

Inserção De Restrições De Sincronização No Roteamento De Veículos –Aplicação a Um Problema No Setor Florestal

Robson de Souza Melo

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras - CEP 29075-910 - Vitória - ES
robson.info2@gmail.com

André Renato Sales Amaral

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras - CEP 29075-910 - Vitória - ES
amaral@inf.ufes.br

Alexandra Sofia Marques

INESC TEC Campus da FEUP
Rua Dr. Roberto Frias 4200-465 Porto-Portugal
alexandra.s.marques@inesctec.pt

Jorge Pinho de Sousa

INESC TEC Campus da FEUP
Rua Dr. Roberto Frias 4200-465 Porto-Portugal
jorge.p.sousa@inesctec.pt

RESUMO

Este trabalho realiza uma revisão sucinta da literatura sobre o Problema de Roteamento de Veículos (PRV) com Restrições de Sincronização (PRVRS). O trabalho enfatiza a importância das restrições de sincronização e analisa como o PRVRS tem sido tratado na literatura. Um dos objetivos do trabalho é listar os métodos que têm sido utilizados na resolução dos PRVRS. Outro objetivo é apresentar um problema importante no setor florestal, o Problema de Escalonamento de Destroçadoras e Caminhões (PEDC), que possui aplicação no transporte de toras de madeira para usinas de energia. Como o PEDC é uma aplicação do PRVRS, o PEDC será utilizado para comprovar a utilidade e as dificuldades impostas pela inclusão de restrições de sincronização no PRV.

PALAVRAS CHAVE. Roteamento de Veículos, Sincronização, Restrições.

Tópicos: L&T - Logística e Transportes. AG&MA - PO na Agricultura e Meio Ambiente.

ABSTRACT

This paper presents a brief review of the literature on the Vehicle Routing Problem (VRP) with synchronization constraints (VRPSC). The work emphasizes the importance of synchronization constraints and analyzes how the VRPSC has been treated in the literature. One of the objectives of the work is to list the methods that have been used in solving PRVRS. Another objective is to present a major problem in the forestry sector, the Chippers and Trucks Scheduling Problem (CTSP), a model to handle the transport of wood chips to power plants. As the CTSP is an application of VRPSC, the CTSP will be used to demonstrate the utility and the difficulties imposed by the inclusion of synchronization restrictions on VRP.

KEY WORDS. Vehicle Routing, Synchronization, Constraints.

Paper Topics: L&T - Logistics and Transport. AG & MA - PO in Agriculture and Environment.

1. Introdução

O presente trabalho faz uma análise exploratória e revisão da literatura, estudando vários casos que utilizaram com sucesso restrições de sincronização no Problema de Roteamento de Veículos (PRV). O PRV tem interessado a comunidade científica por mais de meio século e é considerado um dos maiores casos de sucesso da Pesquisa Operacional (PO) [Drex1 2012a]. A popularidade do PRV vem de que o transporte de mercadorias corresponde a grande parte dos gastos operacionais das empresas e, por isso, é muito importante aprimorar os processos de transporte. Os custos de distribuição têm impacto direto no valor total das mercadorias, estimando-se que estes custos são responsáveis por até 70% dos custos de valor acrescentado dos bens [Bräysy e Gendreau 2005].

Na literatura pode ser encontrada uma grande diversidade de variantes do PRV, cada uma com suas peculiaridades e formas de serem tratadas. Alguns exemplos destas variantes são: o Dial-a-Ride Problem (DARP), o PRV com janelas de tempo, o PRV com Reboques e Transbordo, o PRV utilizando Cross-Docking, entre outras. Apesar da literatura sobre o PRV ser muito vasta, a literatura em torno da utilização de restrições de sincronização ainda é muito reduzida.

O presente trabalho busca evidenciar a importância da inserção das restrições de sincronização na resolução do PRV e identificar os desafios e dificuldades impostos por estas restrições. Aqui serão apresentados alguns trabalhos que conseguem resolver com sucesso alguns Problemas de Roteamento de Veículos com Restrições de Sincronização (PRVRS). Em seguida será introduzido um problema importante no setor florestal: o Problema de Escalonamento de Destroçadoras e Caminhões (PEDC) que é um exemplo de PRVRS. O PEDC é um modelo utilizado para planejar o transporte de toras de madeiras para usinas de energia, buscando minimizar os custos operacionais desse transporte.

O restante do trabalho é dividido como se segue: na segunda seção é apresentado o PEDC e algumas de suas características; na terceira seção são apresentadas os desafios e benefícios das restrições de sincronização no PRV; a quarta seção apresenta os trabalhos mais importantes sobre os PRVRS encontrado na literatura; na quinta seção são apresentados os resultados obtidos com a pesquisa e uma conclusão do trabalho realizado.

