

Problemas de Alocação de Frotas: Estudo de Caso em uma Linha de Transporte Público

Felipe Soares Tiburcio (Universidade Federal de Santa Catarina) felipesoarestiburcio@gmail.com

Márcio Alexandre Lopes Júnior (Universidade Federal de Santa Catarina)

marcio.alexandre.lopes.junior@grad.ufsc.br

Christiane Wenck Nogueira Fernandes (Universidade Federal de Santa Catarina) christiane.fernandes@ufsc.br

Silvia Lopes de Sena Taglialha (Universidade Federal de Santa Catarina) s.taglialha@ufsc.br

Resumo: O presente trabalho tem foco no plano de operação de uma empresa do transporte público urbano catarinense, visando a alocação da frota em uma dada linha. O artigo trata do problema de alocação de frota entre dois terminais e possui como objetivo reduzir o tempo de ociosidade dos veículos entre as viagens, bem como estimar a frota mínima necessária. A ênfase é dada na caracterização do problema, na sua modelagem matemática e em sua solução utilizando um método exato. Como na prática o grau de complexidade do problema é elevado e na maioria dos casos utilizam-se métodos heurísticos para resolvê-lo, uma das propostas do artigo é apresentar uma solução ótima ao problema e a possibilidade de expandir o método aos demais horários e às demais linhas ofertadas pela empresa.

Palavras chave: Programação matemática, Alocação de frotas, Transporte público.

Crew scheduling problem: Case Study on a Public Transit Line

Abstract:

The aim of this work is the fleet allocation in a specific line on the operation plan of a Santa Catarina urban company public transport. It addresses the problem of fleet allocation between two terminals and aims to reduce vehicle downtime between trips, as well as to estimate a minimum fleet. Emphasis is given to the characterization of the problem, its mathematical modeling and its solution using an exact method. Since most of the researchers have proposed heuristic methods the techniques used in this work is based an optimal solution to the problem and it is possible to expand the method to other items and others lines.

Key-words: mathematical programming, Crew scheduling problem,

1. Introdução

O transporte público é um direito que todo cidadão possui garantido por lei através do Inciso XX do Artigo 21º da Constituição Federal Brasileira de 1988 (BRASIL, 1988) e da Lei Federal 12.578 de 2012 que trata da Política Nacional de Mobilidade Sustentável (BRASIL, 2012). Neste sentido, o serviço de transporte coletivo de passageiros tem como função primária ser um promotor de igualdade e inclusão social, possibilitando o acesso às infraestruturas urbanas de saúde, educação, trabalho e lazer ao cidadão. Adicionalmente, além de ser um benefício social, o uso do transporte coletivo, que na maioria das cidades brasileiras é realizado de modo rodoviário por meio de ônibus, se torna indispensável na tentativa de minimizar os efeitos negativos ambientais e econômicos causados pelo uso excessivo de automóveis e motocicletas (EUROPEAN COMMISSION, 2013; DEPARTMENT OF INFRASTRUCTURE AND REGIONAL DEVELOPMENT, 2014; MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2013).

Desta forma, o planejamento e controle de aspectos operacionais do transporte coletivo, com o objetivo de torná-lo eficaz e eficiente do ponto de vista da utilização de recursos, se tornam problemáticas relevantes nos dias atuais. Problemas de aspecto operacional implicam em uma variedade de problemas de tomada de decisão que podem variar, por exemplo, da decisão do melhor itinerário, alocação de frotas e condutores, grade de horários, até a formulação de novas linhas de ônibus. Tais fatores impactam diretamente no custo de prestação de serviço, o que por sua vez, podem encarecer a tarifa do transporte. Segundo Lachtermacher (2009), métodos de modelagem matemática auxiliam no processo de tomada de decisão, uma vez que possibilitam a avaliação de diferentes cenários para um problema, o que resulta em maiores chances de se encontrar soluções ótimas para problemas.

1.1. Objetivo

O presente artigo tem por objetivo a aplicação do método de programação matemática para problemas de fluxo de custo mínimo proposto por Dantzig e Fulkerson (1954) para a resolução do problema operacional de Alocação de Frotas em um estudo de caso do transporte público da cidade de Joinville.

