

MODELAGEM E RESOLUÇÃO INTEGRADA DOS PROBLEMAS DE GERAÇÃO DA TABELA DE HORÁRIOS E ESCALONAMENTO DE VEÍCULOS COM FROTA HETEROGÊNEA

Monize Sâmara Visentini

Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS)
Rua Major Antônio Cardoso, 590, Cerro Largo -R.S.
monize.visentini@uffs.edu.br

Denis Borenstein

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Rua Washinton Luiz, 855. Porto Alegre, R.S.
denis.borenstein@ufrgs.br

Olinto César Bassi de Araújo

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Avenida Roraima, 1000. Santa Maria, R.S.
olinto@ctism.ufsm.br

Alberto Francisco Kummer Neto

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Avenida Roraima, 1000. Santa Maria, R.S.
alberto@inf.ufsm.br

RESUMO

Neste artigo propõe-se um novo modelo de Programação Linear Inteira, baseado em uma rede tempo-espaço, que integra os problemas de geração da tabela de horários e o escalonamento de veículos com frota heterogênea. Um diferencial dessa abordagem consiste na consideração da demanda para a redefinição da tabela de horários e para o escalonamento dos veículos, fator raramente aplicado nos modelos de otimização do sistema de transporte. Foram utilizadas instâncias reais e aleatórias de grande porte. Os resultados indicam que o modelo pode contribuir para a otimização do planejamento do transporte público, tendo em vista que possibilita economias significativas no número de veículos escalonados. Além disso, como os intervalos de alteração da tabela de horários são bastante curtos, obtêm-se alterações sutis, modificando minimamente a rotina dos passageiros, o que possibilita a aplicação dessa abordagem ao contexto real.

PALAVARAS CHAVE. Tabela de horários, Escalonamento de veículos, Frota heterogênea.

Área principal (L&T - Logística e Transportes)

ABSTRACT

In this paper, we propose a new Integer Linear Programming model, based on a time-space network that integrates the timetable generation problem and the vehicle scheduling problem with heterogeneous fleet. A difference of this approach consists in considering the demand for the timetable redefinition and the vehicle scheduling, factor rarely applied in optimization models of the transportation system. We applied real and large random instances. The results indicate that the model may contribute to optimizing the public transport planning leading to significant savings in terms of scheduled vehicles. Moreover, as the timetable changes are fairly short, it is slightly modified, minimally modifying the passengers routine, which enables the application of these approaches to real context.

KEYWORDS. Timetable. Vehicle Scheduling. Heterogeneous fleet.

Main area (L&T – Logistics and Transport)

1. Introdução

O problema de escalonamento de veículos (VSP, *Vehicle Scheduling Problem*), amplamente estudado nas últimas décadas, possui escassez de estudos considerando frota heterogênea na literatura de transportes, em comparação à frota homogênea (Ceder, 2011). No contexto do transporte público, uma frota heterogênea compreende diferentes tipos de ônibus que variam em capacidade, velocidade ou equipamentos. Problemas de escalonamento de veículos com frota heterogênea (VTSP, *Vehicle-Type Scheduling Problem*), são classificados por Ceder (2011) como aqueles que integram a programação de veículos e a melhor escolha do tipo de veículo necessário para cada viagem, mantendo o nível da qualidade do serviço prestado. No transporte público, muitos fatores influenciam a inclusão da frota heterogênea, como a substituição da frota, novas tecnologias para os ônibus, oportunidades de mercado, demanda crescente, reutilização em novas linhas de ônibus de veículos desativados, etc. Percebe-se, assim, a importância de se considerar este aspecto quando do escalonamento dos veículos no planejamento do transporte público.

A programação da frota heterogênea não está somente relacionada ao interesse econômico das empresas de ônibus, incluindo também na qualidade da viagem oferecida aos passageiros e nas características do trânsito urbano. Uma viagem feita por um ônibus articulado, por exemplo, pode atender à demanda de duas viagens consecutivas realizadas por ônibus menores, sem prejuízos aos passageiros. Ao tratar a frota heterogênea em um problema é interessante que se analise a demanda que deverá ser atendida, tendo em vista que se podem direcionar os tipos de veículos conforme o número de passageiros previstos para cada viagem. Outra consequência do uso da frota heterogênea é a possibilidade de se alterar, sutilmente, a tabela de horários e melhorar ainda mais o escalonamento dos veículos utilizados, integrando as duas primeiras etapas do planejamento do transporte público, definidas por Freling et al. (1999) como: a geração da tabela de horários, o escalonamento de veículos, o escalonamento da tripulação e a rotação da tripulação. Otimizando simultaneamente os problemas de geração da tabela de horários e de escalonamento de veículos com frota heterogênea obtém-se mais flexibilidade nos horários de partida das viagens e maior compatibilidade de viagens, possibilitando reduções no custo total do planejamento.

Baseando-se nessas considerações, neste artigo propõe-se um novo modelo de Programação Linear Inteira (PLI), baseado em uma rede tempo-espaço (TSN, *Time-Space Network*), que integra os problemas de geração da tabela de horários e o VTSP. Um diferencial dessa abordagem consiste na consideração da demanda para a redefinição da tabela de horários e para o escalonamento dos veículos, fator raramente aplicado nos modelos de otimização do sistema de transporte. Aliado à utilização da frota heterogênea, a compreensão do comportamento da demanda faz-se totalmente necessária dada à possibilidade de escalonamento de veículos com diferentes capacidades, buscando sempre aliar qualidade no atendimento, satisfação do passageiro e a minimização dos custos de transporte.