2. Problema de Escalonamento de Destroçadoras e Caminhões

Segundo [El Hachemi et al. 2013] a floresta representa, em alguns países, um importante setor econômico. O planejamento florestal engloba diversas fases, destacando-se dentre elas a parte do transporte da madeira, o qual representa mais de 30% do custo total. Os elevados custos de transporte se devem à grande distância que existe entre as áreas de colheita de madeira e o local onde ela deve ser entregue. Portanto, se o roteamento de veículos não for devidamente realizado, os gastos com caminhões vazios, caminhões percorrendo um caminho maior que o necessário, tempo ocioso e caminhões carregando menos mercadoria do que deveriam pode aumentar de forma desnecessária os custos operacionais.

Nesta seção é descrito brevemente o Problema de Escalonamento de Destroçadoras e Caminhões (PEDC), o qual é um exemplo de PRVRS. O problema consiste em definir rotas para um conjunto de veículos de dois tipos (destroçadoras e caminhões) que devem operar de forma coordenada. As destroçadoras deslocam-se entre pontos diferentes da floresta e produzem as toras de madeira que vão, depois, ser transportadas pelos caminhões. As rotas dos veículos devem ser definidas com finalidade de atender às demandas de entrega de madeira às usinas de energia. Estas rotas incluem vários pontos pré-definidos que são divididos em 3 grupos: pilhas de madeira, usinas de energia e depósitos. A rota de cada veículo deve iniciar e terminar em um depósito, sendo que o veículo pode iniciar a rota em um depósito e terminar em qualquer outro depósito. Uma peculiaridade do problema é que apenas os caminhões devem visitar os pontos que representam as usinas, enquanto as destroçadoras devem visitar somente os pontos de colheita de madeira. As entregas de madeira devem ainda respeitar as janelas de tempo referentes aos horários de funcionamento das usinas de energia.

A demanda de toras de madeira de cada usina de energia e quais pilhas de madeira devem suprir esta demanda já são pré-definidas por um processo anterior de planejamento. Assim, este processo estabelece a quantidade de toras de madeira em uma pilha de madeira e para onde estas toras de madeira devem ser transportadas. O volume de madeira de uma pilha é igual à quantidade demandada desta pilha. Uma usina de energia pode receber madeira de diversas pilhas e uma pilha pode fornecer madeira para diversas usinas de energia. Como são as destroçadoras que realizam a pilhagem da madeira e carregam os caminhões, a destroçadora só poderá deixar a pilha de madeira em que está operando quando todos os serviços referentes a esta pilha forem atendidos.

Outro fator crítico do PEDC é a necessidade da sincronização entre as rotas das destroçadoras e dos caminhões. Esta sincronização é necessária para que as destroçadoras cheguem antes que os caminhões às pilhas de madeira, pois são as destroçadoras que realizam a carga dos caminhões. Portanto para o caminhão ser carregado é necessário que uma destroçadora já esteja preparada na pilha de madeira.

A figura 1 representa um roteamento realizado para o PEDC.

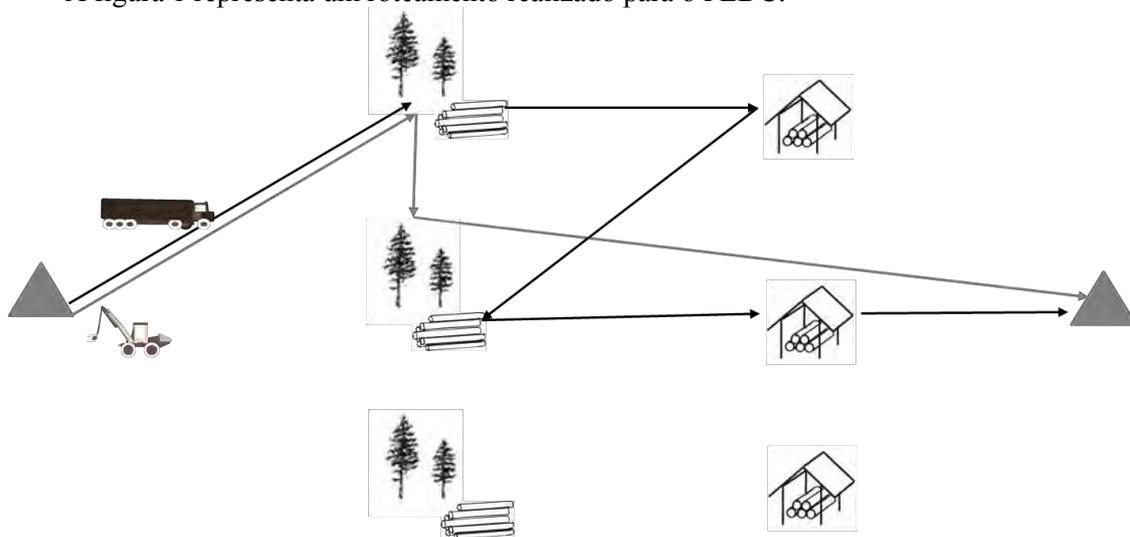


Figura 1 – Representação do roteamento do PEDC.