O objetivo geral do modelo matemático de Dantzig e Fulkerson (1954) é determinar o menor custo (temporal ou financeiro) associado à realização de um grupo de viagens, dado que cada uma das viagens deve ser realizada por um único veículo de uma frota. Consequentemente, o objetivo geral do estudo de caso é alocar parte da frota de ônibus da empresa Gidion Transporte e Turismo Ltda. para a realização das viagens da linha 0200 em dias úteis das 17:30 às 20:00, minimizando o custo associado à ociosidade dos veículos entre as viagens.

2. Referencial Teórico

De acordo com Hillier (2013), a pesquisa operacional apresenta grande impacto na melhoria da eficiência de inúmeras organizações que a utilizam para aprimorar seus processos e produtividade, na qual tem como objetivo solucionar os conflitos e conduzir à melhor solução de problemas.

No conjunto de estudos da área de pesquisa operacional, o Problema de Alocação de Frotas (ou Vehicle Scheduling Problem - VSP) e condutores se classifica como um problema de otimização de Programação binária (Scheduling ou “Agendamento”), que diferentemente dos problemas de Roteirização – que são problemas de configuração espacial – é relacionado aos aspectos de configuração temporal dos transportes. Problemas de alocação de frotas e condutores têm como objetivo geral alocar veículos (máquinas) e condutores (agentes) para que realizem determinadas viagens (tarefas) obedecendo às restrições de horário inicial e final, locais de origem e destino de cada uma das tarefas de forma a minimizar os custos operacionais.

Em geral, os problemas de alocação de frotas e condutores estão diretamente ligados entre si, na qual uma mudança de restrição em uma, implica na consideração da outra. Tais problemas devem, portanto, ser resolvidos em conjunto. Em contrapartida, a integração dos problemas no modelo de otimização aumenta o grau de complexidade. Sendo assim, suas variações são consideradas problemas NP-completos, significando em um aumento do tempo de processamento (MAYERLE, 1985). Por isso, na resolução de problemas que exigem a alocação de ambos, veículos e condutores, é adotada a metodologia sequencial, primeiro se resolve um problema depois o outro.

Mayerle (1985) expõe ainda três diferentes restrições impostas pelo problema, sendo elas:

- Limitante no deslocamento em função do reabastecimento do veículo;

- Frotas heterogêneas restringindo a alocação de viagens;
- Existência de múltiplas garagens.

De acordo com tais restrições, a alocação de frotas e condutores pode ser dividida em quatro diferentes problemas. Bodin et al. (1983) as descreve como: Alocação de Frota com uma Garagem (VSP), Alocação de Frota com Múltiplas Garagens (VSPMD), Alocação de Frota com Múltiplos Tipos de Veículos (VSPMVT) e Alocação de Frota com Restrição no Comprimento da Sequência de Viagens (VSPLPR). Neste artigo será considerado apenas o problema de alocação de frota com uma garagem (VSP).

No que diz respeito aos estudos sobre o VSP, Bodin (1985) expõe que uma maneira de representar o problema de alocação de frotas é através de um grafo $G = (V, A)$ onde V é o conjunto de vértices que descrevem as tarefas e A , o conjunto de arestas que indicam a possibilidade de uma ou mais tarefas serem executadas sequencialmente pelo mesmo veículo.

Assim, a resolução do VSP consiste em particionar o grafo G , em um conjunto de caminhos cíclicos que representam a sequência de viagens realizadas por um único veículo tendo a Garagem como ponto de partida e chegada, de modo a minimizar a função de fluxo de custo mínimo sujeita a restrições. A seguir têm-se o modelo de fluxo de custo mínimo proposto por Dantzig e Fulkerson (1954) formulado para o VSP.