Importante ressaltar que a abordagem adotada neste trabalho de geração da tabela de horários integrada ao VTSP consiste em redefinir os horários de algumas viagens de uma tabela ativa. Assim, não é desenvolvida uma tabela de horários inicial para suportar as atividades diárias do transporte público, mas aprimoradas as tabelas já existentes, garantindo melhor distribuição das viagens e qualidade nos serviços prestados aos passageiros. Modificações sutis na tabela de horários, alterando os horários de partida ou chegada de algumas viagens num intervalo de tempo curto, permitem aumentar drasticamente o espaço de soluções possíveis Kliewer et al. (2012), possibilitando graus de liberdade adicionais ao VTSP. Trabalhos com a perspectiva de integração da formulação e resolução da tabela de horários e do VTSP, tendo como base a TSN, não foram identificados na literatura, o que garante o caráter inédito desta investigação.

Dados disponibilizados pela Associação Nacional dos Transportes Públicos (ANTP, 2012), de que a população dos municípios com mais de 60 mil habitantes realizou, em 2011, 61,3 bilhões de viagens, sendo 17,7 bilhões pelo transporte público, motivam a realização deste estudo, visto a sua importância prática, não somente acadêmica. Ainda, segundo a (ANTP, 2012), quando as viagens são classificadas por porte dos municípios, percebe-se que a participação do

transporte público gira expressivamente em torno de 20%, à exceção das cidades acima de 1 milhão de habitantes, nas quais atinge 36%. Os ônibus públicos no Brasil, no ano de 2011, destacaram-se como o terceiro meio de transporte mais utilizado, seguindo o transporte a pé e de bicicleta (1°) e de carros particulares e motocicletas (2°), sendo o ônibus o responsável pelo deslocamento de 40 milhões de passageiros diariamente, atendendo 87% da demanda de transporte público coletivo nacional. A frota de ônibus municipais e metropolitanos no Brasil ultrapassou os 105 mil veículos, dados que reforçam a necessidade do desenvolvimento de ferramentas que contribuam no aprimoramento das operações de um dos meios de transporte mais utilizados no país.

2. Revisão de Literatura

A abordagem simultânea da modificação da tabela de horários e do escalonamento de veículos é pouco explorada de modo integrado na literatura Guihaire e Hao (2010), e pode gerar benefícios ao sistema de transporte público. Nos artigos pesquisados, observou-se que a resolução conjunta dos problemas de geração ou modificação da tabela de horários e o escalonamento de veículos pode ocorrer de três modos: 1) pelo acréscimo de janelas de tempo ao modelo de escalonamento de veículos; 2) pela otimização conjunta da tabela de horários e do escalonamento dos veículos; ou 3) pela geração iterativa e sequencial da tabela de horários e o escalonamento de veículos, em que o resultado do último retroalimenta a otimização da tabela de horários.

Desaulniers et al. (1998) formularam o problema de escalonamento de veículos com múltiplas garagens (MD-VSP) com janelas de tempo como um modelo de fluxo *multi-commodity* não-linear inteiro. O objetivo do problema consiste em alocar a frota para executar todas as tarefas respeitando as restrições de janela de tempo e capacidade dos veículos. Para a resolução foi utilizada a técnica de geração de colunas incorporada em uma estrutura *branch-and-bound*. A versão heurística e a versão exata do algoritmo foram testadas em instâncias aleatórias. Os resultados indicaram soluções ótimas para instâncias pequenas e médias e boas soluções heurísticas (limitando o número de nós da árvore a serem explorados) para grandes instâncias (600 tarefas e 5 garagens), em tempo razoável (uma hora).

Kliwer et al. (2006b) também resolvem o MD-VSP com janelas de tempo. Baseando-se em uma rede tempo-espaco, arcos de janela de tempo são adicionados aos arcos já existentes. Esses arcos são caracterizados como “arcos sombra” dos arcos de serviço originais, e representam o deslocamento (adiantamento ou atraso) de uma viagem em alguns poucos minutos. A inserção de arcos de janela de tempo gera um número excessivo de arcos, exigindo tempo de solução computacional extremamente alto. Em virtude disso, Kliwer et al. (2006b; 2012) desenvolveram técnicas de pré-processamento para evitar criação de arcos de janela de tempo que não possibilitam a compatibilidade com outras viagens de serviço, quando comparado com o arco de serviço original. Como o modelo é altamente complexo, em Kliwer et al. (2006b) são apresentadas duas heurísticas para ajudar na resolução do escalonamento dos veículos: uma heurística do tipo “trip shortening” e uma heurística de corte.

Em publicação posterior, Kliwer et al. (2012) adicionam o problema de escalonamento de tripulação ao trabalho apresentado por Kliwer et al. (2006b), e utilizam uma combinação de relaxação Lagrangeana e geração de colunas para resolver o problema integrado. As heurísticas desenvolvidas no trabalho de Kliwer et al. (2006b) também são utilizadas como suporte para a resolução do problema. A partir de instâncias disponíveis na literatura, economias no número de veículos e tripulação são encontradas nessa abordagem integrada se comparado a trabalhos anteriores (Steinzen et al., 2010), que não utilizaram janelas de tempo.

van den Heuvel et al. (2008) propõem duas novas formulações para o VTSP: na primeira, mais de um tipo de veículo pode atender a uma viagem, tornando o problema de difícil resolução; e na segunda, que visa minimizar em partes a complexidade da primeira, permite-se que vários veículos do mesmo tipo atendam a mesma viagem, sendo que os ônibus são distribuídos uniformemente no tempo. Se, por exemplo, há uma viagem a cada hora, e serão necessários dois ônibus de um determinado tipo, um veículo sairia do terminal a cada meia-hora.