Os veículos utilizados no roteamento têm um custo relacionado ao seu uso, que representa o valor gasto pela empresa por utilizar o veículo. Portanto a empresa paga por cada veículo que será utilizado no roteamento. A cada um dos veículos está também associada uma janela de tempo que representa o tempo necessário para ir de um ponto ao outro. Este tempo é considerado proporcional à distância percorrida pelo veículo, sendo que todos os veículos têm a mesma velocidade. Os veículos devem respeitar a sua jornada de trabalho. Esta jornada representa o tempo total que o veículo pode ser utilizado em um dia. Finalmente é atribuído aos caminhões um tempo necessário para realizar carga e descarga.

Na prática, no PEDC há vários objetivos a considerar: minimizar a quantidade de veículos utilizados, minimizar as viagens de caminhões vazios ou ainda minimizar o tempo ocioso das destroçadoras. De certo modo, se qualquer destes objetivos for alcançado, será possível diminuir consideravelmente os custos operacionais.

3. Restrições de sincronização

Apesar dos modelos com restrições de sincronização serem muito importantes para modelar problemas do mundo real, estes ainda estão sendo pouco explorados como tema de pesquisa [Drexel 2013]. [Mankowska et al. 2011] confirmam que a adição das restrições de sincronização melhora significativamente o valor da solução. Isto corrobora a importância da inserção deste tipo de restrição para a resolução de problemas reais.

Como visto em [Drexel 2013], os PRVRS são classes especiais do Problema de Roteamento de Veículos (PRV). No PRV original, as rotas dos veículos são independentes, ou seja, uma rota

não interfere na outra, mas no caso do PRVRS os veículos têm de respeitar restrições de sincronização entre rotas. Esta sincronização pode ocorrer de acordo com o tempo, o espaço ou a carga. [Rousseau et al. 2013] alertam para as dificuldades extras impostas pela sincronização no roteamento de veículos. Por exemplo, os movimentos utilizados em uma busca local para o roteamento comum não são suficientes para atender ao modelo com restrições de sincronização, porque podem causar um atraso em alguma das rotas geradas. No roteamento comum isto irá afetar somente a rota que sofreu a troca, mas no modelo com restrições de sincronização este atraso pode inviabilizar uma ou todas as demais rotas inter-relacionadas, tornando toda a solução infactível.

[Drexel 2012] classifica as restrições de sincronização em vários tipos: de tarefas, de operações, de movimentos, de cargas e de recursos. Cada tipo de sincronização pode exigir uma abordagem diferente, dependendo do problema estudado. Alguns PRVRS podem pertencer a um ou mais dos tipos referidos. O PEDC abordado neste trabalho utiliza a sincronização de operações, de tarefas e de movimentos.

Mais recentemente [Drexel 2014] cita ainda outras dificuldades para se resolver PRVRS, que seriam: a interdependência entre operações, já mencionada anteriormente; a existência de diferentes formas de se realizar uma tarefa; e a situação em que a sincronização é opcional. No PEDC, a sincronização entre caminhões e destroçadoras é obrigatória, mas as tarefas das destroçadoras e dos caminhões podem ser realizadas de algumas formas diferentes. Por exemplo, pode ser necessário mais de um caminhão para atender de forma eficiente à demanda de uma usina de energia, existindo, portanto, mais de uma forma de atender aos pontos de coleta.

A interdependência existe porque um caminhão só deverá chegar ao local para ser carregado quando a destroçadora já estiver no local e pronta para funcionar. Assim, se a rota de uma destroçadora for alterada, as rotas dos caminhões que dependem desta destroçadora podem se tornar inviáveis.

4. Aplicações e métodos de resolução

Um primeiro exemplo de abordagem aos problemas com restrições de sincronização é o trabalho de [Mankowska et al. 2011], onde é proposto um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) para o problema de roteamento de veículos com restrições de sincronização. Neste trabalho, os autores levaram em conta a sincronização simultânea e a sincronização de precedência (considerada somente em alguns pontos pré-fixados na rede).

[Drexel 2014] propôs uma heurística para a resolução de diversos tipos de PRVRS. Esta heurística foi aplicada ao Vehicle Routing Problem with Trailers and Transshipments (VRPTT) mas, segundo o autor, pode ser utilizada em outros PRVRS pelo fato do VRPTT possuir todas os tipos de restrições de sincronização. Esta heurística é composta por 3 etapas. A primeira etapa é responsável por definir a forma de realização das tarefas e a sua divisão em subtarefas. Na segunda etapa é resolvido um problema de coleta e entrega, com janela de tempo e transbordo, planejado de acordo com as tarefas e subtarefas definidas na primeira etapa (nesta etapa é considerada a frota completa de caminhões e reboques). A terceira etapa resolve um novo problema de coleta e entrega com janela de tempo e transbordo (nesta etapa são criadas subrotas a partir das rotas definidas na segunda etapa). Cada segmento de rota da terceira etapa começa e termina em um depósito ou local de transbordo. Os resultados obtidos foram bastantes promissores.