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in A} x_{ij} - \sum_{i:(j,i) \in A} x_{ji} = 0 \quad \forall j \in V \quad (2)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in A} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V (j \neq \text{Garagem}) \quad (3)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in A} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V (i \neq \text{Garagem}) \quad (4)$$

$$\frac{HS_j - (HC_i + d_{ij})}{|HS_j - (HC_i + d_{ij})| + \varepsilon} + 1 > x_{ij} \quad \forall i, j \quad (5)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a viagem } j \text{ é realizada na sequência da viagem } i. \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6)$$

Em que:

HS_i : horário de início (saída) da tarefa i .

HC_i : horário de término (chegada) da tarefa i .

d_{ij} : tempo de deslocamento entre o local de destino de i e origem de j .

ε : valor suficientemente pequeno.

A equação (1) indica que a cada aresta x_{ij} existirá um custo c_{ij} associado que fisicamente é igual ao custo de efetuar a tarefa j na sequência da tarefa i . A equação (2) diz respeito à restrição de conservação de fluxo o que pode ser entendida no VSP como: se um veículo parte

da garagem para realizar uma tarefa o mesmo deve retornar ao local de origem. As restrições (3) e (4) garantem que cada vértice fará parte de apenas um caminho, o que implica que cada tarefa será realizada por apenas um veículo.

A restrição (5) indica que o tempo final do nó i deve ser menor do que o tempo inicial do nó j mais o tempo de deslocamento entre o local de destino do nó i e o local de origem do nó j (SILVA, 2017). Por último a restrição (6) define os valores que a variável de decisão pode assumir.

A figura 1 exemplifica um grafo de VSP e aborda um problema de 10 viagens sem restrição de comprimento dos caminhos.

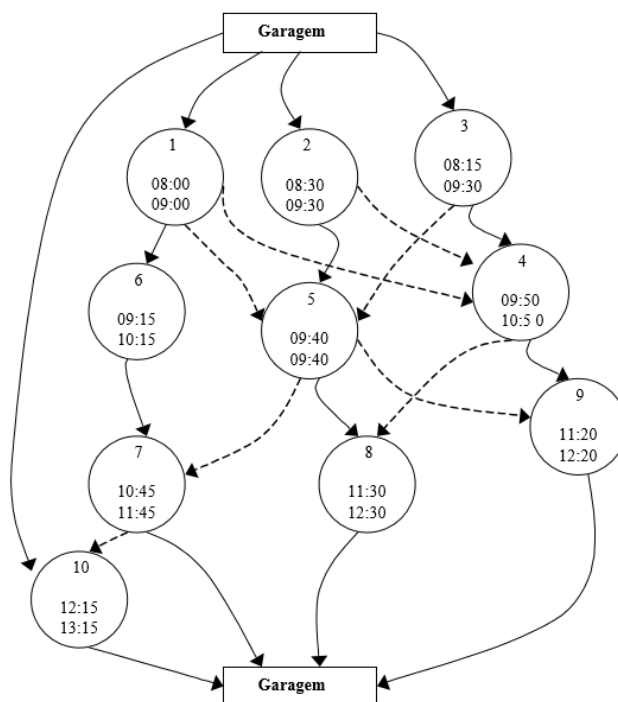


Figura 1: Esquema de alocação de 10 viagens a uma frota de 4 veículos. Fonte: Mayerle (1996)

O grafo acima retrata que cada vértice, diferente da garagem, corresponde a uma viagem (tarefa) a ser realizada por um único veículo, tendo como informação o horário de início e fim de cada viagem, bem como os locais de origem e destino. No caso da figura, o local de origem é igual ao local de destino em todas as viagens. Os arcos tracejados representam a possibilidade de sequência caso a restrição do tempo final do nó i ser menor do que o tempo inicial do nó j seja satisfeita. Já os arcos sólidos representam a sequência que o modelo de minimização encontrou como solução ótima para o dado exemplo.

3. Estudo de Caso

3.1. Contextualização

A empresa de transporte público selecionada para o presente estudo possui cerca de 850 colaboradores, frota de 260 veículos que percorrem aproximadamente 1.300.000 km/mês e mais de 4500 horários de ônibus distribuídos em 114 itinerários e atualmente realiza a operação das linhas da Zona Sul da cidade de Joinville (GIDION, 2017).