Isso é obtido através da inclusão de viagens de serviço adicionais na rede tempo-espaço. Esse problema, ao flexibilizar a frota, aumenta significativamente a complexidade de resolução computacional se comparado ao VSP para um único tipo de veículo. Após encontrado o escalonamento adequado, os autores realizam pequenas modificações na tabela de horários previamente utilizada, através da aplicação da metaheurística *Simulated Annealing*, com o objetivo de melhor adequar os veículos à demanda existente para cada viagem. São testadas instâncias reais da companhia de ônibus holandesa Connexxion. Os resultados deste problema, integrando a frota heterogênea e as modificações na tabela de horários, indicam economias de até 8% se comparados aos resultados do problema resolvido por Kliewer et al. (2006a), no qual não havia sincronização com a tabela de horários. Dentre os trabalhos encontrados na literatura, o de van den Heuvel et al. (2008) é o que apresenta maiores similaridades com a nova abordagem proposta neste artigo. Entretanto, nessa nova abordagem, a modificação da tabela de horários e o escalonamento da frota heterogênea são realizados de modo simultâneo, a partir da formulação matemática integrada desses problemas, não necessitando de pós-processamento para ajustar os horários de partida das viagens.

Recentemente, Ceder et al. (2013) desenvolveram uma metodologia multi-objetivo para criar horários de ônibus usando vários tamanhos de veículos, com dois objetivos realizados simultaneamente: primeiro, minimizar o tempo de espera dos passageiros nos terminais e, segundo, minimizar o desvio de número de passageiros observados e desejados em cada ônibus. Para tanto, duas heurísticas foram desenvolvidas e testadas em instâncias de Auckland, Nova Zelândia, demonstrando bons resultados em termos de redução de espera dos passageiros e melhor aproveitamento dos veículos. Entretanto, o modelo só pode ser aplicado a linhas de ônibus individuais, não podendo considerar rotas interligadas ou um conjunto de linhas. Para tanto, os autores sugerem que pesquisas futuras devem ser realizadas nesta direção, sincronizando o escalonamento de veículos de diferentes tipos e a geração da tabela de horários, pois este tipo de análise combinada “irá demonstrar como minimizar o custo operacional, melhorando, simultaneamente, a qualidade dos serviços ao permitir o escalonamento de vários tamanhos de ônibus” (p. 216). É nesta direção, de minimizar custos operacionais e atender a demanda de passageiros com qualidade que se desenvolve o modelo apresentado neste artigo.

3. Modelagem do problema

O problema de escalonamento de uma frota homogênea de veículos para um único depósito é representado através de um modelo de fluxo em rede e expresso por uma rede tempo-espaço. A estrutura da TSN foi primeiramente aplicada para o VTSP por Kliewer et al. (2002), sendo utilizada, posteriormente, por Kliewer et al. (2006a, 2006b, 2012). A principal vantagem dessa estrutura é a diminuição do número de variáveis e restrições, se comparado com a rede baseada em conexões, visto que nela evita-se o inconveniente de consideração explícita de todas as conexões possíveis entre viagens compatíveis, garantindo todos os escalonamentos viáveis de veículos.

A base da TSN é explorar a propriedade de transitividade de conjuntos ordenados, indicando que para viagens p, q, v a seguinte conclusão é aplicada (Bunte e Kliewer, 2009):

$$(p R q) \wedge (q R v) \rightarrow p R v, \text{ onde } R \text{ é uma relação binária}$$

A aplicação dessa propriedade à TSN é facilmente visualizada quando se aplicam pré-processamentos para a redução no número de arcos da rede. Esses pré-processamentos têm impacto significativo no número de variáveis e restrições da formulação matemática (Kliewer et al., 2002; 2006a; van den Heuvel et al., 2008; Visentini et al., 2013). Para considerar a frota heterogênea, deve-se construir uma estrutura de rede para cada tipo de veículo. Essa sobreposição de redes por tipo de veículo possibilita que uma mesma viagem de serviço esteja em várias camadas, não sendo possível resolver essas camadas de forma independente, caracterizando um problema de rede com fluxo *multicommodity*. Assim, se houver dois ou mais veículos, o problema torna-se NP-difícil (Bertossi et al., 1987; van den Heuvel et al., 2008).