Em [Schulte et al. 2014] foi resolvido um problema muito parecido com o VRPTT: o problema de roteamento combinado com *swap bodies* (contentores de carga padrão para o transporte rodoviário e ferroviário). Estes autores desenvolveram um software de ajuda à decisão, com base em técnicas de Pesquisa Operacional (PO). É utilizada uma heurística para resolver o problema e auxiliar os tomadores de decisão. O software foi testado com dados reais e conseguiu significativas reduções nos custos, no total de quilômetros percorridos e nos tempos de operação. A heurística proposta pode ser utilizada em outros problemas com restrições de sincronização.

[Labadie et al. 2014] definiram o PRVRS como sendo um problema de roteamento de veículos (PVR), no qual deve existir pelo menos um nó que exija visitas simultâneas de veículos ou visitas sucessivas de veículos que sejam resultantes de restrições de precedência. No trabalho

em questão os autores utilizaram um modelo PLIM e uma metaheurística Iterated Local Search (ILS) para resolver uma instância do PRVRS. O exemplo utilizado representa um centro de atendimento que presta serviços para seus clientes. Um cliente deste centro pode precisar de mais de um serviço e, no caso, esses serviços devem ser sincronizados. O PLIM proposto conseguiu resolver apenas casos de pequena dimensão. Já o ILS conseguiu encontrar a solução ótima para esses casos pequenos muito rapidamente, além de conseguir uma melhora significativa nos resultados das demais instâncias testadas.

[Rais et al. 2014] estudaram o problema de coleta e entrega com transbordo, onde operações devem ser sincronizadas no tempo e no espaço, e propuseram para o problema, um modelo de programação inteira mista (resolvido com bons resultados por Branch-and-Bound). Neste trabalho, os autores referem a falta de abordagens exatas para este tipo de problema, e afirmam que abordagens exatas mais eficientes poderiam ser úteis para enfrentar problemas do mundo real.

[Dohn et al. 2011] trabalharam com o problema de roteamento de veículos com janelas de tempo e dependências temporais. Neste problema, além de se respeitar as janelas de tempo reservadas ao atendimento dos clientes, também é necessário respeitar relações de dependência entre algumas tarefas. Foram testadas 4 formulações diferentes para resolução do problema (formulação direta, formulação indexada em tempo integral, formulação indexada em tempo limitado e uma formulação relaxada). Os modelos foram implementados em um Branch-and-Cut-and-Price, com resultados que demonstram que a abordagem indexada em tempo pode ser a melhor escolha para a maioria dos problemas.

Em [Salazar-Aguilar et al. 2013] foi proposta a utilização de uma abordagem de Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) para a resolução do problema de roteamento com sincronização de arcos e nós. O objetivo era definir rotas para os veículos utilizados na pintura das vias, e definir também uma rota para um veículo utilizado para o reabastecimento dos veículos de pintura. As rotas de ambos os veículos são programadas de forma que os veículos de pintura nunca fiquem sem tinta e possam realizar a pintura das vias no menor tempo possível. Portanto, é necessário sincronizar as rotas dos veículos de pintura com a rota do veículo de abastecimento. Este problema tem suas semelhanças com o PEDC, pois no PEDC também é necessário criar uma rota para os caminhões e uma rota para as destróadoras, com as rotas dos veículos sincronizadas.

Um outro tipo de problema que utiliza restrições de sincronização pode ser encontrado em [Morais et al. 2014] que estudaram o Vehicle Routing Problem with Cross-Docking (VRPCD). Neste problema é utilizada uma frota homogênea de veículos, onde os mesmos veículos que realizam as entregas para os clientes também são utilizados para recolher mercadorias junto aos fornecedores. Por isso, as operações de carga, descarga e coleta devem ser cuidadosamente sincronizadas para evitar atrasos. Os autores utilizaram algumas variações de ILS para resolver o problema, conseguindo encontrar soluções melhores que as da literatura. As características dos problemas de sincronização utilizando Cross-Docking foram estudadas por [Buijs et al. 2014] que propuseram uma classificação para os problemas. Outros exemplos de abordagens para os Vehicle Routing Problem with Cross-Docking podem ser encontrados em [Kellar et al. 2015], [Gonzalez-Feliu 2010] e [Cohen e Keren 2009].

[El Hachemi et al. 2011] trataram o Synchronized Log-truck Scheduling Problem, para sincronizar os caminhões transportadores de toras com as carregadeiras de toras. Neste problema, em cada local de carga e descarga existe apenas uma carregadeira de toras. Portanto, para evitar atrasos e minimizar os custos operacionais, é necessário sincronizar os serviços da carregadeira com a chegada dos caminhões, e, desta forma, minimizar o tempo em que a carregadeira fica ociosa e o tempo de transporte. Para resolver o problema é proposta (com bons resultados) uma abordagem híbrida com Programação por Restrições (PR) e modelos de Programação Inteira (PI).

