

META-HEURÍSTICA STEP COUNTING HILL CLIMBING (SCHC) PARA RESOLVER O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DA TRIPULAÇÃO DE ÔNIBUS URBANO

Danilo Santos Souza

Faculdade de Tecnologia de Alagoas
Av. Presidente Roosevelt, 1200 – Serraria, Maceió - AL.
danilo.gdc@gmail.com

Gustavo Peixoto Silva

Universidade Federal de Ouro Preto
Campus Morro do Cruzeiro – Bauxita, Ouro Preto - MG.
gustavo@iceb.ufop.br

Baldoino Fonseca dos Santos Neto

Universidade Federal de Alagoas
Campus A. C. Simões – Cidade Universitária, Maceió - AL.
baldoino@ic.ufal.br

RESUMO

O Problema de Alocação da Tripulação consiste em gerar um conjunto de escalas de trabalho, dado um conjunto de viagens estabelecidas e seus devidos veículos alocados, atribuindo estas escalas aos motoristas. O objetivo do problema é gerar essas escalas com o menor custo operacional possível, satisfazendo restrições trabalhistas, legislações, normas sindicais e normas internas das empresas. A obtenção de soluções com menor custo operacional está relacionada com na redução da quantidade de jornadas, da quantidade de horas extras, do tempo ocioso entre as tarefas a serem realizadas pela tripulação e do número de jornadas do tipo dupla pegada. Neste trabalho é proposta a utilização de uma meta-heurística Step Counting Hill Climbing (SCHC), para resolver este problema. Todos os testes computacionais realizados utilizaram instâncias geradas a partir de dados reais de uma empresa do setor de transporte público da cidade de Belo Horizonte/MG.

PALAVRAS CHAVE. Programação de Tripulações de Ônibus, Métodos Heurísticos, Step Counting Hill Climbing.

Área principal. L&T. MH.

ABSTRACT

The Crew Scheduling Problem consists to create of a set of work schedules, given a set of established trips and their proper allocated vehicles, attributing these scales to drivers. The objective of the problem is to generate these scales with the lowest possible operating cost, satisfying work laws, trade union rules and internal regulations of the companies. Obtaining solutions with lower operating costs is related to the in reduction of the amount of work schedules, the amount of overtime, the idle time between tasks to be performed by the crew and the number of split duty type journeys. In this research is we proposed the use of a metaheuristic Step Counting Hill Climbing (SCHC), to solve this problem. All computational tests used instances generated based on real data from a company in the public transport sector in the city of Belo Horizonte/MG..

KEYWORDS. Bus Crew Scheduling, Heuristics Methods, Step Counting Hill Climbing.

Main area. L&T. MH.

1. Introdução

Empresas de transporte público estão cada vez mais buscando utilizar ferramentas computacionais para diminuir o custo de alocação de suas tripulações na frota operacional, ou seja, definir quais serão os motoristas e cobradores que realizarão as viagens diárias programadas. Neste trabalho é abordado o Problema da Escala de Motoristas de Ônibus Urbano, também conhecido na literatura como Problema de Programação da Tripulação (PPT), que consiste em gerar um conjunto de jornadas de trabalho para as tripulações que conduzirão a frota em operação de uma empresa de transporte público. Além disso, estas jornadas devem obedecer às restrições impostas pelas empresas, as leis trabalhistas e os acordos contidos nas convenções coletivas de trabalho.

Este problema vem sendo estudado desde a década de 60, quando Elias (1964) apresenta o trabalho pioneiro, que consiste na automação do trabalho antes realizado manualmente. Devido às constantes mudanças no sistema de transporte público várias pesquisas são realizadas para representar e resolver o problema de maneira mais eficiente (Shen e Kwan, 2001; Lourenço *et al.*, 2001; Souza *et al.*, 2004; Fournier, 2009; Silva e Cunha, 2010; Reis e Silva 2014, Souza e Silva, 2013).

A importância do PPT vem do fato que o custo de mão de obra operacional de uma empresa de transporte público compõe grande parte dos gastos da mesma (Bouzada, 2003). A redução deste custo é de grande interesse das empresas, pois essa economia pode ser reinvestida em outras áreas dentro da empresa, como qualificação dos seus funcionários, manutenção da frota, entre outros. Desta forma, a qualidade do serviço pode ser melhorada, assim como o retorno à empresa.

Devido às restrições operacionais vigentes nas empresas, às leis trabalhistas e aos acordos contidos nas convenções coletivas de trabalho, o PPT torna-se de grande complexidade. Este pode ser modelado como um problema de particionamento ou de recobrimento com variáveis binárias, o que o torna NP-hard, para o qual não existe algoritmo de complexidade polinomial que obtenha a solução ótima (Fischetti *et al.*, 1987).