O estudo realizado teve como conjunto de tarefas uma parcela dos horários ofertados pela linha de ônibus 0200, cujas rotas estão representadas nas Figuras 1.a (esquerda) e 1.b (direita).

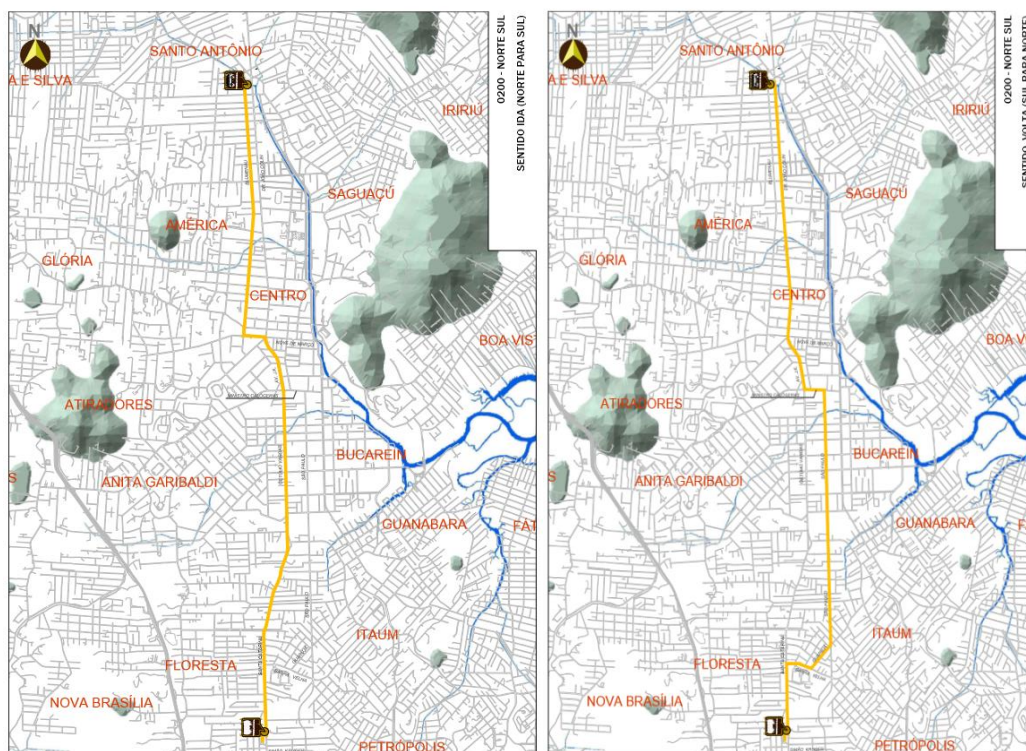


Figura 1.a: Representação da linha 0200 sentido ida (norte-sul).

Figura 1.b: Representação da linha 0200 sentido volta (sul-norte).

A linha 0200 denominada Norte-Sul pode ser classificada como troncal e é de suma importância para a movimentação diária de passageiros, uma vez que possibilita o deslocamento entre pontos extremos da cidade passando pela região central.

3.2. Premissas

Os problemas reais que envolvem a alocação de frota em geral são de grande porte e inviáveis de se resolver utilizando métodos exatos. Neste caso, as heurísticas aparecem como soluções eficientes para o tratamento desses problemas (normalmente NP-difíceis).

Em contrapartida, para que fosse possível a aplicação do método exato para resolução de problemas de fluxo de custo mínimo, os autores deste artigo limitaram o conjunto de tarefas como sendo as viagens ofertadas em dias úteis das 17:30 às 20:00 horas de apenas uma linha de ônibus do sistema de transporte coletivo (a linha 0200). O que resultou em um conjunto de tarefas com 32 viagens.

3.3. Modelo de otimização

Segundo Mayerle (1996), no caso específico do transporte urbano de passageiros, o dado de entrada básico consiste em um conjunto de tarefas ou viagens a serem realizadas.