Em um trabalho mais recente [El Hachemi et al. 2013] utilizaram ILS com PR para resolver o mesmo problema e conseguiram alcançar resultados melhores que os encontrados anteriormente. O PEDC funciona de forma muito parecida com o problema de agendamento de caminhões de toras. Porém no PEDC as destróadoras também devem possuir um roteamento, já que os pontos de colheita não terão uma destróadora em cada um.

4.1. Sincronização em transportes de passageiros

Por outro lado, o trabalho de [Ceder et al. 2001] trata o problema da sincronização máxima na criação de horários de ônibus. Os autores buscaram minimizar o tempo de espera entre um ônibus e outro nos pontos de embarque e desembarque, através da sincronização dos horários.

Esta sincronização faz com que quando um ônibus chegue a certo ponto, um ônibus para um próximo ponto já esteja esperando ou leve o menor tempo possível para chegar. Isso fará com que os passageiros esperem o mínimo possível pelo próximo ônibus. No PEDC também é requerido que a sincronização seja perfeita, pois é requerido que quando a destroçadora estiver no ponto de colheita e preparada para começar a trabalhar, já tenha um caminhão pronto ou que demore o menor tempo possível para ser carregado, e que quando o primeiro caminhão terminar de ser carregado e sair, um segundo já esteja preparado para ser carregado. Com isso será possível diminuir consideravelmente o tempo de operação e, por consequência, diminuir os custos.

Também para resolver o problema da sincronização dos horários de ônibus, [Liu et al. 2007] propuseram uma variação da metaheurística Busca Tabu que se mostrou viável e eficaz na resolução do problema. Os autores também ressaltaram a importância da inserção das restrições de sincronização para obter melhores resultados.

Um problema muito parecido é tratado em [Ioachim et al. 1999], a saber o problema de roteamento e programação de frota de aeronaves. O problema consiste em programar horários para os voos e sincronizar esses horários durante a semana. O objetivo do problema é minimizar a frota de aviões, conseguindo atender a demanda de voos. Para resolver o problema é proposta uma abordagem exata, de geração de colunas, num procedimento Branch-and-Bound, que se mostrou bastante eficiente.

Por sua vez, [Wong et al. 2008] estudaram o problema de planejamento de um calendário não periódico sincronizado, para sincronizar os horários de trens e, minimizar o tempo total de espera para a transferência de passageiros em ferrovias. Foi usado um modelo de PLIM que permitiu diminuir de forma considerável o tempo de espera dos passageiros, em comparação com o calendário que era construído anteriormente. Os resultados mostraram que as restrições de sincronização podem ajudar a encontrar soluções melhores para o problema.

Ainda neste setor, [Reinhardt et al. 2013] propõem uma heurística para a resolução de um problema de transporte de passageiros com mobilidade reduzida em aeroportos. O problema consiste em uma variação do Dial-a-Ride Problem (DARP) com restrições de sincronização, onde é necessário prestar assistência a pessoas com mobilidade reduzida, a embarcar e desembarcar dos aviões. A heurística proposta conseguiu alcançar bons resultados em menos de 2 minutos, o que possibilita que a empresa rode o procedimento várias vezes ao dia.

4.2. Outras aplicações em logística

[Sharypova et al. 2012] propuseram um modelo para o projeto de rede de serviços programados com restrições de sincronização e transbordo. O modelo é utilizado para programar o roteamento de veículos em redes de transporte de contêineres, sendo inseridas restrições de sincronização com a finalidade de evitar que veículos de transporte realizem viagens sem a lotação máxima ou realizem viagens vazios. Sincronizando as viagens de veículos dependentes, consegue-se diminuir drasticamente o tempo gasto no transporte de cargas. Para a implementação do modelo foi utilizado o CPLEX, capaz de resolver de forma ótima algumas instâncias pequenas do problema.

[Quttineh et al. 2013] resolveram o problema de planejamento da missão de uma aeronave militar. Neste contexto, para realizar um ataque a um alvo específico são necessários 2 aviões, 1 responsável pela iluminação do alvo, e outro responsável por utilizar as armas. Os aviões de iluminação e os de armas precisam ser sincronizados para que os ataques tenham sucesso. Os autores propuseram um modelo PLIM e utilizaram o CPLEX para resolver algumas instâncias de pequeno porte.

No trabalho de [Andersson et al. 2011] são propostos três modelos matemáticos para a

resolução do problema de roteamento e agendamento de navios com restrições de sincronização. O problema tratado consiste de uma frota heterogênea de navios, os quais são utilizados para o transporte de carga. Os navios diferem uns dos outros no que diz respeito a capacidade e tipos de carga que podem carregar, buscando-se sincronizar os navios e realizar o roteamento de forma a obter um maior lucro. Foram usados e comparados vários modelos, tendo-se verificado que o modelo de formulação de fluxo de caminho agregado conseguiu alcançar resultados melhores em comparação com os demais métodos.