O PPT tem como dados de entrada a Programação dos Veículos, que corresponde ao sequenciamento das viagens a serem realizadas por cada ônibus em operação de uma dada empresa. Cada viagem a ser realizada apresenta uma hora de início e de fim, além do seu ponto inicial e o seu ponto final. O conjunto de todas as viagens realizadas por um veículo constitui o seu *bloco de viagens*. Desta forma é possível prever o horário de partida do veículo da garagem e o seu retorno ao final do dia, assim como o detalhamento de todas as viagens e eventuais pausas realizadas pelo veículo ao longo da operação. As viagens de cada veículo são agrupadas em *tarefas*, que são uma sequência de viagens consecutivas que devem ser executadas por um único condutor, uma vez que entre estas viagens não existe tempo suficiente para que ocorra a troca da tripulação. Cada *jornada* corresponde a um conjunto de tarefas que será realizado por uma tripulação ao longo de um dia. As jornadas tem que respeitar as restrições impostas pela empresa e pelas leis trabalhistas e convenções coletivas.

No problema abordado estão presentes dois tipos de jornadas. A *dupla pegada* é uma jornada caracterizada por um conjunto de tarefas que tem um intervalo entre duas tarefas maior ou igual a um dado valor estipulado, no caso de duas horas. Este tipo de jornada é utilizado para a condução dos veículos que operam apenas durante os horários de pico, os quais ocorrem principalmente no início da manhã e no final da tarde. O intervalo de tempo entre os dois pedaços de jornada não é contabilizado como hora trabalhada.

Em uma jornada do tipo *pegada simples* os intervalos entre as tarefas são menores do que o valor estipulado para a dupla pegada. Independentemente do tipo de jornada, as horas extras correspondem ao tempo trabalhado além do tempo normal, que no caso é de seis horas e quarenta minutos. A resolução do PPT tem como objetivo atribuir as tarefas às tripulações de modo que cada tarefa seja realizada por uma tripulação, as restrições do problema sejam atendidas e que o custo total composto pelo número de tripulações e a quantidade de horas extras seja minimizado.

Devido à complexidade deste problema, a utilização de métodos exatos fica restrita,

impossibilitando a resolução de problemas reais de grandes dimensões. Desta forma, os métodos heurísticos são amplamente utilizados para resolver o problema (Ernst *et al.*, 2004a).

Este trabalho tem como objetivo resolver o Problema da Programação de Tripulação de Ônibus Urbano utilizando a meta-heurística *Step Counting Hill Climbing*, de modo a reduzir o máximo possível os custos operacionais na atribuição das viagens às tripulações e avaliar as vantagens e desvantagens desta abordagem na resolução de problemas reais.

Os demais capítulos deste artigo estão organizados da seguinte forma: na seção 2 é realizada uma Revisão Bibliográfica sobre problema é apresentada. Na seção 3 é definido o Problema da Programação da Tripulação. Na seção 4 é abordada a meta-heurística proposta para resolver o problema trabalhado. Na seção 5 são apresentados os testes computacionais e suas considerações para o problema. A seção 6 contém as considerações finais e os trabalhos futuros.

2. Revisão da Literatura

O PPT é um problema clássico, sobre o qual existem diversos trabalhos que exploram diferentes técnicas de programação linear inteira para resolvê-lo. Entre estas técnicas são destacadas o *Branch-and-Bound* (Fores *et al.*, 1999; Smith e Wren, 1988), *Branch-and-Price* (Desrochers e Soumis, 1989; Barnhart *et al.*, 1998) e *Branch-and-Cut* (Frigberg e Haase, 1999). Por outro lado, diversas meta-heurísticas foram implementadas para resolver problemas de grande porte. Dentre essas pode-se destacar: Algoritmos Genéticos, GRASP, Busca Tabu, Simulated Annealing, VNS, entre outros (Shen e Kwan, 2001; Silva e Cunha, 2010; Lourenço *et al.*, 2001; Souza *et al.*, 2004; Silva e Reis 2014). Com o emprego destas meta-heurísticas foi possível obter resultados muito satisfatórios para o problema, embora a otimalidade das soluções não sejam garantidas.

O trabalho de (Ernst *et al.*, 2004b) apresenta uma série de problemas relacionados à alocação de pessoal em diversas áreas, incluindo motoristas e cobradores de sistemas de transportes. Neste contexto, os autores descrevem problemas de alocação de funcionários em seus diferentes modais de transportes, ou seja, no aeroviário, ferroviário, transporte urbano e no transporte interurbano. No trabalho é apresentada uma revisão sobre as principais pesquisas tanto para o problema de programação da tripulação, como para o problema do rodízio das tripulações. No trabalho é mencionado também que a complexidade dos problemas depende do tipo de transporte, da categoria da tripulação, dos tipos de frotas, das regras e regulamentações, da regularidade das viagens e dos custos a serem considerados. Segundo Ernst *et al.*(2014b), uma das abordagens mais utilizadas para resolver os problemas de programação das tripulações é aquela que o decompõe nas seguintes etapas: geração das jornadas, otimização das jornadas e definição do rodízio da tripulação. Desta forma, a complexidade do problema é reduzida, permitindo sua resolução de forma satisfatória.