Tarefa (Viagens)	Origem	Horário inicial	Destino	Horário final
1	Garagem	21:30:00	Garagem	16:00:00
2	Terminal Norte	17:30:00	Terminal Sul	18:06:22
3	Terminal Sul	17:30:00	Terminal Norte	18:06:22
4	Terminal Norte	17:34:00	Terminal Sul	18:10:22
5	Terminal Sul	17:38:00	Terminal Norte	18:14:22
6	Terminal Norte	17:40:00	Terminal Sul	18:16:22
7	Terminal Sul	17:46:00	Terminal Norte	18:22:22
8	Terminal Norte	17:47:00	Terminal Sul	18:23:22
9	Terminal Norte	17:53:00	Terminal Sul	18:29:22
10	Terminal Sul	17:54:00	Terminal Norte	18:30:22
11	Terminal Norte	17:59:00	Terminal Sul	18:35:22
12	Terminal Sul	18:03:00	Terminal Norte	18:38:44
13	Terminal Norte	18:07:00	Terminal Sul	18:42:44
14	Terminal Norte	18:12:00	Terminal Sul	18:47:44
15	Terminal Sul	18:12:00	Terminal Norte	18:47:44
16	Terminal Norte	18:15:00	Terminal Sul	18:50:44
17	Terminal Sul	18:20:00	Terminal Norte	18:55:44
18	Terminal Norte	18:23:00	Terminal Sul	18:58:44
19	Terminal Sul	18:28:00	Terminal Norte	19:03:44
20	Terminal Norte	18:32:00	Terminal Sul	19:07:44
21	Terminal Sul	18:38:00	Terminal Norte	19:13:44
22	Terminal Norte	18:41:00	Terminal Sul	19:16:44
23	Terminal Sul	18:48:00	Terminal Norte	19:23:44
24	Terminal Norte	18:49:00	Terminal Sul	19:24:44
25	Terminal Norte	18:58:00	Terminal Sul	19:33:44
26	Terminal Sul	19:00:00	Terminal Norte	19:28:28
27	Terminal	19:09:00	Terminal Sul	19:37:28

	Norte				
28	Terminal Sul	19:10:00	Terminal Norte	19:38:28	
29	Terminal Norte	19:19:00	Terminal Sul	19:47:28	
30	Terminal Sul	19:22:00	Terminal Norte	19:50:28	
31	Terminal Norte	19:30:00	Terminal Sul	19:58:28	
32	Terminal Sul	19:34:00	Terminal Norte	20:02:28	

Tabela 1 – Dados de entrada do problema. Fonte: Gidion 2017.

Neste caso, cada viagem i possui as seguintes informações (Tabela 1):

- horário de início (saída) da tarefa i (HS_i);
- horário de término (chegada) da tarefa i (HC_i);
- local de origem (saída) da tarefa i (LS_i);
- local de destino (chegada) da tarefa i (LC_i).

Uma consideração é importante a respeito da Tabela 1. Na Figura 1 apresentada no item 2 deste artigo, o vértice que representa a garagem é um ponto geográfico enquanto que os demais vértices representam tarefas, o que faz com que o grafo $G = (V, A)$ seja não uniforme quanto às informações dos vértices.

Manter a garagem como um ponto geográfico inviabiliza a resolução do VSP computacionalmente visto que uma viagem j será posicionada após uma viagem i caso o tempo final do nó i seja menor do que o tempo inicial do nó j mais o tempo de deslocamento entre o local de destino do nó i e o local de origem do nó j (SILVA, 2017). Se a garagem não possui horário de início ou término não existirá veículos partindo ou chegando à mesma.

Sendo assim, houve a necessidade de transformar a garagem em uma tarefa em que o tempo final é no mínimo 1,5 horas menor que o menor tempo inicial dentre as viagens, o que torna possível a alocação (saída) de veículos da garagem para qualquer uma das tarefas, e com horário inicial no mínimo 1,5 horas maior que o maior tempo final dentre as viagens, o que viabiliza a alocação (chegada) de veículos de qualquer uma das tarefas para a garagem.

3.3.1. Função objetivo

Como o principal objetivo do problema é reduzir o tempo ocioso dos veículos entre tarefas, o que é equivalente a minimizar o tempo de espera entre o término da viagem i e início da viagem j , tem-se a função objetivo na equação (1). Onde c_{ij} representa a ociosidade em hora associada a cada arco $(i, j) \in A$ e x_{ij} é a variável de decisão binária que indicará se a viagem de i para j é realizada.

$$\text{Minimizar } \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Minimizar } c_{G1} x_{G1} + c_{G2} x_{G2} + \dots + c_{Gn} x_{Gn} + \dots + c_{G31} x_{G31} \\ + \dots + c_{1G} x_{1G} + \dots + c_{nn} x_{nn} + \dots + c_{nG} x_{nG}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a viagem } j \text{ é realizada na sequência da viagem } i. \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A determinação do custo de ociosidade c_{ij} se deu através da criação de uma matriz de custo C de tamanho $n \times n$ ($n = 32$) com o auxílio da ferramenta Excel®. Os elementos c_{ij} foram determinados através do seguinte procedimento:

Se $HS_j - HC_i < 0$ então $c_{ij} \rightarrow \infty$;

Se não, $c_{ij} \rightarrow HS_j - HC_i$.

A estrutura de decisão “Se” acima testa a condição do horário de início HS_j da viagem j ser menor que o horário de término HC_i da viagem i o que resulta no fato de que o veículo utilizado na viagem i não poderá realizar a viagem j porque ainda não concluiu a tarefa i quando a tarefa j deveria estar se iniciando.

Neste caso, a célula da planilha é preenchida com um valor suficientemente grande para que a equação (1) rejeite esta possibilidade de alocação.

Caso contrário, se $HS_j - HC_i \geq 0$, tem-se que o horário de início da viagem j é maior que o horário de término da viagem i , logo o custo de ociosidade $c_{ij} = HS_j - HC_i$.

3.3.2. Restrições

A equação (2) do modelo corresponde ao princípio da conservação de fluxo e garante que o grau de entrada em cada nó do grafo seja equivalente ao grau de saída.

$$\sum_{i:(i,j) \in A} x_{ij} - \sum_{i:(j,i) \in A} x_{ji} = 0 \quad \forall j \in V \quad (2)$$

As equações (3) e (4) correspondem às restrições de caminho único. Ou seja, garantem que cada vértice pertencerá a somente um caminho. Ambas as restrições excluem o vértice G (garagem), uma vez que este vértice é comum a todos os caminhos. Em outras palavras, todos os caminhos partem e chegam à garagem.

$$\sum_{i:(i,j) \in A} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \ (j \neq \text{Garagem}) \quad (3)$$

$$\sum_{j:(i,j) \in A} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \ (i \neq \text{Garagem}) \quad (4)$$

A restrição (5) indica que o tempo final do nó i deve ser menor do que o tempo inicial do nó j mais o tempo de deslocamento entre o local de destino do nó i e o local de origem do nó j (SILVA, 2017).

$$\frac{HS_j - (HC_i + d_{ij})}{|HS_j - (HC_i + d_{ij})| + \varepsilon} + 1 > x_{ij} \quad \forall i, j \quad (5)$$

As restrições (7) e (8) correspondem às viagens realizadas pela garagem. A equação (7) garante que a quantidade de viagens que saem da garagem seja menor ou igual a um valor M suficientemente grande que corresponde à quantidade de veículos presente na frota (utilizou-se o valor 260). De forma análoga, a equação (8) garante que a quantidade de viagens que entram na garagem seja menor ou igual a esse valor.

$$\sum_{j \in A} x_{Gj} \leq M \quad \forall G \quad (7)$$

$$\sum_{i \in A} x_{iG} \leq M \quad \forall G \quad (8)$$

3.3.3. Software utilizado

Para a resolução do problema os autores utilizaram o pacote computacional AMPLIDE® (Mathematical Programming Language).

3.3.4. Resultados obtidos

Como resultado da modelagem do Problema de Alocação de Frota – modelado como um problema de fluxo de custo mínimo –, o software AMPLIDE® apresentou uma matriz de adjacência (Figura 2) em que cada elemento representa a variável de decisão x_{ij} .