4.3. Outras variantes e extensões

Numa outra linha de trabalho, [Drexel et al. 2014] estudaram o problema de roteamento de veículos e programação simultânea de tripulação. O problema baseia-se na necessidade de troca de tripulação em viagens longas, devido a fatores como leis trabalhistas e cansaço excessivo. O objetivo é sincronizar as rotas dos caminhões e da tripulação de forma a otimizar a troca da tripulação e gerar menos atrasos na viagem. Para resolver o problema foi utilizada uma heurística baseada em 2 passos: no primeiro, é programada a rota para os caminhões; e no segundo, é programada a rota das tripulações, sempre respeitando as restrições de sincronização. Os resultados obtidos, em instâncias reais de grande dimensão, foram promissores.

[Bredström e Rönnqvist 2007] desenvolveram um algoritmo de Branch-and-Price para resolver uma variação do Problema de Roteamento de Veículos com janelas de tempo, sendo usadas algumas restrições de sincronização para tornar o modelo mais realista. O algoritmo proposto conseguiu resolver de forma ótima 44 das 60 instâncias testadas.

Finalmente, ainda [Bredström e Rönnqvist 2008] descrevem alguns problemas de roteamento de veículos com restrições de sincronização, entre eles um problema de coleta e entrega utilizado na área de operação florestal. O problema consiste em programar rotas para colheitadeiras, encaminhadoras e caminhões, para que estes realizem a entrega de madeira. As colheitadeiras são responsáveis por derrubar as árvores e cortá-las em toras; as encaminhadoras são responsáveis por empilhar as toras em algum lugar propício para serem carregadas por caminhões; e os caminhões são responsáveis por transportar a madeira. Para agilizar a operação é necessária a sincronização dos serviços dos veículos, de forma com que respeitem ordem de serviço. O problema tratado pelos autores é muito parecido com o PEDC.

5. Resultados e conclusões

Neste trabalho foi feita uma análise exploratória e uma pesquisa bibliográfica onde são estudadas diversas aplicações do Problema de Roteamento de Veículos com Restrições de Sincronização (PRVRS). O problema mais geral de Roteamento de Veículos (PVR) é exaustivamente estudado na literatura, mas a inserção de restrições de sincronização neste tipo de problema ainda é pouco explorada. Apesar da inserção das restrições de sincronização ser de grande importância para modelagem de problemas do mundo real, só nos últimos anos tem chamado a atenção dos pesquisadores.

Deste trabalho fica claro que a inserção de restrições de sincronização nos modelos de otimização torna esses modelos mais realistas e úteis. Desta forma consegue-se estimar com maior precisão os custos e tempos de transporte, e determinar as quantidades e tipos de veículos que devem ser utilizados ou a quantidade de pedidos que podem ser atendidos em um período de tempo, entre outros possíveis objetivos.

Por outro lado, verificou-se que a inserção das restrições de sincronização impõe uma maior dificuldade para definir o roteamento, pois passa a existir uma interdependência nas rotas. Assim quando uma rota sofrer alteração, todas as rotas interdependentes também devem ser alteradas para se adaptar a mudança, e, por isso, os métodos utilizados para tratar o PRV tradicional não podem ser aplicados aos PRVRS. Assim, os trabalhos atuais de pesquisa buscam encontrar métodos eficientes e eficazes que sejam capazes de modelar e obter soluções para os PRVRS. No PEDC por exemplo, não basta apenas estabelecer os roteamentos das destrocadoras e dos caminhões, sendo

necessário sincronizar as rotas estabelecidas de forma com que as destroçadoras sempre cheguem antes que qualquer caminhão, em qualquer pilha de madeira.

A tabela 1 apresenta os diversos trabalhos onde os PRVRS são tratados. A tabela destaca os tipos dos veículos que são utilizados nos problemas, que tipos de restrições de sincronização foram utilizados em cada trabalho, e ainda os métodos utilizados para resolver os problemas.

Tabela 1 – Tipo de sincronização e método de resolução

| Trabalho | Tipo de veículo | Tipo de sincronização utilizada (DREXL, 2012) (tarefa, operação, carga, movimento, recurso) | Método utilizado |
|-------------------------------|------------------------|---|---|
| [Andersson et al. 2011] | Navios | Tarefa, operação e carga. | Modelos PLIM |
| [Bredstrom e Ronnqvist 2007] | Caminhões | Carga, Operação, Movimento, Tarefa. | Branch-and-Price |
| [Ceder et al. 2001] | Ônibus | Movimento. | Heurística |
| [Cohen e Keren 2009] | Caminhões | Operação, carga, Tarefa. | Heurística |
| [Dohn et al. 2011] | Caminhões | Tarefa, Operação. | Modelos PLIM com Branch-and-Cut-and-Price |
| [Drexl 2012] | Caminhões e trailers | Tarefa, operação, carga, movimento, recurso | Branch-and-Cut |
| [Drexl et al. 2014] | Caminhões e tripulação | Recurso | Método Heurístico |
| [El Hachemi et al. 2011] | Caminhões | Recurso, Carga | Programação por Restrições (PR) e Modelos de programação inteira (PI) |
| [El Hachemi et al. 2013] | Caminhões | Recurso, Carga | Iterated Local Search (ILS) |
| [Ioachim et al. 1999] | Aviões | Recurso | Branch-and-Bound |
| [Labadie et al. 2014] | Caminhão | Tarefa, Operação. | PLIM e ILS |
| [Liu et al. 2007] | Ônibus | Recurso | Busca Tabu |
| [Mankowska et al. 2011] | Caminhões | Tarefa, Operação. | PLIM |
| [Morais et al. 2014] | Caminhões | Operação, carga, Tarefa. | ILS |
| [Quttineh et al. 2013] | Aviões | Tarefas, Operação. | PLIM |
| [Rais et al. 2014] | Caminhões | Tarefa, Operação, Carga. | PLIM |
| Reinhardt et al. 2013] | Caminhões e Tripulação | Operação, Recurso. | Heurística |
| [Salazar-Aguilar et al. 2013] | Caminhões | Operação, Recurso, Movimento. | Adaptive large neighborhood search (ALNS) |
| [Schulte et al. 2014] | Caminhões | Tarefa, operação, carga, movimento, recurso | Heurística |
| [Sharypova et al. 2012] | Caminhões | Tarefa, operação, carga, movimento, recurso | PLIM |
| [Wong et al. 2008] | Trens | Movimento. | PLIM |

Alguns dos trabalhos estudados buscaram formas de definir e classificar os diferentes tipos de restrições de sincronização. A classificação mais aceita é a proposta por [Drexl 2012], com os seguintes tipos de restrições de sincronização: de tarefas, de operações, de movimentos, de cargas e de recursos. Um problema de roteamento pode possuir apenas um ou vários destes tipos de restrições de sincronização.

O estudo mostra também que os métodos heurísticos ainda estão sendo pouco aplicados na resolução do PRVRS. A maioria dos trabalhos estudados utilizam abordagens baseadas em métodos exatos, mas, até o momento, estes métodos somente são capazes de resolver instâncias de pequeno porte. Parece assim ser interessante desenvolver métodos heurísticos que tenham a capacidade de resolver instâncias maiores do problema, em tempo computacional aceitável. Outra opção viável é a utilização de metaheurísticas, mas a utilização destes métodos no PRVRS ainda é bastante limitada.

Como foi observado durante este trabalho, as restrições de sincronização podem ser aplicadas em diversas áreas que envolvem o roteamento de veículos. O potencial da inserção deste tipo de restrição aos problemas de roteamento é enorme, justificando por isso uma atenção privilegiada, particularmente em problemas de grande importância prática como o PEDC.

Referências

Andersson, H., Duesund, J. M. e Fagerholt, K. (2011). Ship Routing And Scheduling With Cargo Coupling And Synchronization Constraints. *Computers And Industrial Engineering*, V. 61, N. 4, P. 1107–1116.

Bräysy, O. e Gendreau, M. (2005). Vehicle Routing Problem With Time Windows, Part I: Route Construction And Local Search Algorithms. *Transportation Science*, V. 39, N. 1, P. 104–118.

Bredstrom, D. e Ronnqvist, M. (2007). A Branch And Price Algorithm For The Combined Vehicle Routing And Scheduling Problem With Synchronization Constraints. *Ssrn Electronic Journal*, N. February, P. 1–21.

Bredström, D. e Rönnqvist, M. (2008). Combined Vehicle Routing And Scheduling With Temporal Precedence And Synchronization Constraints. *European Journal Of Operational Research*, V. 248, N. 191, P. 19–31.

Buijs, P., Vis, I. F. A. e Carlo, H. J. (2014). Synchronization In Cross-Docking Networks: A Research Classification And Framework. *European Journal Of Operational Research*, V. 239, N. 3, P. 593–608.

Ceder, A., Golany, B. e Tal, O. (2001). Creating Bus Timetables With Maximal Synchronization. *Transportation Research Part A: Policy And Practice*, V. 35, N. 10, P. 913–928.

Cohen, Y. e Keren, B. (2009). Trailer To Door Assignment In A Synchronous Cross-Dock Operation. *International Journal Of Logistics Systems And Management*, V. 5, N. 5, P. 574.

Dohn, A., Rasmussen, M. S. e Larsen, J. (2011). The Vehicle Routing Problem With Time Windows And Temporal Dependencies. *Networks*, V. Vol. 58(4), N. 1, P. 273–289.

Drexler, M. (2012a). Synchronization In Vehicle Routing--A Survey Of Vrps With Multiple Synchronization Constraints. *Transportation Science*, V. 46, N. 3, P. 297–316.

Drexler, M. (2012b). Branch-And-Cut Algorithms For The Vehicle Routing Problem With Trailers And Transshipments. *Networks*, V. 63, N. 1, P. 119–133.

Drexler, M. (2013). Applications Of The Vehicle Routing Problem With Trailers And Transshipments. *European Journal Of Operational Research*, V. 227, N. 2, P. 275–283.

Drexler, M., Rieck, J., Sigl, T. e Press, B. (2014). Simultaneous Vehicle And Crew Routing And Scheduling For Partial- And Full-Load Long-Distance Road Transport. *Bur - Business*

Research, V. 6, N. 2, P. 242–264.

El Hachemi, N., Gendreau, M. e Rousseau, L. M. (2011). A Hybrid Constraint Programming Approach To The Log-Truck Scheduling Problem. *Annals Of Operations Research*, V. 184, N. 1, P. 163–178.

El Hachemi, N.; Gendreau, M.; Rousseau, L. M. (2013). A Heuristic To Solve The Synchronized Log-Truck Scheduling Problem. *Computers And Operations Research*, V. 40, N. 3, P. 666–673.

Gonzalez-Feliu, J. (2010). *The multi-echelon location-routing problem: Concepts and methods for tactical and operational planning*. Technical Report, Laboratoire d’Economie des Transports, Lyon, France.

Ioachim, I., Desrosiers, J., Soumis, F., e Bélanger, N. (1999). Fleet assignment and routing with schedule synchronization constraints. *European Journal of Operational Research*, 119(1), 75-90.

Kellar, G. M., Polak, G. G. e Zhang, X. (2015). Synchronization, Cross-Docking, And Decoupling In Supply Chain Networks. *International Journal Of Production Research*, V. 7543, N. November, P. 1–15.

Labadie, N., Prins, C., e Yang, Y. (2014). Iterated Local Search for a Vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints. In *ICORES* (pp. 257-263).

Liu, Z., Shen, J., Wang, H. e Yang, W. (2007). Regional Bus Timetabling Model With Synchronization. *Journal Of Transportation Systems Engineering And Information Technology*, V. 7, N. 2, P. 109–112.

Mankowska, D. S., Bierwirth, C. e Meisel, F. (2011). Modelling The Synchronization Of Transport Means In Logistics Service Operations. *Lecture Notes In Computer Science (Including Subseries Lecture Notes In Artificial Intelligence And Lecture Notes In Bioinformatics)*, V. 6971 Lncs, P. 74–85.

Morais, V. W. C., Mateus, G. R. e Noronha, T. F. (2014). Iterated Local Search Heuristics For The Vehicle Routing Problem With Cross-Docking. *Expert Systems With Applications*, V. 41, N. 16, P. 7495–7506.

Quttineh, N.-H., Larsson, T., Kundberg, K. e Holmberg, K. (2013). Military Aircraft Mission Planning: A Generalized Vehicle Routing Model With Synchronization And Precedence. *Euro Journal On Transportation And Logistics*, V. 2, N. 1-2, P. 109–127.

Rais, A., Alvelos, F. e Carvalho, M. S. (2014). New Mixed Integer-Programming Model For The Pickup-And-Delivery Problem With Transshipment. *European Journal Of Operational Research*, V. 235, N. 3, P. 530–539.

Reinhardt, L. B., Clausen, T. e Pisinger, D. (2013). Synchronized Dial-A-Ride Transportation Of Disabled Passengers At Airports. *European Journal Of Operational Research*, V. 225, N. 1, P. 106–117.

Rousseau, L.-M., Gendreau, M. e Pesant, G. (2013). The Synchronized Dynamic Vehicle Dispatching Problem. *Infor*, V. 51, N. 2, P. 76–83.

Salazar-Aguilar, M. A., Langevin, A. e Laporte, G. (2013). The Synchronized Arc And Node Routing Problem: Application To Road Marking. *Computers And Operations Research*, V. 40, N. 7, P. 1708–1715.

Schulte, F., Voß, S., e Wenzel, P. (2014). Heuristic routing software for planning of combined road transport with swap bodies: A practical case. *Proceedings of MKWI*, 25-28.

Sharypova, K., Crainic, T. G., van Woensel, T., e Fransoo, J. C. (2012) Service Network Design With Synchronization And Transshipment Constraints For Intermodal Container Transportation Networks. *Beta Working Paper Series 8*, V. 398, N. November.

Wong, R. C. W., Yuen, T. W. Y., Fung, K. W. e Leung, J. M. Y. (2008). Optimizing Timetable Synchronization For Rail Mass Transit. *Transportation Science*, V. 42, N. 1, P. 57–69.