4. Definição do problema e formulação matemática do modelo

O problema integrado de geração da tabela de horários e escalonamento de veículos com frota heterogênea combina as duas primeiras etapas do planejamento operacional do transporte público. Dado um conjunto de viagens com um horizonte de planejamento fixo, propõe-se minimizar o custo do escalonamento e/ou o número total de veículos. A partir da ampliação do modelo VTSP, apresentado por van den Heuvel et al. (2008), o modelo proposto neste artigo, chamado de VTSP-SCT (*Vehicle Type Scheduling Problem with Sequential Change of Timetable*) visa minimizar o número total de veículos, considerando a frota heterogênea e, simultaneamente, readequar a tabela de horários vigente. Dadas as diferentes capacidades dos veículos, o modelo (a) possibilita direcionar o (tipo de) veículo mais adequado para cada viagem; (b) readequar a tabela de horários à demanda histórica e (c) minimizar os custos operacionais. Para que seja possível ajustar a tabela de horários, define-se um intervalo de tempo Δt em minutos, e analisam-se todas as viagens de serviço que possuem horários de partida próximos, com uma diferença máxima igual ao valor de Δt . Esse intervalo de tempo é de poucos minutos, a fim de minimizar os efeitos sentidos pelos passageiros na variação dos horários de ônibus. As viagens analisadas dentro do intervalo Δt devem possuir igual terminal de partida e destino, para que se possa identificar possibilidades de readequação de horários e tipos de veículos para atender a demanda total.

Para identificar quais viagens podem ser agrupadas dentro do intervalo Δt , é necessário considerar as viagens em sequência, a partir do horário da primeira viagem do dia em direção ao horário da última viagem. Assim, as viagens pertencentes a iguais terminais de partida e destino são listadas em ordem crescente de horário de partida e, após, são agrupadas em intervalos com duração máxima de Δt . O Algoritmo 1 descreve o funcionamento do modelo VTSP-SCT, sendo que para um terminal, t_{0s} representa a primeira viagem do dia, e t_{hs} a última. Ainda, A_k^{se} corresponde ao conjunto das viagens de serviço pertencentes ao intervalo de índice $k \in K$. Os conjuntos A_k^{se} são mutualmente exclusivos.

Algoritmo 1. Modelo VTSP-SCT

Parâmetros de entrada:

Δt , viagens em ordem crescente de horário de partida por terminal

Para cada terminal $s \in S$

$k \leftarrow 1$;

$t \leftarrow t_{0s}$;

Enquanto $t < t_{hs}$

$A_k^{se} \leftarrow$ todas as viagens que partem no tempo $t + \Delta t$ com o mesmo destino no terminal s ;

$k \leftarrow k+1$;

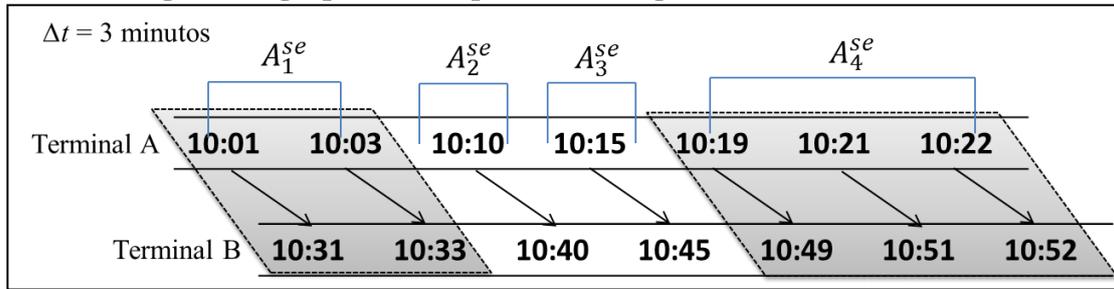
$t \leftarrow \min$ (tempo de partida da próxima viagem com destino diferente, tempo de partida da próxima viagem após $t+\Delta t$);

fim_Enquanto

fim_Para

A Figura 1 representa o agrupamento de viagens no modelo VTSP-SCT, considerando os horários de partida e chegada de viagens com mesmo terminal de origem (Terminal A) e destino (Terminal B).

Figura 1. Agrupamento sequencial de viagens no modelo VTSP SCT



Considerando-se $\Delta t=3$ minutos, tem-se para o intervalo de índice $k = 1$ o conjunto A_1^{se} formado pelas viagens que partem nos instantes 10:01 e 10:03 do terminal A, os intervalos de índice $k = 2$ e $k = 3$ compostos por apenas uma viagem cada e, para o intervalo de índice $k = 4$ o conjunto A_4^{se} , composto pelas viagens com partida às 10:19, 10:21 e 10:22. A análise do modelo VTSP-SCT recai especificamente sobre os intervalos de índice $k = 1$ e $k = 4$, identificando se há a possibilidade de realocação da demanda total desses intervalos entre as viagens que o compõe. Se, por exemplo, for possível eliminar uma ou duas viagens do intervalo de índice $k = 4$, o(s) veículo(s) que realizará(ão) as outras viagens deverão comportar a demanda de todas as viagens deste intervalo. A distribuição da demanda de um intervalo será realizada de acordo com a capacidade dos veículos que atenderão ao intervalo. Assim, pode-se ter um único veículo que comporte a demanda total das três viagens (10:19, 10:21 e 10:22) do intervalo de índice $k = 4$, ou talvez sejam necessários dois veículos, sendo que a demanda total das viagens será dividida entre eles.