Algumas destas técnicas de otimização são utilizadas em pacotes comerciais voltadas para a área de programação de veículos e tripulação. Uma meta-heurística do tipo *run-cutting* foi utilizada para resolver o problema no pacote RUCUS (Wilhelm, 1975; Luedtke, 1985), desenvolvido nos Estados Unidos da América a partir da década de 70. Um algoritmo do tipo *branch-and-bound*, desenvolvido por Parker e Smith (1981), foi utilizado no sistema TRACS, o qual simulava o processo manual de alocação da tripulação. A formulação de recobrimento de conjuntos foi usada no pacote IMPACS do sistema BUSMAN e no pacote Crew-opt, que posteriormente foi utilizado na versão inicial do HASTUS que substituiu o TRACS (Wren, 2004). A empresa brasileira Wplex, desenvolvedora de sistemas no âmbito de transporte, desenvolveu um sistema WplexON (Fournier, 2009) para tratar problemas de alocação de tripulação. Neste trabalho a empresa utiliza a abordagem de *Branch-and-Price* para solucionar o problema modelado como particionamento de conjuntos, sendo que o conjunto de jornadas de trabalho é gerado a partir do movimento de inserção de tarefas. Estas soluções obtidas pela Wplex são utilizadas em empresas no estado de Santa Catarina. Em Souza e Silva (2013) é apresentado um modelo exato que tenta gerar as soluções ótimas baseadas nas restrições abordadas nesse trabalho, porém o modelo só obtém resultados satisfatórios para instâncias pequenas.

No trabalho de Silva e Reis (2014) é apresentada a utilização da metaheurística VNS (*Variable Neighborhood Search*) combinada com dois métodos de busca distintos, o método clássico VND (*Variable Neighborhood Descent*) e o método de busca em vizinhança de grande porte VLNS (*Very Large-scale Neighborhood Search*). A metaheurística VNS é iniciada com uma solução factível gulosa e um conjunto de estruturas de vizinhança é definido sequencialmente em função do número de tarefas realocadas ou trocas entre duas jornadas. Como procedimento de busca local foram utilizados o VND e o VLNS. Ambas as implementações foram testadas considerando que as tripulações podem realizar no máximo uma troca e duas trocas de veículos durante a jornada. Ambos os métodos utilizados obtiveram melhores resultados quando comparados com os custos adotados pela empresa da cidade de Belo Horizonte-MG que forneceu os dados. Parte destes resultados serão utilizados como base de comparação para os métodos propostos neste trabalho.

3. Problema de Programação da Tripulação de Ônibus Urbano

Neste trabalho é abordado o Problema de Programação das Tripulações de Ônibus Urbano (PPT), também conhecido na literatura como *Crew Scheduling Problem*. O PPT tem como dados de entrada a solução do Problema de Programação dos Veículos, que corresponde ao sequenciamento das viagens a serem realizadas por cada ônibus em operação, de uma empresa, num determinado dia da semana. Cada viagem a ser realizada apresenta um horário de início e de fim, além do seu ponto inicial e ponto final. O conjunto de todas as viagens realizadas por um veículo constitui seu bloco de viagens. Desta forma é possível prever o horário de partida do veículo da garagem e o seu retorno ao final do dia, assim como o detalhamento de todas as viagens e eventuais pausas realizadas pelo veículo ao longo da operação. As viagens de cada veículo são agrupadas em tarefas. Uma tarefa é a sequência de viagens consecutivas que deve ser executada por um único condutor, uma vez que entre estas viagens não existe tempo suficiente para que ocorra a troca da tripulação. Cada jornada corresponde a um conjunto de tarefas que serão realizadas por uma tripulação ao longo de um dia. As jornadas são formadas a partir da atribuição das tarefas e a composição destas jornadas deve respeitar os pontos de trocas, a utilização dos veículos, o tempo máximo de trabalho, entre outros. Desta forma, é possível identificar uma jornada como uma tripulação e vice-versa, pois cada tripulante receberá uma jornada a ser realizada durante um dia útil de trabalho. As jornadas também devem respeitar as restrições impostas pela empresa, pelas leis trabalhistas e convenções coletivas.

No problema abordado, são considerados dois tipos de jornadas. A dupla pegada é uma jornada caracterizada por um conjunto de tarefas que têm um intervalo, entre duas tarefas, maior ou igual a um dado valor estipulado, no caso de duas horas. Este tipo de jornada é utilizado para a condução dos veículos que só operam durante os horários de pico, o que ocorre principalmente no início da manhã e no final da tarde. O intervalo entre os dois *pedaços de jornada* não é contabilizado como hora trabalhada. Em uma jornada do tipo pegada simples os intervalos entre as tarefas são menores do que o valor estipulado para a dupla pegada. Independentemente do tipo de jornada, as *horas extras* correspondem ao tempo trabalhado além do tempo normal, que no caso é de seis horas e quarenta minutos. Por outro lado, se uma jornada durar menos do que o tempo normal de trabalho, então a diferença entre o tempo normal de trabalho e a duração da jornada é o *tempo ocioso* ou a *ociosidade* da jornada.

