectives,” *Ann. Opns. Res.* 60, 193–208, 1995.
- Montemanni, R.; Gambardella, L. M.; Rizzoli, A. E.; Donati, A. V. “A new algorithm for a Dynamic Vehicle Routing Problem based on Ant Colony System”, in *Journal of Combinatorial Optimization*, Springer Netherlands, Vol. 10, No 4, pp. 327-343, 2002.
- Powell, W. B.; Jaillet, P.; Odoni, A. “Stochastic and Dynamic Networks and Routing,” in *Network Routing, Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol. 8, M. O. Ball, T. L. Magnanti, C. L. Monma, and G. L. Nemhauser (eds.), 141–295, North-Holland, Amsterdam, 1995.
- Powell, W.; Sheffi, Y.; Nickerson, K.S.; Butterbauch, K.; Atherton, S. “Maximizing Profits for North American Van Lines Truckload Division: A New Framework for Pricing and Operations,” *Interfaces*, 18, 21–41, 1988.
- Psaraftis, H. N. “A Dynamic Programming Solution to the Single-Vehicle Many-to-Many Immediate Request Dial-a-Ride Problem,” *Transp. Sci.* 14, 130–154, 1980.
- Psaraftis, H. N. “An Exact Algorithm for the Single Vehicle Many-to-Many Dial-a-Ride Problem with Time Windows,” *Transp. Res.* 17, 351–357, 1983.
- Psaraftis, H. N. Dynamic vehicle routing: Status and prospects, *Ann Oper Res* 61, 143–164, 1995.
- Psaraftis, H. N.; Orlin, J. B.; Bienstock, D.; Thompson, P. M. “Analysis and Solution Algorithms of Sealift Routing and Scheduling Problems: Final Report,” Working paper No. 1700-85, Sloan School of Management, M.I.T., Cambridge, MA, 1985.
- Psaraftis, H. N., “Dynamic vehicle routing problems”, *Vehicle Routing: Methods and Studies*, B.L. Golden and A.A. Assad (Editors), Elsevier, North-Holland, pp. 223–248, 1988.
- Rivard, R., “Construction des parcours des véhicules et des Horaires des Chauffeurs pour le Transport des Personnes Handicapées,” Publication CRT-240, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, Montréal, Canada, 1981.
- Rousseau, J. M.; Roy, S. “RAO Répartition Assistée par Ordinateur: la Description du Prototype,” Publication CRT-564, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, Montréal, Canada, 1988.
- Roy, S.; Rousseau, J. M.; Lapalme, G.; Ferland, J. A. “Routing and Scheduling for the Transportation of Disables Persons: the Algorithm,” Publication CRT-412, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, Montréal, Canada, 1985.
- Silva Júnior, O.S. e Hamacher, S. “Comparação de modelos exatos para solução do problema de roteirização de veículos com janelas de tempo”, anais do XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - XLII SBPO, Bento Gonçalves, RS, 2010.
- Silva Júnior, O.S. e Leal, J.E. “Roteirização Dinâmica de Veículos com Janelas de Tempo usando de um Algoritmo de Colônia de Formigas”, anais do XXIII ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Vitória, ES, 2009.
- Solanki, R. S. “An Execution Planning Algorithm for Military Airlift,” *Interfaces*, 21, 121–131, 1991.
- Trudeau, P.; Rousseau, J. M.; Ferland, J. A.; Choquette, J. “An Operations Research Approach for the Planning and Operating of an Ambulance Service,” *INFOR* 27, 95–113, 1989.
- Wilson, N. H. M.; Colvin, N. H. “Computer Control of the Rochester Dial-a-Ride System,” Report R77-31, Dept. of Civil Engineering. M.I.T., Cambridge, MA, 1977.

Orivalde Soares da Silva Júnior (orivalde@yahoo.com.br)

José Eugênio Leal (jel@puc-rio.br)

Departamento de Engenharia de Produção, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil