UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RAFAELA PIANCA DE CASTRO ALVES

PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE DE MAQUINISTAS PARA ATENDIMENTO ÀS LOCOMOTIVAS ACOPLADAS EM TRENS

VITÓRIA
2018

RAFAELA PIANCA DE CASTRO ALVES

PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE DE MAQUINISTAS PARA ATENDIMENTO ÀS LOCOMOTIVAS ACOPLADAS EM TRENS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

VITÓRIA
2018

RAFAELA PIANCA DE CASTRO ALVES

PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE DE MAQUINISTAS PARA ATENDIMENTO ÀS LOCOMOTIVAS ACOPLADAS EM TRENS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de concentração Transportes.

Aprovada em 23 de agosto de 2018.

COMISSÃO EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa

Universidade Federal do Espírito Santo

Orientador

_____

Prof. Dr. Elcio Cassimiro Alves

Universidade Federal do Espírito Santo

_____

Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri

Universidade Federal do Espírito Santo – Campus Alegre

_____

Prof. Dr. Leandro Colombi Resendo

Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Serra

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me sustentado ao longo desta jornada de desafio, construção e superação, a Ele tudo devo.

Agradeço a quem foi um grande exemplo para mim, o Professor Rodrigo. Foi uma honra tê-lo como orientador neste período. Não esquecerei de seus ensinamentos, seus preciosos conselhos e sua inestimável confiança. Muito obrigada!

Agradeço ao meu parceiro de vida, Bruno, por sempre enxergar meus sonhos como se fossem dele, e por não medir esforços em realizar mais este junto comigo, minha vitória sua vitória!

Aos meus filhos Caio e Luiza agradeço por, mesmo sem terem consciência da força que me dão, me incentivarem a não desistir dos meus objetivos, fazendo crescer em mim a vontade de dar o meu melhor a cada dia.

Agradeço em especial aos meus Pais, a minha família e amigos, que me ajudaram a cuidar dos meus filhos nos momentos que precisei me ausentar, além de me apoiarem sempre para que eu conseguisse completar este Mestrado.

Agradeço à banca por todas as sugestões e críticas construtivas dadas desde a qualificação. Agradeço ao grupo LAMMEP por todo o apoio.

Agradeço à Vale S.A., pela disponibilização dos dados.

De maneira geral, agradeço a todos que, de alguma maneira, contribuíram para essa realização.

RESUMO

Para assegurar o transporte ferroviário, vários processos são necessários, dentre eles destaca-se o transporte de maquinistas para atendimento às locomotivas acopladas em trens, pois garante a disponibilidade de um maquinista para condução do trem. O transporte ocorre para a substituição do maquinista em fim de escala por um maquinista iniciando escala. Assim, deve-se fornecer transporte para o maquinista de seu ponto de descanso até o local do trem e vice-versa. O planejamento desse transporte deve considerar os requisitos operacionais e legais da profissão de maquinista. O processo de troca de maquinistas envolve custos relacionados ao transporte, utilização do veículo e quilômetros percorridos, e custos relacionados a horas improdutivas, gerados quando o maquinista não está exercendo a função de conduzir o trem no período que compreende a sua escala de trabalho. Para atender tanto as necessidades operacionais quanto legais, deve-se alocar veículos e elaborar rotas que sejam capazes de levar os maquinistas de seus pontos de descanso até os pontos de troca ou o inverso, ao longo da ferrovia, a um menor custo possível de transporte e reduzindo a quantidade de horas improdutivas. Para a resolução do problema mencionado é proposto um modelo matemático baseado no *Dial a Ride Problem (DARP).* Para testar o modelo matemático proposto, o mesmo foi aplicado à região da Estação de Costa Lacerda, em Minas Gerais, um dos maiores pátios de triagem da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), onde trabalham aproximadamente 100 maquinistas que fazem diversas trocas de escala diariamente. O planejamento obtido por meio do modelo matemático obteve resultados melhores que o planejamento realizado de maneira empírica pelos planejadores da EFVM, reduzindo os custos relacionados ao transporte e as horas improdutivas.

Palavras-chaves: *Operação Ferroviária. Dial a Ride Problem (DARP). Maquinistas.*

ABSTRACT

To ensure rail transport, several processes are necessary, among them, an important one is the transport of train drivers to work in the locomotives coupled in trains, since it guarantees the availability of a driver to conduct the train. This transport happens because it is necessary to change the driver at the end of his shift by a driver initiating his shift. Thus, it must be provided transportation to the driver from your resting point to the train location and vice versa. Transportation planning should consider the operational and legal requirements of the driver profession. The process of exchanging drivers involves costs related to transport him, number of vehicles needed, and kilometers traveled, and costs related to unproductive hours, generated when the driver is not performing the function of driving the train in the period that includes his work shift. To meet both operational and legal requirements, vehicles must be used, and routes must be drawn to transport the drivers from their resting points to the exchange points or vice versa, at a lower possible transport cost and reducing the number of unproductive hours. To solve the problem mentioned, a mathematical model based on the Dial a Ride Problem (DARP) was proposed. To test the proposed mathematical model, it was applied to the region of the Costa Lacerda Station in Minas Gerais, one of the largest sorting yards of the Vitória-Minas Railroad (EFVM), where approximately 100 train drivers work scale daily. The planning done by the mathematical model achieve better results than the planning realized in an empirical way by the EFVM planners, reducing the costs related to the transport and the unproductive hours.

Keywords: *Railway Operation. Dial a Ride Problem (DARP). Train Engineers.*

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: GRÁFICO DO PERCENTUAL DE HORAS IMPRODUTIVAS GERADAS NA TROCA DE MAQUINISTAS DAS LOCOMOTIVAS.....14
FIGURA 2: FASES DA METODOLOGIA DA PESQUISA 28
FIGURA 3: MAPA DA EFVM 31
FIGURA 4: PONTOS DE ORIGENS E DESTINOS DE MAQUINISTAS NA REGIÃO DE COSTA LACERDA 33
FIGURA 5 : EXEMPLO ESQUEMÁTICO DE UMA POSSÍVEL ROTA A SER GERADA.....36
FIGURA 6: ESQUEMA DOS MARCOS HORÁRIOS CONSIDERADOS PARA O MAQUINISTA INICIANDO A ESCALA 37
FIGURA 7: ESQUEMA DOS MARCOS HORÁRIOS CONSIDERADOS NO MAQUINISTA ENCERRANDO A ESCALA 38

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: DISTÂNCIAS (KM) ENTRE OS POSSÍVEIS PONTOS DE ORIGEM E DESTINOS DOS MAQUINISTAS 34
TABELA 2: INSTÂNCIAS PARA AVALIAR O MODELO MATEMÁTICO 40
TABELA 3: RESULTADOS ENCONTRADOS PELO CPLEX 53
TABELA 4: RESULTADOS ENCONTRADOS PELO CPLEX PARA O GRUPO B 56
TABELA 5: RESULTADOS ENCONTRADOS PELO CPLEX PARA O GRUPO C E PARA O CASO REAL 58
TABELA 6: INFORMAÇÕES DO PLANEJAMENTO CALCULADO PELO CPLEX E DO CASO REAL 60

LISTA DE SIGLAS

AE	Algoritmos Evolucionários
ANTF	Associação Nacional dos Transportes Ferroviários
ANTT	Agencia Nacional dos Transportes Terrestres
CLT	Consolidação das Leis do Trabalho
CVRP	*Capacitated Vehicle Routing Problem*
DARP	*Dial a Ride Problem*
DC-DARP	*Driver Consistent Dial a Ride Problem*
EFC	Estrada de Ferro Carajás
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas
FCA	Ferrovia Centro-Atlântica
GA	*Genetic Algorithm*
H-DARP	*Heterogeneous Dial a Ride Problem*
HHT	Hora Homem Trabalhada
MD-DARP	*Multi-Depot Dial-a-Ride-Problem*
MOSA	*Multi-Objective Simulated Annealing*
PDP	*Pickup and Delivery Problem*
PR	Programação por Restrições
S-DARP	*DARP with Stochastic Customer Delays*
TS	*Tabu Search*
VND	*Variable Neighborhood Descent*
VNS	*Variable Neighborhood Search*
VRP	*Vehicle Routing Problem*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11
1.1. Objetivos 13
1.1.1. Geral 13
1.1.2. Específicos 13
1.2. Justificativa 13
1.3. Estrutura da Dissertação 14
2. REFERENCIAL TEÓRICO 16
2.1. Revisão Bibliográfica sobre o Dial-a-Ride Problem 18
3. METODOLOGIA DA PESQUISA 27
3.1. Classificação da metodologia de pesquisa 27
3.2. Etapas da metodologia de pesquisa 28
4. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS 31
4.1. Geração de instâncias 39
5. MODELO MATEMATICO PROPOSTO 43
6. RESULTADOS E ANÁLISES 52
6.1. Resultados e Análises – Grupo A 53
6.2. Resultados e Análises – Grupo B 55
6.3. Resultados e Análises – Grupo C 58
6.4. Análise Geral dos Resultados 60
7. CONCLUSÕES 62
7.1 Trabalhos Futuros 62
8. REFERÊNCIAS 63

1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário é importante no cenário brasileiro de transporte de carga. Cerca de 25% do total de cargas que circula pelo país é por meio deste modo de transporte, perdendo apenas para o transporte rodoviário. Esta participação no mercado brasileiro é justificada pela capacidade de transportar um volume expressivo de cargas por longas distâncias e a baixos custos por tonelada transportada. Em 2016 o volume de carga transportado por meio de ferrovias atingiu o recorde de 503 milhões de toneladas úteis (ANTF, 2018).

A maior parte da malha ferroviária brasileira está concedida ao setor privado, e dentre as empresas responsáveis pela operação e manutenção da malha ferroviária encontra-se a Vale S/A, segunda maior produtora de minério de ferro do mundo, que possui a concessão dos serviços prestados pela Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) e pela Estrada de Ferro Carajás (EFC) (ANTT,2018).

Para conduzir um trem em uma viagem é necessário a designação de um maquinista, que é um trabalhador regido pela Consolidação das Leis do Trabalho (CLT), que define as restrições de escalas, tempo máximo de percurso, tempo mínimo de descanso, pagamento de horas extras, dentre outras. Usualmente, a viagem do trem é maior que o período da escala de trabalho de um maquinista, e por isso faz-se necessário realizar a troca de maquinista ao longo da viagem do trem.

Essa troca ocorre em locais pré-determinados denominados destacamentos, que são locais onde um conjunto de maquinistas trabalham para atender a demanda operacional da ferrovia em determinada região. Deve-se garantir que todos os trens da ferrovia sejam supridos de maquinistas no momento de sua chegada ao ponto de troca, ou seja, que não haja atraso na partida do trem por falta de maquinista. A troca de maquinistas das locomotivas dos trens é uma das etapas mais importantes do processo de operação da ferrovia, pois caso não haja maquinista disponível para assumir o trem, substituindo o maquinista que o está conduzindo e que está em seu limite de escala de trabalho, o trem ficará parado acarretando sérios prejuízos para a ferrovia. No entanto, o maquinista também não pode chegar ao ponto de troca muito antes da chegada do trem, pois isso acarreta o pagamento de horas improdutivas.

As horas improdutivas são aquelas que dentro do intervalo de início e fim da jornada de trabalho do maquinista, o mesmo não está exercendo a função de conduzir o trem. A geração de horas improdutivas ocorre quando o maquinista chega no ponto de troca antes de um limite estabelecido que considera o horário de troca no trem, ou, quando, ao finalizar a escala de trabalho embarca no veículo para regressar a seu ponto de descanso depois de um limite estabelecido considerando a chegada do trem.

Nas regiões onde existem pátios ferroviários (que podem ser pontos de intercâmbio de ferrovias, pátios de formações, pontos de carregamento, dentre outros), pode-se realizar a troca de maquinista aproveitando que o trem já está parado para algum tipo de operação, evitando atrasos na circulação do trem. Para tanto, faz-se necessário um planejamento de transporte eficiente para levar cada maquinista de seu local de descanso até o ponto de troca para assumir a locomotiva, e o inverso para aqueles que estão encerrando a escala de trabalho.

Este processo é ininterrupto, portanto a partir das solicitações dos usuários, o veículo embarca um maquinista em qualquer ponto da rota e o desembarca em qualquer outro ponto da rota, que não seja a garagem do veículo, considerando restrições de tempo máximo de espera e tempo máximo de viagem. Este planejamento de transporte de maquinistas torna-se um grande desafio para os planejadores que o realizam sem o apoio de uma ferramenta computacional.

Esta abordagem é característica de uma classe de problemas de roteamento de veículos denominada *Dial a Ride Problem* (DARP). Assim sendo, está dissertação propõe um modelo matemático para o planejamento do transporte de maquinista baseado no *Dial a Ride Problem* (DARP) para elaborar as rotas dos carros que vão levar os maquinistas, que iniciarão a escala de trabalho, de seus pontos de embarque até os pontos de troca de maquinistas, e retornar com os maquinistas que encerrarão a escala de trabalho do ponto de troca para seus respectivos locais de descanso. O modelo tem por objetivo reduzir o custo de transporte (custo da utilização do veículo e quilômetros percorridos), bem como reduzir o custo com horas improdutivas respeitando as várias restrições do problema.

Para testar o modelo proposto, o mesmo foi aplicado a EFVM que possui sete destacamentos ao longo de seus 905 km de extensão. Dentre os destacamentos da

EFVM, encontra-se o de Costa Lacerda que desempenha um importante papel na ferrovia, e por isso foi escolhido para a realização do estudo. Situado na região de Santa Barbara/MG, possui aproximadamente 100 maquinistas que trabalham para atender os trens que circulam na região.

1.1. Objetivos

1.1.1. Geral

Propor um modelo matemático para o planejamento do transporte de maquinistas, a fim de atender a troca de maquinistas das locomotivas dos trens, que considere limites de espera, tempo máximo de percurso, frota heterogênea e capacidade dos veículos, visando a redução dos custos relacionados ao transporte e a geração de horas improdutivas.

1.1.2. Específicos

Os objetivos específicos da dissertação são:

- Aplicar o modelo matemático proposto ao cenário de um destacamento de maquinistas;
- Avaliar a utilização do modelo matemático proposto como uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão com relação ao planejamento de transporte dos maquinistas para redução de custos de transporte e horas improdutivas.

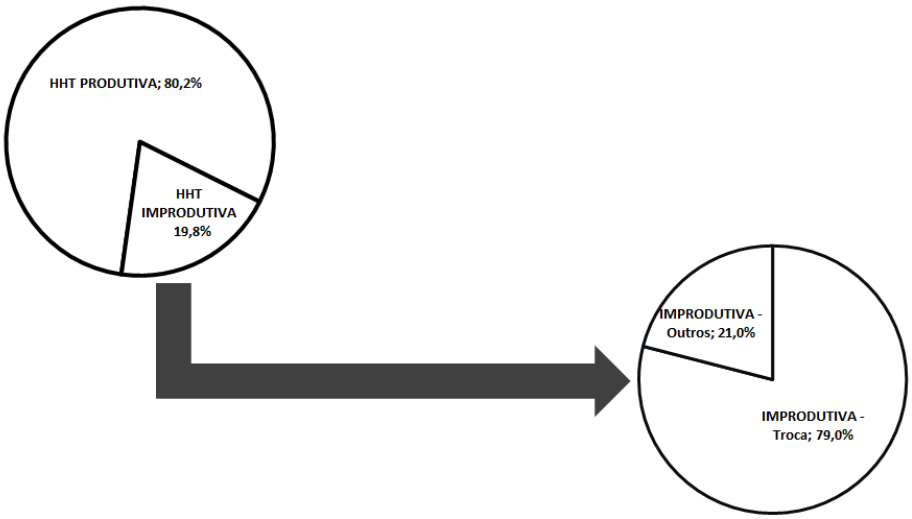
1.2. Justificativa

É fundamental a equipagem das locomotivas com maquinistas para que o trem circule pelas ferrovias, por esta razão, o planejamento do transporte de maquinistas para os pontos de troca de equipe das locomotivas de trens é um fator crítico de sucesso em um cenário de redução de custo e aumento da produtividade e, assim, é um dos desafios na operação ferroviária.

Segundo estudos realizados junto a equipe de gestão operacional da EFVM, devido à falta de uma ferramenta computacional que auxilie no planejamento para o transporte dos maquinistas, os custos relacionados ao transporte e horas improdutivas de maquinistas podem chegar a milhões de reais (Vale, 2017a). Conforme pode ser observado no gráfico abaixo, em 2016, aproximadamente 20% das horas trabalhadas

dos maquinistas (HHT) foram apontadas como improdutivas na região estudada, correspondendo a mais de 50.000 HHT improdutiva, deste total, 79% foram relacionadas a operação de troca de maquinistas.

Figura 1: Gráfico do percentual de horas improdutivas geradas na troca de maquinistas das locomotivas



Fonte: Próprio Autor.

Apesar da relevância do problema em questão no setor ferroviário, não foram encontrados na literatura cientifica artigos que contribuíssem com a gestão mais eficiente do transporte para apoio à operação ferroviária, através da modelagem do problema de transporte de maquinistas.

Assim, esta dissertação se justifica por propor o planejamento do transporte de maquinistas para atender a troca de equipes das locomotivas dos trens por meio de um modelo matemático aplicado a roteirização de veículos, considerando frota heterogênea, tempo máximo de percurso e limite de espera, com o objetivo de minimizar tanto a soma dos custos de transporte quanto a soma da geração de horas improdutivas dos maquinistas, viabilizando melhores resultados financeiros para a operação ferroviária.

1.3. Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em sete capítulos, sendo este primeiro, que é a introdução ao problema e os demais descritos a seguir:

O Capítulo 2 apresenta o referencial teórico utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa, que inclui conceitos sobre problemas de roteirização de veículos aprofundando-se no *dial a ride problem*.

O Capítulo 3 aborda a metodologia utilizada nesta dissertação.

O Capítulo 4 apresenta a descrição do problema e as instâncias criadas com base no estudo de caso.

No Capítulo 5 é descrito o modelo matemático proposto.

O Capítulo 6 expõe as soluções obtidas com o CPLEX e a análise dos resultados.

Por fim, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões de trabalhos futuros dessa dissertação.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A roteirização de veículos é o processo de elaboração de rotas para veículos de uma frota, com o objetivo de visitar um conjunto de clientes geograficamente dispersos, a um menor custo possível (BRAEKERS, RAMAEKERS, e VAN NIEUWENHUYSE, 2015). Os problemas de roteirização de veículos surgem em diversos campos do cotidiano, como por exemplo na saúde pública, transporte público, comércio, indústria e segurança pública. As informações contidas na rede de transporte são essenciais para diversas aplicações, incluindo as áreas de transporte e logística. A classificação dos problemas de roteirização de veículos varia de acordo com as restrições e a função objetivo.

O problema *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) tem por objetivo encontrar um conjunto de rotas de veículos com o menor custo tal que cada cliente seja atendido uma única vez e por um único veículo. Cada veículo inicia e termina a sua rota no depósito, e a capacidade dos veículos não pode ser excedida Uma das classes do CVRP é caracterizada por problemas em que pessoas ou cargas são transportadas de uma origem para um destino (em inglês *Pickup and Delivery Problem* - PDP) (BERBEGLIA *et al.*, 2009).

Em problemas em que há *Pickup and Delivery*, PDP, a requisição de transporte fornece, se tratando de carga, os locais de carregamento e descarregamento e o total da carga, e se tratando de pessoas, o número de passageiros a serem transportados, assim como o local de embarque e desembarque. Vários *pickups e deliveries* consecutivos podem ser realizados, respeitando a restrição de precedência, onde para se realizar um *delivery* em um ponto de destino, tem que ter havido o *pickup* no respectivo ponto de origem (PARRAGH *et al*., 2008; SAVELSBERGH e SOL, 1995).

O *Dial a Ride Problem* (DARP) é uma variação do PDP mais utilizado para o transporte de pessoas, onde usualmente o veículo sai da garagem vazio, embarca um passageiro em qualquer ponto da rota e o entrega qualquer outro ponto da rota, retornando para a garagem vazio. Sua principal característica é considerar a qualidade do serviço por meio da inserção de janelas de tempo e tempo máximo de percurso no modelo (BERBEGLIA *et al.*, 2009).

Os estudos do DARP foram inspirados pelos serviços conhecidos como porta a porta, e são comumente aplicados ao transporte de pessoas com dificuldade de locomoção, que requisitam o transporte por não conseguirem utilizar os tradicionais transportes coletivos. O objetivo pode ser minimizar o número de veículos e a distância a ser percorrida, e em muitos problemas busca-se também a maximização da qualidade do serviço (RODRIGUES, ROSA E RESENDO, 2012).

Uma variante do DARP onde as pessoas podem eventualmente embarcar ou desembarcar do veículo na garagem foi tratado por Rosa et al. (2016), onde foi proposto um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para o problema de roteirização de helicópteros com base no Dial-a-Ride Problem (DARP). Considerando restrições na origem e destino para cada cliente, no número de veículos, na capacidade e particularidades para o voo dos helicópteros, busca-se minimizar os custos de aluguel dos helicópteros mais o custo total de quilômetros voados. Os resultados mostraram que instâncias com até 25 requisições podem ser resolvidas com a abordagem de agrupamento.

Os usuários podem ser capazes de especificar um intervalo de horários para seu embarque e desembarque, ou seja, a janela de tempo para sua partida e sua chegada, em locais específicos (JAW *et al.,* 1986). Neste tipo de transporte, o usuário terá dois pedidos no dia: um pedido de saída, com horário desejado de embarque e desembarque, e um pedido para o regresso, com horário desejado de embarque. Os veículos utilizados no transporte são compartilhados, vários usuários podem estar ao mesmo tempo dentro do veículo, com diferentes origens e destinos.

Na literatura, existem dois tipos de janela de tempo considerados no DARP: o*ne-sided* e *two-sided*. Para janelas de tempo *one-sided* é necessário especificar somente o horário de início ou término da janela. Ao contrário, as janelas de tempo *two-sided* especificam o horário de início e o horário do término. (CORDEAU e LAPORTE, 2003; HAIDEMANN, 2007; JAW *et al*., 1986).

O DARP pode ser classificado de acordo com a forma como os clientes são atendidos. Quando somente um cliente é atendido por vez o problema é do tipo *single load*, e quando diversos clientes são atendidos simultaneamente, com clientes embarcando

e desembarcando durante o atendimento das requisições é do tipo *mixed loads*. (HAIDEMANN, 2005).

O DARP pode ser dividido em duas classes: 1) estático e 2) dinâmico. Em problemas estáticos as demandas de serviço são conhecidas com antecedência, ou seja, antes do planejamento da execução do serviço. Ao contrário dos problemas dinâmicos, em que a execução e planejamento do serviço se sobrepõem, pois, as requisições ocorrem durante a prestação do serviço (CORDEAU E LAPORTE, 2007).

A função objetivo para problemas DARP varia conforme a aplicação a ser realizada. Comumente, a função objetivo minimiza o custo total das rotas executadas enquanto busca minimizar a inconveniência do cliente, representada normalmente por alguma medida de tempo sofrida pelos clientes no atendimento das requisições (RODRIGUES, ROSA E RESENDO, 2012).

Alguns autores estudaram e propuseram modelos matemáticos para o DARP, dentre os quais Psaraftis (1980), Jaw et al. (1986), Desrosiers et al. (1986), Bodin e Sexton (1986), Dumas e Soumis (1986), Savelsbergh e Sol (1995), Toth e Vigo (1997), Cordeau e Laporte (2002), Cordeau (2006), Karabuk (2009), Parragh (2008) e Rodrigues, Rosa e Resendo (2012), Rosa et al. (2016).

2.1. Revisão Bibliográfica sobre o Dial-a-Ride Problem

Psaraftis (1980) propôs um algoritmo de programação dinâmica para o DARP que foi capaz de resolver problemas sem janelas de tempo, com veículo único e requisições imediatas. A função objetivo adotada foi a minimização de uma ponderação entre o tempo total de operação do veículo e a insatisfação total dos usuários, a qual é medida por uma função linear dos tempos de espera e viagem de cada usuário. O algoritmo proposto foi capaz de resolver problemas com até 10 requisições.

Em 1983, Bodin, baseado no trabalho de Psaraftis (1980), manteve em seu modelo a relação de precedência de modo que cada cliente está associado a uma variável de situação, indicando se o cliente foi ou não embarcado e se foi entregue. Eliminando assim soluções que violem a relação de precedência. A solução do problema atingiu resultado satisfatório para até nove clientes.

A solução de problemas para um único veículo, mas considerando janelas de tempo foi obtida por Psaraftis (1983), a partir da modificação do algoritmo de programação dinâmica publicado por ele em 1980. Este algoritmo foi capaz de resolver problemas para até 10 clientes.

Sexton (1979) e Sexton e Bodin (1985a, 1985b) propuseram um procedimento para o DARP em que o cliente especifica as janelas de tempo, ou seja, o limite de horário superior e inferior para o embarque e desembarque. A função objetivo é minimizar a inconveniência dos clientes, que é mensurada pela soma ponderada do desvio de tempo de entrega e o tempo excedente de viagem dos clientes. O método foi aplicado para um número de 7 a 20 usuários nas cidades de Baltimore e Gaithersburgh e mostrou-se robusto e rápido.

Desrosiers, Dumas e Soumis (1986), apresentaram um algoritmo de programação dinâmica para resolver o DARP para um único veículo considerando janelas de tempo, restrições de precedência e capacidade do veículo. O método proposto foi capaz de resolver instâncias com até 40 requisições com um ótimo desempenho computacional o que permitiu a resolução de problemas até quatro vezes maiores que os analisados por Psaraftis (1983).

Jaw et al. (1986) apresentaram uma heurística com uma função multiobjetivo que minimiza o custo de operação no transporte e a inconveniência dos clientes, medida pelos desvios no tempo de espera e tempo de transporte do cliente. A heurística ordena os clientes de forma crescente em relação ao horário de início do embarque, a partir disto as requisições são inseridas nas rotas existentes quando viável, ou um novo veículo é acrescido para atendê-las. Essa heurística obteve resultados satisfatórios para uma base de dados de aproximadamente 2.600 clientes e 20 veículos. É importante ressaltar que estes dados representavam vários dias de operação, ou seja, nem todos os clientes solicitavam atendimento no mesmo dia.

Madsen, Ravn e Rygaard (1995) trataram o DARP com janelas de tempo, múltiplos veículos e função multiobjetivo. A heurística desenvolvida foi baseada na heurística de inserção sequencial de Jaw *et al.* (1986), priorizando a inserção de solicitações com restrições mais rígidas. A heurística encontrou resultados satisfatórios para instâncias reais para 300 requisições e 24 veículos e 300 usuários. Uma heurística

para resolver problemas de embarque e desembarque com janela de tempo e frota heterogênea foi proposta por Ioachim *et al*. (1995), em que o método cria um conjunto de agrupamentos por meio da geração de colunas e um processo de construção de solução inicial que reduz significativamente o tempo de processamento. O método foi utilizado num problema com até 250 clientes.

Borndörfer *et al.* (1997) desenvolveram um método que se divide em duas fases o *clustering,* onde são construídos segmentos de possíveis rotas que atendam mais de um cliente ao mesmo tempo, reduzindo o espaço de busca e utilizando ao máximo a capacidade de veículos, e *routing*, em que a sequência de rotas são produzidas de forma a respeitar todas as restrições do problema. Foi possível resolver problemas para até 1.500 requisições diárias com 49 veículos.

Toth e Vigo (1997) propuseram uma heurística de inserção paralela tão eficiente e rápida que é capaz de encontrar soluções boas para casos reais e em computadores de uso pessoal. Esta heurística foi aplicada ao problema de transporte de deficientes físicos na Itália, sendo classificado como um problema de embarque e desembarque com janela de tempo, múltiplos veículos e com restrições operacionais adicionais. O problema é resolvido estabelecendo um conjunto inicial de rotas onde são inseridas as solicitações, quando não há possibilidade de inserção de novas solicitações nas rotas existentes uma nova rota é criada, este processo é continuo até que todas as requisições sejam atendidas. O sistema prevê a utilização de veículos extras ou táxis, quando a quantidade de veículos for insuficiente para a demanda de passageiros. Após a obtenção da solução inicial um procedimento de *Tabu Thresholding* é aplicado à solução com objetivo de melhorá-la.

Baugh, Kakivaya e Stone (1998) resolveram o DARP usando a abordagem cluster-first, que utiliza o Simulated Annealing para agrupar os clientes, e route-second que por meio do algoritmo de vizinhança mais próxima determina a ordem de atendimento para cada grupo. Resultados satisfatórios foram obtidos para cenários com até 300 clientes.

Cordeau e Laporte (2003) trataram o DARP em sua versão estática, com janela de tempo, múltiplos veículos e garagem única, por meio de uma heurística de busca Tabu (TS) com objetivo de minimizar o número de rotas e de veículos a um custo capaz de

acomodar todas as requisições. Os autores propuseram um procedimento novo de avaliação de critério de vizinhança e afirmaram que a heurística proposta é flexível e pode ser adaptada para tratar problemas com vários depósitos ou frota heterogênea.

Attanasio *et al.* (2004) paralelizaram a heurística TS proposta por Cordeau e Laporte (2003) para resolver uma versão dinâmica do DARP. Primeiro uma solução estática é construída utilizando as requisições conhecidas no início do horizonte de planejamento, quando chega uma nova requisição o algoritmo busca uma solução que seja factível, sendo assim, o método gera novas soluções. Quando alguma destas soluções aleatórias for factível, o procedimento passa para o próximo passo, se não, o procedimento executa o TS, em paralelo, na esperança de encontrar uma solução factível. Uma vez que a verificação decida ou não pela inclusão da requisição, o método proposto tenta melhorar a solução atual com a heurística TS. Os resultados computacionais mostraram que a paralelização para atendimento dinâmico das requisições DARP diminuiu a quantidade de requisições recusadas.

Diana e Dessouky (2004) propuseram um método, que utiliza uma heurística de inserções paralelas, no qual uma solução é construída a partir de uma sequência de inserções de solicitações. Foi implementado um novo procedimento de inicialização de rotas que inclui os aspectos temporais e espaciais do problema para atender as requisições. O algoritmo proposto foi testado a partir de dados de um programa *Dial-a-Ride* de Los Angeles para um conjunto de dados de 500 e 1000 pedidos e os autores relataram a efetividade do modelo proposto comparando a qualidade de solução e o tempo computacional.

Jorgensen, Larsen e Bergvinsdottir (2006) utilizaram o modelo *cluster-first*, adaptando a heurística Algoritmo Genético para esta fase, e route-second, utilizando uma heurística de vizinhança mais próxima. O problema foi tratado na sua forma estática, com múltiplos veículos, frota heterogênea e garagens múltiplas. Os resultados computacionais foram comparados aos obtidos por Cordeau e Laporte (2003), concluindo que, a heurística proposta obtém valores melhores para o tempo de transporte e espera dos clientes, enquanto Cordeau e Laporte (2003) conseguem resultados melhores na duração da rota.

Cordeau (2006) desenvolveu um método que utiliza o algoritmo Branch-and-Cut para resolver o DARP, que foi tratado na sua versão estática, com múltiplos veículos, frota homogênea e garagem única. Os resultados foram obtidos a partir de cenários gerados aleatoriamente com no máximo 48 clientes.

Algumas heurísticas e meta-heurísticas para resolver o DARP para casos reais foram apresentadas, podendo citar, Wong e Bell (2006) com uma heurística de inserção modificada para o DARP com frota heterogênea, janelas de tempo e multicapacidade; Xiang *et al*. (2006) propuseram uma heurística em duas fases, na primeira utilizando uma heurística de inserção e na segunda uma de aprimoramento, para o DARP com frota heterogênea, janelas de tempo e agendamento de motoristas a veículos; Calvo e Colorni (2007) descreveram uma heurística simples, rápida e efetiva baseada em Calvo (2000) para o DARP com multiveículos;

Karabuk (2008) tratou o DARP com janela de tempo e restrições de precedência utilizando uma heurística baseada no método de geração de colunas. O algoritmo de geração de colunas é modificado para incluir o conceito de duas fases *clustering-first*, onde os clientes são agrupados, e *routing-second, onde* são criadas rotas de veículos para os grupos formados na fase anterior. O Autor apresentou os testes computacionais, executados com instâncias reais e problemas com até 680 requisições e 48 veículos, indicando que os problemas podem ser resolvidos dentro de 2% de otimalidade, e houve uma melhoria de 12% nas soluções encontradas. Mauri e Lorena (2009) utilizaram a heurística *Simmulated Annealing* para resolver um modelo matemático geral e multiobjetivo em uma versão estática do DARP. A heurística foi testada em instâncias disponíveis publicamente e comparadas a outros métodos de resolução para o DARP.