Além das restrições mencionadas, as jornadas devem obedecer às restrições impostas pelas empresas, as leis trabalhistas e os acordos contidos nas convenções coletivas de trabalho. Entre essas regras podem se citar: a carga horária máxima de trabalho de cada tripulante, o tempo mínimo de descanso de cada tripulação, o tempo mínimo para a realização da troca da tripulação, a possibilidade de troca de veículos durante a jornada, entre outras.

Para a construção das jornadas de trabalho foram levadas em consideração as seguintes restrições operacionais e trabalhistas, apresentadas pelo Sindicato das Empresas de Transporte de Passageiros de Belo Horizonte – SETRABH e o Sindicato dos Trabalhadores em Transporte Rodoviários de Belo Horizonte – STTRBH em 2010 (Silva e Cunha, 2010):

- *Sobreposição:* Dada duas tarefas, i e j realizadas consecutivamente por uma mesma tripulação, então o horário de início da tarefa j deve ser posterior ao final da tarefa i ;
- *Hora Extra:* A duração de uma jornada deve conter no máximo 2 horas a mais da duração de trabalho regular, sendo este tempo de excesso contabilizado como hora extra;
- *Intervalo de Descanso:* Cada tripulação tem direito a no mínimo 20 minutos particionado ou não de folga (descanso, almoço, etc.). Esse tempo não é aplicado quando a jornada for do tipo dupla pegada;
- *Troca de Terminal:* Dada duas tarefas, i e j realizadas consecutivamente por uma tripulação, então o ponto final da tarefa i deve ser igual ao ponto inicial da tarefa j . Para as jornadas do tipo dupla pegada esta troca é permitida se o intervalo de tempo entre o término da tarefa i e o início da tarefa j for superior a 2 horas;
- *Intervalo de Descanso Diário:* Considerando que uma jornada pode ser executada pela mesma tripulação em dias consecutivos, então o intervalo entre o fim da jornada e o seu início no dia seguinte deve ser superior a 11 horas.
- *Troca de Veículo:* Em uma jornada de trabalho, dependendo das regras empresariais, pode ter como restrição um número limitado de troca de veículos;
- *Minimização de Hora Extra:* O tempo excedente da hora de trabalho normal será contabilizado em horas extras e o mesmo deve ser minimizado;
- *Minimização do Número de Duplas Pegadas:* Deve ser minimizado o número de jornadas do tipo dupla pegada o tanto quanto possível;
- *Número de Jornadas:* A quantidade de jornadas de trabalho deve ser mínima, cobrindo todas as tarefas as diárias;
- *Tempo Ocioso:* Deve ser minimizado, tanto quanto possível, o tempo total ocioso das tripulações.

4. Método de solução proposto

A resolução do PPT consiste em encontrar um conjunto de jornadas de tal forma que todas as tarefas sejam realizadas com o menor custo possível e que sejam atendidas todas as restrições consideradas para o problema. A seguir são descritas as estruturas utilizadas para representar os principais elementos que compõem uma solução do PPT. Em seguida é apresentada a metaheurística SCHC.

4.1. Estruturas para a Representação do Problema

Tabela 1: Estrutura de uma tarefa

Tarefa	
Identificador	
Horário de Início	Horário de Fim
Terminal de Início	Terminal de Fim
Número do Veículo	

A Tabela 1 apresenta os dados de cada tarefa a ser alocada. O campo *Identificador* recebe um inteiro que identifica unicamente cada tarefa. Os campos *Horário de Início* e *Horário de Fim* correspondem ao instante estimado em que a tarefa se inicia e se encerra, respectivamente. No campo *Terminal de Início* é atribuído um número inteiro para identificar o terminal onde a tarefa se inicia, e no campo *Terminal de Fim* um número inteiro para identificar o terminal onde a tarefa se encerra. O campo *Veículo* recebe um número inteiro que identifica qual veículo realiza a tarefa. Estes campos são as características relevantes de uma tarefa para a resolução do PPT.

Tabela 2: Estrutura de uma jornada

Jornada	
Identificador	
Horário de Início	Horário de Fim
Horas Extras	Horas Ociosas

Dupla Pegada	Troca de Veículos
Lista das Tarefas	

Na Tabela 2 é apresentada a estrutura de uma jornada, sendo que para cada jornada é atribuído um número inteiro único ao campo Identificador. Os campos *Horário de Início* e *Horário de Fim* recebem o instante estimado em que a jornada se inicia e instante que ele termina, respectivamente. No campo *Horas Ociosas* é atribuída a soma do tempo de *Ociosidade Interna* e *Ociosidade Externa*. A ociosidade interna é a soma das ociosidade entre duas tarefas consecutivas e a ociosidade externa contém a ociosidade que ocorre quando uma jornada tem duração inferior ao tempo normal de trabalho. Portanto, a ociosidade externa é igual ao tempo normal de trabalho menos a duração da jornada. No campo *Hora Extra* é atribuído o valor do tempo de trabalho superior ao tempo normal de trabalho, ou seja, a duração da jornada menos o tempo normal de trabalho, quando houver. No campo *Dupla Pegada* recebe valor 1 se a jornada for do tipo dupla pegada e 0 caso contrário. A *Troca de Veículos* corresponde ao número de vezes que a tripulação deve trocar de veículo durante a jornada. O conjunto das tarefas a serem realizadas na jornada é armazenado sequencialmente na *Lista de Tarefas*.

4.2. A Metaheurística SCHC

A metaheurística *Step Counting Hill Climbing-SCHC*, proposta por Bykov e Petrovic (2013), trata-se de uma adequação do método *Hill Climbing Clássico* (Russel e Norvig, 2012). Segundo (Burke e Bykov, 2012) essa metaheurística é semelhante ao *Hill Climbing* operando com um parâmetro de controle *Custo Superior (upper bound)* b_c . Este custo representa o pior custo aceitável, ou seja, a cada iteração do algoritmo aceitará qualquer solução candidata com o custo menor do que b_c e rejeitará as soluções cujo custo é mais elevado (pior) do que b_c . O algoritmo do SHCH é apresentado abaixo.

Algoritmo 1: Implementação do SCHC para um problema de minimização

Entrada: Solução inicial s e o parâmetro c .

Saída: Melhor solução s^* encontrada.

$i \leftarrow 0$;

$b_c \leftarrow f(s)$;

$s^* \leftarrow s$;

enquanto *Condição de parada não atendida* **faça**

$i \leftarrow i + 1$;

Gere um candidato s' na vizinhança de s ;

se $f(s') < b_c$ ou $f(s') \leq f(s^*)$ **então**

$s \leftarrow s'$;

se $f(s') \leq f(s^*)$ **então**

$s^* \leftarrow s'$;

fim

fim

se $i \geq c$ **então**

$b_c \leftarrow f(s^*)$;

$i \leftarrow 0$;

fim

fim

retorna s^* ;

O algoritmo SCHC deve ser inicializado a partir de uma solução inicial s e um parâmetro c , que define a quantidade máxima de soluções encontradas na busca para atualização do custo superior b_c . Um contador i é utilizado para realizar a contagem destas soluções, e ao atingir o valor de c este contador é reiniciado e o custo b_c é atualizado com o valor do custo da melhor solução encontrada $f(s^*)$. A função f , que calcula o custo da solução desejada, é

apresentada em (1) na próxima seção. O valor inicial de b_c é definido pelo custo da solução inicial, considerada também como a melhor solução encontrada s^* até o momento.

O processo de busca se encerra quando uma condição de parada for atendida, neste trabalho a condição adotada foi o tempo de processamento. A cada iteração uma nova solução s' é gerada a partir da solução s . Esta é atualizada sempre que seu custo for menor do que b_c ou, menor ou igual a custo de s^* (melhor solução encontrada). O método de realocação e/ou troca de tarefas entre duas jornadas é utilizado para gerar uma nova solução vizinha da solução corrente. Este procedimento é apresentado na seção 4.2.3. Caso o custo de s' seja menor que o custo da melhor solução atual encontrada, s^* é atualizada com s' . Ao final do algoritmo a saída desejada será a solução s^* que conterà a solução com menor custo encontrada.

Como pode ser visto no Algoritmo 1, o SCHC é de fácil implementação, porém algumas fases do algoritmo são de fundamental importância para o bom desempenho do mesmo.

4.3. Função Objetivo

A função objetivo utilizada na metaheurística SCHC é apresentada abaixo.

$$(1) \quad fo = \sum_{j \in J} (Custo_J * y[j] + Custo_OC * (OC_ext[j] + OC_int[j]) + Custo_HE * Qnt_HE[j] + Custo_DP * Dupla_J[j]);$$

Na expressão 1 o $Custo_J$ se refere ao custo fixo de cada jornada, $Custo_OC$ é o custo de cada hora ociosa, $Custo_HE$ é o custo de cada hora extra e $Custo_DP$ é o custo associado a cada jornada do tipo dupla pegada. Desta forma são minimizados os custos fixos, as horas extras, as horas ociosas e as duplas pegadas.

4.4. Geração Solução Inicial

Uma fase importante da meta-heurística SCHC é a geração da solução inicial. Para gerar uma solução inicial, foi utilizado um método construtivo guloso, onde o critério adotado é a ordem das tarefas, que foram ordenadas a partir do tempo de início. Os dados de entrada, ou seja, as tarefas a serem programadas, são armazenadas na ordem crescente de seus horários de início, e em caso de empate, pelo horário de fim. A construção da solução é iniciada com uma jornada vazia, dita jornada corrente. A primeira tarefa k ainda não alocada é inserida nessa jornada. A partir de então, enquanto for possível, são inseridas as próximas tarefas ainda não alocadas, que pertencem ao mesmo veículo da tarefa k e que não geram inviabilidade na jornada corrente. Quando não for possível inserir qualquer tarefa na jornada corrente, uma nova jornada vazia é inicializada e o processo se repete até que todas as tarefas tenham sido alocadas.

4.5. Estrutura de Vizinhança Realoca-Troca

Os dois tipos de movimentos que caracterizam a estrutura de vizinhança adotada foram à realocação ou a troca de uma tarefa entre duas jornadas, sem gerar inviabilidade. Estes movimentos são realizados para encontrar um vizinho de uma solução corrente. Exemplificando, considere duas jornadas i e j , escolhidas aleatoriamente. Então é sorteada uma tarefa t a ser retirada da jornada i e introduzida na jornada j . Logo, pode ocorrer uma das seguintes situações:

- A tarefa t retirada de i pode ser introduzida em j sem a necessidade de remover qualquer tarefa da jornada j . Neste caso é realizado um movimento de realocação, e a nova solução será avaliada.
- A introdução da tarefa t em j exige a retirada de uma ou mais tarefas desta jornada. Neste caso, se a(s) tarefa(s) removida(s) de j puder(em) ser inserida(s) na jornada i , sem haver qualquer sobreposição com as tarefas remanescentes em i , então o movimento é aceito, caso contrário ele é descartado. Este é um movimento de troca.

Em ambos os casos, as modificações são aceitas se e somente se as jornadas resultantes forem viáveis, ou seja, respeitarem todas as restrições do problema.

5. Resultados Obtidos

A metaheurística SCHC foi testada em um conjunto de sete instâncias referentes a uma semana de operação de uma empresa que atua na cidade de Belo Horizonte - MG. A metaheurística foi implementada na linguagem C/C++. Todos os testes foram executados em um microcomputador com processador Intel(R) Core (TM) i7-2600, com clock de 3.40GHz, 8 GB de memória RAM, sob plataforma Windows Seven Professional.

Na Tabela 3 são apresentadas as informações de cada instância utilizada para a realização dos testes.

Tabela 3: Tabela com as informações dos dados de entrada de cada instância, contendo a quantidade de tarefas a serem realizadas e quantos veículos são utilizados.

Instancia	Total de tarefas	Total de veículos
1 – Segunda	705	61
2 – Terça	674	58
3 – Quarta	814	68
4 – Quinta	872	76
5 – Sexta	787	71
6 – Sábado	644	56
7 - Domingo	345	34

Nos experimentos, foram adotados os seguintes valores para os respectivos parâmetros:

- Custo por jornada de trabalho: 10.000
 - Custo da dupla pegada: 5.000
- Custo da hora extra expressa em minutos: 4
- Máximo de trocas de veículos por jornada: 1
 - Contador limite c: 1.000

Para cada instância, foram realizadas 10 execuções da meta-heurística tendo como condição de parada o tempo em execução limitado a 60 minutos. Este o mesmo tempo utilizado nos resultados apresentados por Silva e Reis (2014)

As Tabelas apresentadas a seguir mostram uma comparação dos resultados obtidos pela SCHC e aqueles produzidos pelas metaheurísticas VNS clássico e VNS combinado com VLNS, do trabalho de Silva e Reis (2014). Também são apresentados os dados utilizados pela empresa.

Tabela 4: Características dos resultados com menores custos para a instância 01

Métodos	Fo	Total de Jornadas	Total de Horas Extras	Total de Duplas Pegadas
SCHC	1.323.052	117	96:03	26
Empresa	1.390.804	134	86:41	6
VNS Clássico	1.368.520	120	98:00	29
VNS-VLNS	1.270.628	120	65:07	11

Analisando os dados apresentados na Tabela 4 pode-se concluir que a metaheurística SCHC produziu uma solução aceitável. Porém, em sua melhor solução, há um acréscimo no custo final, quando comparado com a melhor solução encontrada pela metaheurística VNS-VLNS. A SCHC reduz o custo total, o número de jornadas e o número de duplas pegadas quando comparado com o VNS Clássico, mas não é capaz de obter uma solução melhor do que a do VNS-VLNS.

Tabela 5: Características dos resultados com menores custos para a instância 02

Métodos	Fo	Total de Jornadas	Total de Horas Extras	Total de Duplas Pegadas
SCHC	1.277.568	113	94:02	25
Empresa	1.335.620	130	85:55	3
VNS Clássico	1.318.200	114	96:40	31
VNS-VLNS	1.213.176	114	75:44	11

Os resultados para a instância 02 são apresentados na Tabela 5. A metaheurística SCHC encontrou uma solução melhor do que a solução encontrada pelo VNS clássico, reduzindo tanto o

número de duplas pegadas quanto a quantidade de horas extras. Por outro lado, o VNS-VLNS apresenta a melhor solução entre os métodos. A solução encontrada pela metaheurística SCHC possui 25 duplas pegada das 113 jornadas, se enquadrando nas métricas aceitas pelas empresas para este tipo de jornada.

Tabela 6: Características dos resultados com menores custos para a instância 03

Métodos	Fo	Total de Jornadas	Total de Horas Extras	Total de Duplas Pegadas
SCHC	1.518.460	132	118:31	28
Empresa	1.540.460	149	106:05	5
VNS Clássico	1.527.904	135	116:16	30
VNS-VLNS	1.471.176	140	67:24	11

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para a terceira instância, uma quarta-feira. Os custos de Fo são reduzidos pelo SCHC quando comparados com aos dados da empresa e VNS clássico. O número de jornadas com duplas pegadas na solução obtida pela SCHC é de 28, de um total de 132 jornadas. Pode-se perceber também que a meta-heurística VNS-VLNS apresenta os melhores resultados tendo um custo final de 1.471.176, enquanto a metaheurística obteve um custo de 1.518.460.

Tabela 7: Características dos resultados com menores custos para a instância 04

Métodos	Fo	Total de Jornadas	Total de Horas Extras	Total de Duplas Pegadas
SCHC	1.621.732	148	111:23	23
Empresa	1.668.856	162	120:14	4
VNS Clássico	1.684.272	152	121:58	27
VNS-VLNS	1.583.644	148	77:41	17

Os resultados para a quarta instância são apresentados na Tabela 7. A solução com o menor custo final foi encontrada pela metaheurística VNS-VLNS. Porém a SCHC obteve melhores resultados que a meta-heurística VNS clássico e os dados da empresa. Além disso, a SHCH apresenta a solução com número de jornadas igual ao VNS-VLNS.

Tabela 8: Características dos resultados com menores custos para a instância 05

Métodos	Fo	Total de Jornadas	Total de Horas Extras	Total de Duplas Pegadas
SCHC	1.541.888	139	120:14	25
Empresa	1.580.964	155	108:11	1
VNS Clássico	1.562.864	142	116:06	23
VNS-VLNS	1.471.100	139	87:55	12

Para a quinta instância, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8. Pode-se concluir que a SCHC obteve melhor solução que a metaheurísticas VNS Clássico e os dados da empresa. Porém, quando comparado com o VNS-VLNS, a solução obtida apresenta um aumento em todos os atributos avaliados, exceto o numero de jornadas.

Tabela 9: Características dos resultados com menores custos para a instância 06

Métodos	Fo	Total de Jornadas	Total de Horas Extras	Total de Duplas Pegadas
SCHC	1.169.588	100	120:27	29
Empresa	1.253.100	124	54:35	0
VNS Clássico	1.182.808	104	95:02	24
VNS-VLNS	1.152.552	109	52:18	10

Na Tabela 9 são apresentados os resultados das melhores soluções obtidas para a instância 6, correspondente a um dia de sábado. Para este problema, a SCHC, apesar de não apresentar a melhor solução, é perceptível que ela reduz o número de jornadas. Novamente, a metaheurística VNS-VLNS apresenta a solução com o menor custo de “Fo”.

Tabela 10: Características dos resultados com menores custos para a instância 07

Métodos	Fo	Total de Jornadas	Total de Horas Extras	Total de Duplas Pegadas
SCHC	592.840	53	53:30	10
Empresa	686.468	68	26:57	0
VNS Clássico	596.088	54	46:12	9
VNS-VLNS	601.296	57	27:35	5

Para a última instância, as melhores soluções encontradas por cada método são apresentadas na Tabela 10. A metaheurística SCHC apresentou o melhor resultado nesta instância. O número de jornadas foi reduzido, consequentemente obtendo assim um custo de Fo menor que as outras metaheurísticas e os dados da empresa.

6. Considerações finais

Resolução do (PPT) é de grande importância para o planejamento operacional de empresas de transporte. Algumas empresas do setor de transporte ainda utilizam meios manuais para gerar as jornadas de trabalho de suas tripulações. Devido a esse fato há a necessidade de desenvolver trabalhos que facilitem a geração das escalas (jornadas), como abordada nesse trabalho, especificamente para tripulação de ônibus urbano.

Neste trabalho foi proposto o desenvolvimento da meta-heurística SCHC para resolver o Problema de Programação da Tripulação. A utilização desta abordagem é justificada devido ao fato de que os métodos heurísticos atualmente são mais utilizados, além de apresentar um histórico com sucesso pelos resultados obtidos.

Os resultados obtidos pela meta-heurística apresentam soluções com custo inferior às adotadas pela empresa e obtidas pela VNS Clássico. Nos resultados obtidos, as soluções de menores custos encontradas pela metaheurística SCHC apresentam uma quantidade de duplas pegadas dentro das limitações práticas da solução. Por outro lado, o SCHC apresentou custo operacional maiores que as soluções encontradas pela meta-heurística VNS-VLNS.

De modo geral, pode-se concluir que a utilização de métodos heurísticos para resolução do Problema da Programação da Tripulação mostrou resultados satisfatórios quando comparados a outros métodos. A utilização da meta-heurística SCHC se mostrou eficiente, de modo a gerar soluções boas.

Como possíveis trabalhos futuros, propõe-se a utilização de um método híbrido, composto pelo SCHC e um possível método exato. Além de um melhor aprofundamento na calibração da meta-heurística. Outro estudo posterior deve ser realizado na definição do limite do contador c , de modo ao mesmo ser alocado dinamicamente se adequando as soluções correntes encontradas.

6. Considerações finais

Os autores agradecem ao CNPq, à Fapemig e à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) pelo apoio recebido durante a realização deste trabalho.

Referências

- Barnhart, C., Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., Savelsbergh, M. W. P., e Vance, P. H.**, Branch-and-price: Column generation for solving huge integer programs. *Operations research*, 46 (3): 316-329, 1998.
- Bouzada, C. F.**, Custo do transporte coletivo por ônibus. Editora C/Arte, 2003.
- Burke, E. K., e Bykov, Y.**, The late acceptance hill-climbing heuristic. In Departamento f Computing Science and Mathematics, University of Stirling, number CSM-192, 2012.
- Bykov, Y., e Petrovic, S.**, A step counting hillclimbing algorithm. Nottingham, University Business School Research Paper, (2013-10), 2013.
- Desrochers, M. e Soumis, F.**, A column generation approach to the urban transit crew scheduling problem *Transportation Science*, 23 (1): 1-13, 1989.

- Elias, S. E. G.**, The use digital computers in the economic scheduling for both man and machine in public transport. Kansas, EUA: Technical Report, 49, 1964.
- Ernst, T. A., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., Owens, B., e Sier, D.**, An annotated bibliography of personnel scheduling and rostering. *Annals of Operations Research*, 127 (1-4): 21-144, 2004a.
- Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., e Sier, D.**, Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. *European journal of operational research*, 153 (1):3-27, 2004b.
- Fischetti, M., Martello, S., e Toth, P.**, The fixed job schedule problem with spread-time constraints. *Operations Research*, 35(6): 849-858, 1987.
- Fores, S., Proll, L., e Wren, A.**, An improved ilp system for driver scheduling. In Nigel H. M. Wilson, editor, *Computer-Aided Transit Scheduling*, 43-61, Springer, 1999.
- Fournier, S.**, Branch-and-price algorithm for a real-life bus crew scheduling problem; ERPOSul, 2009.
- Friberg, C., e Haase, K.**, An exact branch and cut algorithm for the vehicle and crew scheduling problem. In Nigel H. M. Wilson, editor, *Computer- Aided Transit Scheduling*, pages 63-80. Springer, 1999.
- Lourenço, H. R., Paixão, J. P. e Portugal, R.** (2001) Multiobjective metaheuristics for the bus-driver scheduling problem. *Transportation Science*, v. 35, p. 331–343.
- Luedtke, L. K.** (1985) RUCUSII: A review of system capabilities. *Rousseau J.-M.*, p. 61-115.
- Parker, M. E. and Smith, B. M.** (1981) Two approaches to computer crew scheduling. *Wren, A. (ed.), Computer scheduling of public transport, North-Holland, Amsterdam*, p. 193-221.
- Russell, S. J., e Norvig, P.**, *Artificial Intelligence: A modern approach (2nd Edition)*, pages 111-114. Prentice Hall, 2012.
- Shen, Y., Kwan, S. K. R.**, Tabu search for driver scheduling. In Stefan Voß and Joachim R. Daduna, editors, *Computer-Aided Transit Scheduling*, pages 121-135, Springer, 2001.
- Silva, G. P., e Cunha, C. B.**, Uso da técnica de busca em vizinhança de grande porte para a programação da escala de motoristas de ônibus urbano. *Transportes*, 18 (2): 37-45, 2010.
- Silva, G. P., e Reis, A. F. S.**, A study of different metaheuristics to solve the urban transit crew scheduling problem. *Journal of Transport Literature*, 8(4): 227-251, 2014.
- Smith, B. M., e Wren, A.**, A bus crew scheduling system using a set covering formulation. *Transportation Research Part A: General*, 22 (2): 97-108, 1988.
- Souza, M. J. F., Cardoso, L. X. T., Silva, G. P., Rodrigues, M. M. S., e Mapa, S. M. S.** (2004) Metaheurísticas aplicadas ao Problema de Programação de Tripulações no sistema de transporte público. *TEMA Tendência em Matemática Aplicada e Computacional*, v. 5, n. 2, p. 357-368.
- Souza, D. S., e Silva, G. P.** Um modelo exato para resolver o problema da escala de motoristas de ônibus urbano, XLV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Natal – RN, 2013.
- Wilhelm, E. B.** (1975). Overview of the RUCUS package driver run cutting program (RUNS). In *Transportation Science Section, Operations Research Society of America, etc., Workshop on Automated Techniques for Scheduling of Vehicle Operators for Urban Public Transportation Services. Chicago*.
- Wren, A.**, Scheduling vehicles and their drivers-forty years' experience. In 9th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport (CASPT), San Diego, California, 2004.