O modelo VTSP-SCT pode ser formulado conforme segue. Seja K o conjunto dos intervalos de índice k , A o conjunto de todos os arcos da rede, A_k^{se} o conjunto das viagens de serviço pertencentes ao intervalo de índice $k \in K$, p_f a capacidade do veículo do tipo $f \in F$, e P_k a demanda total esperada para o intervalo de índice $k \in K$, o modelo VTSP-SCT pode ser representado por:

$$VTSP - SCT: \sum_{(i,j) \in A} c_{ijf} x_{ijf} \quad (1)$$

Sujeito à:

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ijf} - \sum_{(j,l) \in A} x_{jlf} = 0 \quad \forall j \in N, \forall f \in F \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_k^{se}} \sum_{f \in F} p_f x_{ijf} \geq P_k \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{f \in F} x_{ijf} \leq 1 \quad \forall (i,j) \in A_k^{se} \quad (4)$$

$$x_{ijf} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A_k^{se}, \forall f \in F \quad (5)$$

$$x_{ijf} \in \mathbb{N} \quad \forall (i,j) \in A \setminus A_k^{se}, \forall f \in F \quad (6)$$

A função objetivo (1) minimiza o custo total dos veículos. A restrição (2) refere-se as propriedades de fluxo da rede, a (3) garante que a capacidade dos veículos que realizarão as viagens inseridas no intervalo de índice k atenda a demanda total do intervalo. A restrição (4) assegura que todas as viagens serão operadas, no máximo, uma vez por um único veículo de determinado tipo. As restrições (5) e (6) garantem o caráter binário da variável x_{ijf} .

5. Resultados computacionais

O modelo VTSP-SCT foi implementado na linguagem de programação C++ e os testes computacionais executados em uma máquina com processador Intel® Xeon® CPU E5-1603 com

2.8 GHz e 16 GB RAM. O resolvidor de Programação Linear utilizado foi o IBM® ILOG® CPLEX® Optimization Studio V12.5, com tempo limite escolhido arbitrariamente de 7200 segundos. Os testes foram realizados com instâncias reais, advindas do sistema de transporte público da cidade de Santa Maria – RS e instâncias aleatórias de grande porte, permitindo validar a robustez do modelo na resolução de problemas com um grande número de variáveis e restrições. Na Tabela 1 são apresentadas as características das instâncias reais e aleatórias, com as respectivas origens (Origem), número de viagens (# Viagens), número de terminais (# Terminais) e número de veículos utilizados na prática para as instâncias reais (# Veículos). Para cada uma das dez configurações das instâncias aleatórias foram geradas cinco instâncias e realizada a média das mesmas para a obtenção dos resultados de cada configuração. A partir de uma análise do comportamento da demanda no sistema de transporte público de Santa Maria, geraram-se as instâncias totalmente aleatórias com número mínimo de passageiros igual a 20 e número máximo igual a 110.

Tabela 1. Características das instâncias testadas

Configuração	Origem	# Viagem	# Terminais	# Veículos
60_8	Real	60	8	15
469_9	Real	469	9	43
530_16	Real	530	16	58
1000_10A	Aleatória	1000	10	-
1000_23A	Aleatória	1000	23	-
2000_10A	Aleatória	2000	10	-
2000_23A	Aleatória	2000	23	-
3000_10A	Aleatória	3000	10	-
3000_23A	Aleatória	3000	23	-
4000_10A	Aleatória	4000	10	-
4000_23A	Aleatória	4000	23	-
5000_10A	Aleatória	5000	10	-
5000_23A	Aleatória	5000	23	-

A frota heterogênea considerada é referente a três tipos de veículos: o do tipo A com capacidade de 141 lugares, o do tipo B com 100 lugares e o do tipo C com 83 lugares. Para cada tipo de veículo, é definido um fator multiplicador dos custos, diretamente proporcional à capacidade do ônibus. Ainda, definiu-se um alto custo fixo 10^6 , a fim de minimizar o número total de veículos; dessa forma, os valores exibidos para a função objetivo (F.O) dos modelos serão elevados, pois serão balizados por essa ordem de grandeza.

5.1 Testes com instâncias reais

Estes resultados objetivam comparar o número de veículos escalonados a partir da aplicação do modelo VTSP-SCT com os utilizados na prática e os escalonados pelo modelo VTSP (sem modificação da tabela de horários). Quando se aplica o modelo VTSP-SCT às instâncias reais, busca-se definir algumas viagens que poderiam ser eliminadas da tabela de horários vigente (# Viagens agrupadas), visto que estão disponíveis veículos com diferentes capacidades, minimizando a frota necessária para atender aos usuários. Na Tabela 2 são apresentados os resultados computacionais para essas comparações, considerando-se intervalos de tempo (Δt) de 1, 2 e 3 minutos.

Tabela 2. Resultados computacionais para as instâncias reais

Instância	Modelo	Δt	F.O.	Tempo (seg.)	# Veículos			Total	#Viagens agrupadas
					A	B	C		
60_8	VTSP	0	1,412E+11	0,04	1	2	10	13	0
		1	1,412E+11	0,03	1	2	10	13	0
	VTPS-SCT	2	1,412E+11	0,02	1	2	10	13	0
		3	1,362E+11	0,03	2	1	9	12	1
469_9	VTSP	0	4,166E+11	1,08	0	3	38	41	0
		1	4,136E+11	1,10	1	3	36	40	5
	VTPS-SCT	2	3,876E+11	1,91	1	5	31	37	16
		3	3,766E+11	2,72	4	4	26	34	24
530_16	VTSP	0	5,278E+11	1,67	1	5	45	51	0
		1	5,217E+11	2,33	3	5	41	49	13
	VTPS-SCT	2	4,907E+11	3,19	4	6	35	45	25
		3	4,737E+11	4,50	9	5	26	40	45

Considerando-se a instância de menor porte (60_8), pôde-se diminuir de 13 para 12 o número de veículos necessários para atender a demanda, se comparados os modelos VTSP e VTSP-SCT com intervalo $\Delta t = 3$ minutos, respectivamente. Para este mesmo Δt , quando analisada a redução do número de veículos frente aos utilizados na prática, tem-se 3 veículos a menos, sendo necessário o agrupamento de somente uma viagem. Para a instância 469_9 obtém-se redução ainda maior no número de veículos quando aplicado $\Delta t = 3$ minutos, passando de 41 veículos do VTSP para 34 no VTSP-SCT, sendo necessário o agrupamento de 24 viagens. Conseqüentemente, na obtenção deste resultado, foi necessário aumentar a quantidade de veículos do tipo A (articulados), para comportar a demanda das viagens agrupadas. Comparando-se com os veículos escalonados na prática, pôde-se diminuir 9 ônibus ao utilizar a frota heterogênea, garantindo o atendimento da demanda historicamente registrada. Por fim, para a instância 530_16 nota-se a maior economia de veículos, sendo esses reduzidos de 51, com o VTSP, para 40 com o VTSP-SCT, considerando $\Delta t = 3$ minutos. Para tanto, agruparam-se 45 viagens, sendo necessários 9 ônibus do tipo A, 5 do tipo B e 26 do tipo C para atender a demanda. Ainda, comparando-se com a necessidade de veículos no contexto real, pode-se reduzir em até 18 veículos a frota vigente ao considerar $\Delta t = 3$ minutos.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 2, constata-se que a aplicação do modelo VTSP-SCT proporciona, além da redução dos custos, flexibilidade ao gestor na escolha de qual a melhor configuração de escalonamento a utilizar (deltas), dados os recursos disponíveis. A análise de cenários possibilitada pela aplicação desse modelo de otimização tende a contribuir na melhora da tomada de decisão das empresas de transporte público, tanto no sentido de renovação da frota quanto na melhor distribuição dos veículos por linhas de ônibus de acordo com a demanda.

5.2 Testes com instâncias aleatórias

Os testes computacionais do modelo VTSP-SCT para as instâncias aleatórias são apresentados na Tabela 3 e visam validar o modelo e identificar o seu comportamento para instâncias de grande porte.

Tabela 3. Resultados computacionais para as médias das instâncias aleatórias

Instância	Modelo	Δt	F.O.	Tempo (seg.)	# Veículos			#Viagens agrupadas	
					A	B	C		
1000_10A	VTSP	0	6,416E+11	19,92	10,6	13,6	29,8	54,0	0,0
		1	6,360E+11	19,42	10,6	13,8	29,0	53,4	4,8
	VTPS-SCT	2	6,298E+11	20,20	10,8	14,0	27,4	52,2	9,0
		3	6,254E+11	29,82	10,8	14,8	26,4	52,0	14,8
1000_23A	VTSP	0	7,021E+11	40,39	11,8	12,6	35,0	59,4	0,0
		1	7,021E+11	38,69	11,8	12,6	35,0	59,4	1,0
	VTPS-SCT	2	7,001E+11	39,38	11,8	12,6	34,8	59,2	2,2
		3	6,981E+11	43,35	11,8	12,6	34,6	59,0	3,0
2000_10A	VTSP	0	1,135E+12	66,80	18,4	18,8	59,4	96,6	0,0
		1	1,120E+12	81,18	19,2	18,4	57,2	94,8	17,6
	VTPS-SCT	2	1,109E+12	87,50	19,8	19,2	54,2	93,2	34,6
		3	1,103E+12	84,25	19,8	19,0	53,8	92,6	49,6
2000_23A	VTSP	0	1,222E+12	211,80	21,0	22,2	59,8	103,0	0,0
		1	1,215E+12	215,92	20,4	21,6	60,8	102,8	2,8
	VTPS-SCT	2	1,212E+12	188,92	20,6	21,4	60,4	102,4	6,0
		3	1,208E+12	201,59	21,0	21,0	59,8	101,8	8,2
3000_10A	VTSP	0	1,554E+12	166,53	24,4	28,6	79,6	132,6	0,0
		1	1,535E+12	188,35	24,8	29,4	76,0	130,2	33,6
	VTPS-SCT	2	1,525E+12	227,60	25,4	29,2	74,0	128,6	66,2
		3	1,501E+12	268,31	25,2	30,2	70,4	125,8	97,4
3000_23A	VTSP	0	1,693E+12	553,28	27,8	31,8	83,4	143,0	0,0
		1	1,691E+12	609,42	27,8	31,8	83,4	143,0	5,0
	VTPS-SCT	2	1,688E+12	753,71	28,0	31,8	82,6	142,4	10,6
		3	1,688E+12	779,52	28,0	31,8	82,4	142,2	15,4
4000_10A	VTSP	0	1,937E+12	276,70	28,4	34,8	103,6	166,8	0,0
		1	1,885E+12	409,54	29,4	34,2	97,4	161,0	59,4
	VTPS-SCT	2	1,853E+12	654,58	30,0	33,8	93,2	157,0	112,6
		3	1,816E+12	957,22	31,0	35,0	86,8	152,8	173,4
4000_23A	VTSP	0	2,088E+12	1380,93	31,6	40,0	106,8	178,4	0,0
		1	2,084E+12	1501,99	31,6	39,8	106,6	178,0	9,0
	VTPS-SCT	2	2,077E+12	1261,61	32,2	38,6	106,0	176,8	21,4
		3	2,074E+12	1413,91	32,2	38,6	105,8	176,6	30,0
5000_10A	VTSP	0	2,298E+12	402,48	32,0	41,6	125,4	199,0	0,0
		1	2,243E+12	621,76	33,6	41,6	117,2	192,4	80,4
	VTPS-SCT	2	2,194E+12	1248,53	34,6	45,0	105,6	185,2	162,2
		3	2,154E+12	4545,50	37,4	44,6	97,6	179,6	248,0
5000_23A	VTSP	0	2,538E+12	2060,19	34,8	50,6	133,8	219,2	0,0
		1	2,540E+12	2060,12	35,4	50,2	132,6	218,2	13,2
	VTPS-SCT	2	2,520E+12	1964,39	35,6	50,0	131,2	216,8	30,5
		3	2,498E+12	2708,91	35,9	50,8	121,8	208,4	89,6