Beaudry *et al*. (2009) adaptaram a heurística de busca tabu desenvolvidas por Cordeau e Laporte (2003) para resolver o DARP em um ambiente dinâmico, com uma frota heterogênea de grandes hospitais. Neste problema as requisições envolvem três tipos diferentes de transporte (assentos, cama e cadeira de rodas) e veículos de diferentes tipos.

Hyytiä *et al.* (2010) propuseram um modelo estocástico para o DARP com veículo único usando o modelo *Erlang's Loss*. O modelo foi útil para avaliar os *trade-offs* entre

a taxa de *pickups* e tempo médio de atendimento do cliente, conforme a capacidade de assentos no veículo.

Parragh *et al*. (2010) aplicaram a heurística de busca em vizinhança variável ao DARP estático com vários veículos. Os autores levaram em consideração a inconveniência para o usuário representada por janelas de tempo e um tempo máximo de viagem. O objetivo foi minimizar os custos totais de roteamento, respeitando os limites máximos das rotas, a janela de tempo, e o tempo máximo de viagem do usuário. Os resultados foram semelhantes aos de Cordeau e Laporte (2003) e comentaram que a mesma versão foi proposta por Jorgensen *et al*. (2007), que alcançou os mesmos resultados utilizando um algoritmo genético.

Häme (2011) desenvolveu um algoritmo exato para o problema do DARP com janelas de tempo e requisições dinâmicas, baseando-se nos trabalhos de Psaraftis (1980), Psaraftis (1983), o algoritmo foi analisado e avaliado por meio de testes computacionais e adaptado para tamanho do problema.

Garaix *et al.* (2010) analisaram dois métodos de solução baseados em geração de colunas aplicados a uma formulação de partição de conjuntos para o DARP dinâmico com função objetivo de maximizar da taxa de ocupação de passageiros, que é definida como o tempo de viagem dos passageiros divido pelo tempo total de viagem dos veículos. Os métodos propostos foram capazes de resolver, em poucos segundos, um largo conjunto de instâncias de vários tipos com até 200 requisições.

Heilporn, Cordeau e Laporte (2011) apresentaram um modelo em que o horário de embarque e as requisições são definidas estocasticamente, ou seja, o horário que o cliente está disponível no local de embarque não pode ser conhecido previamente com exatidão. Para a solução propuseram um novo algoritmo chamado *DARP with stochastic customer delays* (S-DARP), que consiste em minimizar o custo esperado da rota realmente executada pelo veículo utilizando o algoritmo inteiro *L*-shaped. Os resultados computacionais mostraram que modelar os atrasos estocasticamente levou a uma redução de 33% do custo da solução esperada, mas que o algoritmo fornece soluções ótimas para instâncias de tamanhos pequenas e médias.

Rodrigues *et al.* (2014) apresentaram um *clustering search* (CS) para um *dial-a-ride* (DARP) multicritério. Em que os usuários especificam as origens e destinos com

janelas de tempo para os horários de embarque e desembarque; o transporte é realizado por uma frota homogênea de veículos localizados inicialmente em uma mesma garagem; busca-se definir rotas que minimize o custo de transporte, o número de veículos utilizados e o tempo total de espera dos usuários, respeitando restrições de capacidade dos veículos e de precedência. O CS obteve bons resultados computacionais considerando instâncias reais

Berbeglia, Cordeau e Laporte (2012) combinaram um algoritmo exato de programação por restrições (PR) e a meta-heurística Tabu Search (TS) obtendo um novo algoritmo híbrido para o DARP dinâmico. Na resolução do problema a abordagem proposta constrói uma solução inicial com as demandas conhecidas e utiliza a heurística TS para melhorar continuamente esta solução. As requisições em tempo real são avaliadas, em paralelo, pela heurística TS e o algoritmo PR para decidir se são aceitas ou rejeitadas. Uma nova requisição só é aceita pelo algoritmo quando ou o TS ou PR encontra uma solução viável do problema.

Chevrier *et al.* (2012) propuseram, para o DARP com frota heterogênea e janelas de tempo, três Algoritmos Evolucionários (AE) híbridos e modificaram três heurísticas AE, incluindo uma busca local no passo de mutação de cada AE. A função objetivo é multicritério, minimizando a quantidade de veículos; os atrasos experimentados pelos clientes e o tempo de viagem dos veículos. Os testes computacionais mostraram que as meta-heurísticas AE hibridizadas obtêm resultados melhores que os métodos AE originais.

Rodrigues, Rosa e Resendo (2012) basearam-se em Cordeau (2006) para propor o modelo para transporte de cadeirantes com janelas de tempo, múltiplos veículos e frota homogênea. O objetivo é minimizar o custo de atendimento das demandas, representado pelo tempo de viagem. O modelo mostrou que pode obter resultados ótimos para diversos cenários com até 20 clientes.

Zidi *et al.* (2012) propuseram a aplicação do *Multi-Objective Simulated Annealing* (MOSA) à formulação anterior do DARP estático, com frota homogênea, função objetivo multicritério. Os testes computacionais produziram soluções com tempo de processamento melhor em relação aos resultados de Cordeau e Laporte (2003).

Liu, Luo e Lim (2015) estudaram o DARP para aplicação real, denominada R-DARP, que considera problemas com múltiplas viagens, veículos heterogêneos, tipos de pedidos múltiplos, capacidade de veículo configurável e planejamento de mão de obra. Formularam o problema utilizando dois modelos de programação inteira mista que usam métodos diferentes para atender solicitações associadas ao depósito, e criaram um algoritmo de ramificação e corte para resolver o problema. Os testes computacionais mostram que o algoritmo proposto de *branch* and *cut* pode resolver instâncias com até 22 pedidos de otimização dentro de 4 h.