	G	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	V21	V22	V23	V24	V25	V26	V27	V28	V29	V30	V31	Total
G	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12
V1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V24	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V26	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V27	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V28	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V29	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V30	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
V31	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Total	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 2: Matriz de adjacência do grafo $G = (V, A)$ para o estudo de caso. Matriz das variáveis de decisão proveniente do AMPLIDE®. Fonte: Autores.

Uma forma de ler a matriz de adjacência apresentada acima seria partindo da primeira linha que representa as viagens que saem diretamente da garagem e encontrar as células que

possuem variável x_{Gj} de decisão igual 1 (um). Essa seria a primeira tarefa realizada por um veículo, por exemplo, $x_{GV1} = 1$. Neste caso, um ônibus parte da garagem e realiza a viagem V1.

Para encontrar a próxima viagem da sequência de tarefa procura-se o elemento $x_{V1j} = 1$, que no caso é V16. Atualizamos a sequência que agora é dada por: um ônibus sai da garagem, realiza a viagem V1 e depois a viagem V16. Para a próxima viagem da sequência procura-se $x_{V16j} = 1$, que no caso é V24. O processo continua até que o ônibus retorne à garagem.

A Figura 3 retrata todos os caminhos encontrados pela modelagem. Nesse caso, cada caminho representa a sequência de tarefas realizada por um único veículo.

Veículo	Sequencia de Tarefas	Origem	Horário Saída	Destino	Horário Chegada	Operação por Veículo	Ociosidade por Veículo
1	1	Terminal Norte	17:30:00	Terminal Sul	18:06:22	02:07:28	00:26:54
	16	Terminal Sul	18:20:00	Terminal Norte	18:55:44		
	26	Terminal Norte	19:09:00	Terminal Sul	19:37:28		
2	2	Terminal Sul	17:30:00	Terminal Norte	18:06:22	01:53:44	00:05:54
	13	Terminal Norte	18:12:00	Terminal Sul	18:47:44		
	22	Terminal Sul	18:48:00	Terminal Norte	19:23:44		
3	3	Terminal Norte	17:34:00	Terminal Sul	18:10:22	02:28:28	00:12:10
	14	Terminal Sul	18:12:00	Terminal Norte	18:47:44		
	23	Terminal Norte	18:49:00	Terminal Sul	19:24:44		
4	31	Terminal Sul	19:34:00	Terminal Norte	20:02:28	02:20:28	00:11:26
	4	Terminal Sul	17:38:00	Terminal Norte	18:14:22		
	15	Terminal Norte	18:15:00	Terminal Sul	18:50:44		
5	25	Terminal Sul	19:00:00	Terminal Norte	19:28:28	00:36:22	00:00:00
	30	Terminal Norte	19:30:00	Terminal Sul	19:58:28		
	5	Terminal Norte	17:40:00	Terminal Sul	18:16:22		
6	6	Terminal Sul	17:46:00	Terminal Norte	18:22:22	01:12:44	00:00:38
	17	Terminal Norte	18:23:00	Terminal Sul	18:58:44		
7	7	Terminal Norte	17:47:00	Terminal Sul	18:23:22	02:00:28	00:19:54
	18	Terminal Sul	18:28:00	Terminal Norte	19:03:44		
	28	Terminal Norte	19:19:00	Terminal Sul	19:47:28		
8	8	Terminal Norte	17:53:00	Terminal Sul	18:29:22	01:40:44	00:28:38
	24	Terminal Norte	18:58:00	Terminal Sul	19:33:44		
9	9	Terminal Sul	17:54:00	Terminal Norte	18:30:22	01:13:44	00:01:38
	19	Terminal Norte	18:32:00	Terminal Sul	19:07:44		
10	10	Terminal Norte	17:59:00	Terminal Sul	18:35:22	01:14:44	00:02:38
	20	Terminal Sul	18:38:00	Terminal Norte	19:13:44		
11	11	Terminal Sul	18:03:00	Terminal Norte	18:38:44	01:47:28	00:07:32
	21	Terminal Norte	18:41:00	Terminal Sul	19:16:44		
	29	Terminal Sul	19:22:00	Terminal Norte	19:50:28		
12	12	Terminal Norte	18:07:00	Terminal Sul	18:42:44	01:31:28	00:27:16
	27	Terminal Sul	19:10:00	Terminal Norte	19:38:28		

Figura 3: Alocação de frota para o estudo de caso. Fonte: Autores.