Todas as instâncias foram resolvidas na otimalidade em tempo bastante inferior ao limite estabelecido (7200 segundos) e possibilitaram resultados, em termos de número médio de

veículos, inferiores aos encontrados no modelo VTSP (excetuando-se as instâncias 1000_23A e 3000_23A na qual o resultado para $\Delta t = 1$ minuto foi igual ao resultado do modelo VTSP). Além disso, é perceptível que quanto maior o número de terminais, menor a quantidade de viagens agrupadas, tendo em vista que há uma dispersão maior entre os itinerários das viagens, impossibilitando a maioria dos agrupamentos.

Tendo em vista a grande quantidade de resultados apresentados na Tabela 3, esta análise será realizada de modo a discutir os resultados mais relevantes. De modo geral, as instâncias de 1000 viagens são as que apresentaram menor redução no número de veículos - comparando-se todas as instâncias aleatórias testadas - agrupando quantidade não tão elevada de viagens. Esse resultado é esperado, tendo em vista que, comparada com as instâncias com maior densidade, nesta a distribuição das viagens é mais afastada, dificultando o agrupamento em intervalos curtos de Δt .

Já a solução da instância 4000_10A indica um comportamento típico de baixa demanda para as viagens. Isso pode ser visualizado a partir do aumento na quantidade de viagens agrupadas quando se acrescenta uma unidade de tempo ao Δt , aliado ao acréscimo de veículos do tipo A (maior capacidade) escalonados e a redução dos veículos do tipo C (menor capacidade) necessários para atender à demanda. Baixas demandas, ainda, costumam refletir em um melhor aproveitamento dos veículos quando utilizada a frota heterogênea aliada aos ajustes da tabela de horários, tanto que, nesta instância, reduziu-se a frota significativamente ao realizar modificações de poucos minutos na tabela de horários.

Na instância 5000_10A nota-se a maior economia de veículos se comparado ao modelo VTSP. Quando aplicado $\Delta t = 3$ minutos, obtém-se, em média, 20 veículos a menos no modelo VTSP-SCT. Por fim, na instância 5000_23A observam-se os resultados computacionais com maior tempo total de resolução, em média. Este resultado é esperado, tendo em vista o alto número de viagens e terminais desta instância. Além disso, pôde-se visualizar um comportamento bastante comum do modelo VTSP-SCT: aumentar o tempo de resolução para Δt maiores, pois há mais possibilidades de agrupamento nesses intervalos. Mesmo os tempos computacionais acima de 3600 segundos não inviabilizam a aplicação prática deste modelo, tendo em vista o custo-benefício que se obtém ao utilizá-lo, possibilitando a redução de um grande número de veículos. Além disso, considerando-se que muitos gestores ainda realizam o escalonamento dos veículos manualmente, tarefa bastante demorada, o período de 1 ou 2 horas para a resolução computacional de uma instância torna-se razoável.

De modo geral, o modelo VTSP-SCT possibilitou a redução no número de veículos sem necessitar de muito tempo de resolução computacional para as instâncias de grande porte, o que confirma a sua aplicabilidade no planejamento dos sistemas de transporte público.

6. Considerações Finais

O desenvolvimento de técnicas de pesquisa operacional que contribuam para o melhor planejamento dos sistemas de transporte público tende a minimizar problemas oriundos do tráfego urbano, bem como auxiliar no melhor atendimento à população. Baseando-se nessa perspectiva, bem como a partir de necessidades gerenciais observadas na prática de empresas de transporte público, neste trabalho foi proposto um novo modelo para a resolução do problema integrado de geração de tabela de horários e escalonamento de veículos com frota heterogênea. O objetivo deste modelo é minimizar o número de veículos e redefinir a tabela de horários a partir do agrupamento de algumas viagens, conforme a demanda de passageiros e as capacidades dos diferentes tipos de veículos disponíveis. A integração destas duas etapas tem sido reportada na literatura como de grande valia para um melhor planejamento. Ademais, ao considerar a frota heterogênea, imprime-se maior realidade à formulação dos problemas, tendo em vista que a utilização de ônibus urbanos de variados tipos é a prática na maioria das cidades ao redor do mundo.

Para modelar o problema tratado, utilizou-se a TSN, tradicionalmente aplicada no contexto de escalonamento de aeronaves. A adaptação desta rede ao escalonamento de veículos é

recente, mas já demonstra vantagens, em termos de menor dimensão, do que a rede baseada em conexões, amplamente utilizada. Por possuir rede de menor tamanho, a TSN pode auxiliar no desenvolvimento de modelos inovadores e menos complexos, com métodos de solução mais rápidos.

Os resultados do modelo VTSP-SCT possibilitaram economias no número de veículos, configurando-se como versátil no suporte à tomada de decisão no planejamento do transporte público. Isso porque, dadas as características das tabelas de horário geradas em cada configuração de intervalo de tempo Δt , pode-se definir qual adotar a fim de garantir um menor número de ônibus trafegando sem prejudicar a qualidade do atendimento prestado. Tratando-se especificamente dos resultados da aplicação do modelo às instâncias reais, observou-se redução de até 18 veículos na instância de maior porte ao intervalo $\Delta t = 3$ minutos. Este resultado é de grande valia para a operação do sistema de transporte público, tendo em vista que a sutil alteração na tabela de horários tende a economizar uma grande quantidade de veículos.

Oportunidades de pesquisas surgem a partir da realização deste estudo, podendo contribuir ainda mais com a otimização do planejamento do transporte público. A primeira delas reside na inclusão de múltiplas garagens (MD-VSP) ao problema proposto, visto que na maioria das cidades de médio e grande porte os ônibus são armazenados em mais de um local, facilitando o deslocamento dos veículos para o atendimento da população. Outra perspectiva recai sobre a integração dos problemas propostos com o problema de escalonamento da tripulação (*crew scheduling*), pois os custos incorridos da tripulação são ainda maiores do que aqueles oriundos do uso de veículos. Pesquisas que integram os problemas de escalonamento de veículos e tripulação têm sido desenvolvidas nos últimos anos, dada a importância dessas duas etapas para o planejamento operacional do transporte público. Entretanto, não se encontram publicados, até o momento, estudos que integrem esses dois problemas com a geração da tabela de horários e a frota heterogênea.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES e CNPq no desenvolvimento deste estudo, bem como o suporte fornecido pela Universidade Federal da Fronteira Sul.

Referências

- Associação Nacional dos Transportes Públicos (ANTP).** (2012), *Sistema de Informações da Mobilidade Urbana*. Relatório Geral 2011. Publicado em 2012. Disponível em: <http://www.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/04/11/050FC84C-74EA-4A33-A919-6D2E380FA2C1.pdf> Acesso em: 13 dez. 2013.
- Bertossi, A. A., Carraresi, P. and Gallo, G.** (1987), On some matching problems arising in vehicle scheduling models. *Networks*, 17, 271-281.
- Bunte, S. and Kliewer, N.** (2009), An overview on vehicle scheduling models in public transport, *Public Transport*, 1:4, 299-317.
- Ceder, A.** (2011) Public-transport vehicle scheduling with multi vehicle type. *Transportation Research Part C*, 19, 485-497.
- Ceder, A., Hassold, S., and Dano, B.** (2013), Approaching even-load and even-headway transit timetables using different bus sizes. *Public Transport*, 5:3, 193-217.
- Desaulniers, G.; Lavigne, J. and Soumis, F.** (1998), Multi-Depot Vehicle Scheduling Problems with Time Windows and Waiting Costs. *European Journal of Operational Research*, 111, 479-494.
- Freling, R., Wagelmans, A. P. M. and Paixão, J. M. P.** (1999), An overview of models and techniques for integrating vehicle and crew scheduling. In: WILSON, N. H. M. (Ed.) *Computer-aided Transit Scheduling*, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Springer, 471, 441-460, Springer, 1999.
- Guihaire, V. and Hao, J-K.** (2010), Transit network timetabling and vehicle assignment for regulating authorities. *Computers & Industrial Engineering*, 59:1, 16-23.



- Kliewer, N., Amberg, B. and Amberg, B.** (2012), Multiple depot vehicle and crew scheduling with time windows for scheduled trips, *Public Transport*, 3:3, 213-244.
- Kliewer, N., Bunte, S. and Suhl, L.** (2006b), Time windows for scheduled trips in multiple depot vehicle scheduling, *Proceedings of the EURO Working Group on Transportation*, 340-346.
- Kliewer, N., Mellouli, T. and Suhl, L.** (2002), A new solution model for multi-depot multi-vehicle-type vehicle scheduling in suburban public transport, *Mini-EURO Conference and the EUROWoring Group on Transportation*, 604-609.
- Kliewer, N., Mellouli, T. and Suhl, L.** (2006a), A TSN based exact optimization model for multi-depot bus scheduling, *European Journal of Operational Research*, 175:3, 1616–1627.
- Steinzen, I., Gintner, V and Suhl, L.** (2010), A Time-Space Network Approach for the Integrated Vehicle- and Crew-Scheduling Problem with Multiple Depots, *Transportation Science*, 44: 3, 367–382.
- van den Heuvel, A. P. R. V. D., van den Akker, J. M. V. D. and Niekerk, M. E. V. K.** (2008), Integrating timetabling and vehicle scheduling in public bus transportation. *Technical Report. Department of Information and Computing Sciences, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands*, (<http://www.computerscience.nl/research/techreps/repo/CS-2008/2008-003.pdf>), 2008.
- Visentini, M. S., Borenstein, D, Araújo, O. C. B. and Guedes, P.** (2013). A new implementation to the vehicle type scheduling problem with time windows for scheduled trips, *Anais do XLV SBPO*.