Como pôde ser observada na Figura 3, a modelagem apontou como solução ótima a utilização de 12 veículos para a realização do conjunto de tarefa em questão. A figura apresenta ainda o tempo de operação de cada veículo, bem como o custo com ociosidade temporal em cada uma das sequências.

A Tabela 2 mostra o somatório total das horas em operação e ociosidade.

	Operação	Ociosidade
Total (horas)	20:07:50	02:24:38
Média	01:40:39	00:12:03
Desvio Padrão	00:31:05	00:10:29

Tabela 2- Operação total e ociosidade total em horas. Fonte: Autores.

4. Considerações Finais

Para a análise da aplicação da modelagem de fluxo de custo mínimo apresentada por Dantzig e Fulkerson (1954) para a resolução de problema de alocação de frotas, foi selecionado um conjunto de viagens (tarefas) ofertadas por uma linha troncal de ônibus da cidade de Joinville denominada linha 0200 Norte Sul.

O modelo proposto por este artigo apontou como solução ótima a utilização de 12 veículos para a realização do conjunto de tarefas em questão e um total de aproximadamente 20 horas em operação e aproximadamente 02h25m em ociosidade. Os autores não tiveram acesso aos dados de alocação de frota, tempo de operação e ociosidade para o conjunto tarefa em questão.

Devido ao fato do software utilizado neste artigo (AMPLIDE®) necessitar de um arquivo do tipo “.mod” para execução do modelo matemático e um arquivo “.dat” para o tratamento dos dados, os autores sugerem que para trabalhos futuros cseja considerado a expansão do conjunto de tarefas através da alteração do arquivo “.dat”. Uma vez que o arquivo “.mod” permanecerá inalterado, se tornará possível a comparação entre o modelo apresentado neste trabalho e a situação real de alocação de frotas no transporte público de Joinville.

Referências

BODIN, L.; GOLDEN, B.; ASSAD, A. e BALL, M. **Routing and scheduling of vehicles and crews. The State of the Art.** Computers and Operations Research, 10(2), 63-212, 1983.

BRASIL. Constituição da república federativa do Brasil de 1988. Diário Oficial da União República Federativa do Brasil — Seção 1, Brasília, DF., p. 1–32, 1988.

BRASIL. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da política Nacional de mobilidade urbana. Diário Oficial da União República Federativa do Brasil seção 1, Brasília, DF. p. 1–3, 2012.

DANTZING, G., B.; ORDEN, A. e WOLFE, P. **The Generalized Simplex Method for Minimizing a Linear Form under Linear Inequality Restraints, Rand Research Memorandum RM-1264** (April 5, 1954).

DEPARTMENT OF INFRASTRUCTURE AND REGIONAL DEVELOPMENT.

Trends. Infrastructure and Transport to 2030. Austrália, 2014. Disponível em:

<https://infrastructure.gov.au/infrastructure/publications/files/Trends_Infrastructure_and_Transport_to_2030.pdf>.

EUROPEAN COMMISSION. EU Energy, **Transport and GHG Emissions.** Trends to 2050. European Union, 2013. Disponível em:

<<http://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/media/publications/doc/trends-to2050-update-2013.pdf>>.

HILLIER, F.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 9ª Edição. AMGH, 2013.

MAYERLE, S.F. **Um Sistema de apoio à decisão para o planejamento operacional de empresas de transporte rodoviário urbano de passageiros**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 1996.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Política Nacional de Mobilidade Urbana.

Brasil, 2013. Disponível em: <<http://www.portalfederativo.gov.br/noticias/destaques/municipios-devem-implantar-planos-locais-de-mobilidade-urbana/CartilhaLei12587site.pdf>>.