Braekers e Kovacs (2016) propuseram um problema denominado *driver consistent dial-a-ride problem* (DC-DARP), que considera um número máximo de motoristas para transportar em um horizonte de planejamento. Para o problema foram considerados frota heterogênea e usuários com diferentes tipos de necessidades especiais. Duas formulações do problema foram desenvolvidas e integradas utilizando o algoritmo *Branch-and-Cut*, que para pequenas instâncias obteve ótimos resultados, e desenvolveram um algoritmo de pesquisa de vizinhança que gera soluções ótimas em um curto período. Foram realizados testes computacionais para mais de 1000 instâncias e os resultados mostraram que o custo de roteamento aumenta em no máximo 5,80% se os usuários forem transportados por pelo menos dois motoristas, mas dependendo da instância, o custo de atribuir um motorista a cada usuário pode ser até 27,98% maior quando comparado com uma solução de baixo custo.

Detti, Papalini e Lara (2016) aplicaram o *Multi-Depot Dial-a-Ride-Problem* (MD-DARP) em um caso real de transporte de pacientes não emergenciais. O problema considerou frota heterogênea, compatibilidade do paciente ao veículo, qualidade do serviço, preferência dos pacientes conforme o tempo de espera. Segundo os autores foi a primeira vez na literatura que os algoritmos de *Variable Neighborhood Search* (VNS) e *Taboo Search* (TS) foram utilizados para obter resultados para o MD-DARP. Foram realizados testes computacionais em várias instâncias aleatórias com base em dados reais que mostraram ótimos resultados tanto em relação aos custos quanto em qualidade de serviço.

Molenbrauch*, et al.* (2016) aplicaram o DARP para o transporte de pacientes. Este estudo propôs minimizar o custo operacional e a insatisfação dos usuários, para resolução, foi utilizado um algoritmo de *multi-directional local search* (MDLS) que

considerou a relação custo benefício entre a redução de custo e a qualidade do serviço, também foi incorporado uma estrutura em *variable neighborhood descent* (VND) reduzindo o tempo de resposta computacional. Como resultado obteve-se um novo modelo de programação de rotas, que reduziu o tempo em trânsito dos pacientes.

Masmoudi, *et al.* (2016) analisaram o *heterogeneous dial a ride problem* (H-DARP), que considera o transporte de usuários por uma frota de veículos heterogênea. Para solucionar o problema os autores propuseram um (GA) hibrido, e utilizaram heurísticas de construção eficientes, operadores de crossover e técnicas de busca locais, adaptadas às características do H-DARP. Foram realizados testes computacionais que mostram a eficácia desta abordagem quando comparada com os algoritmos já existentes para o DARP e H-DARP.

Após esta revisão da literatura, não foi encontrado artigo científico que tratasse do planejamento do transporte de maquinistas para atendimento às locomotivas acopladas em trens, considerando restrições relacionadas ao tempo máximo de percurso, limites de espera e geração de horas improdutivas. Os trabalhos tomados como base para o desenvolvimento desta dissertação foram: Cordeau (2006), Rodrigues, Rosa e Resendo (2012), Rodrigues, Rosa, Resendo, Mauri e Ribeiro (2014) e Rodrigues *et al.* (2016). Apesar de tratarem problemas distintos, estes artigos citados possuem algumas características equivalentes ao problema estudado nesta dissertação, como por exemplo, as restrições de precedência e as restrições que possibilita o passageiro embarcar e desembarcar do veículo em qualquer ponto da rota.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo será abordada a metodologia da pesquisa e seus respectivos estágios, incluindo a classificação e as etapas do método proposto nesta dissertação.

3.1. Classificação da metodologia de pesquisa

Para a classificação do método de pesquisa foi tomado como base a taxonomia descrita por Vergara (2005), que classificaram quanto à natureza da pesquisa, à abordagem, aos objetivos e os procedimentos técnicos adotados.

Quanto a natureza esta dissertação é aplicada, pois objetiva gerar conhecimento para aplicação prática, a curto ou médio prazo, para solução de problemas que gerem ganhos econômicos e sociais. Nesta dissertação o objetivo é realizar o planejamento do transporte de maquinistas para troca de equipes em locomotivas dos trens, utilizando um modelo matemático que atenda aos requisitos operacionais e de segurança a um menor custo possível.

No que se refere a abordagem, pode ser classificada como quantitativa, por utilizar recursos matemáticos para auxiliar na tomada de decisão (VERGARA, 2005), tomando-se como exemplo a função objetivo, que minimiza o custo do transporte dos maquinistas e a geração de horas improdutivas.

Com relação aos objetivos esta pesquisa pode ser classificada como exploratória pois, visa conhecer o sistema e requisitos de planejamento do transporte de maquinista utilizado atualmente para atender a EFVM. Assim como estudar e compreender os problemas de roteamento sendo possível propor um modelo para resolve-lo. Segundo Gil (2007), a pesquisa exploratória tem a finalidade de obter informações para delimitação do problema de forma a orientar os métodos e a formulação de hipóteses.

Quanto ao procedimento técnico, foram utilizados a pesquisa bibliográfica, por meio do levantamento e análise de artigos, livros e outros. Abrangendo principalmente os artigos científicos em plataformas como *Science Direct*, *Web of Science*, *Scopus*, Plataforma CAPES, *ResearchGate* e *Google Scholar*. As palavras chaves para busca foram: planejamento do transporte de maquinistas, roteirização para transporte de maquinistas, roteirização de veículos para atender operação ferroviária, ferrovia, *Dial*

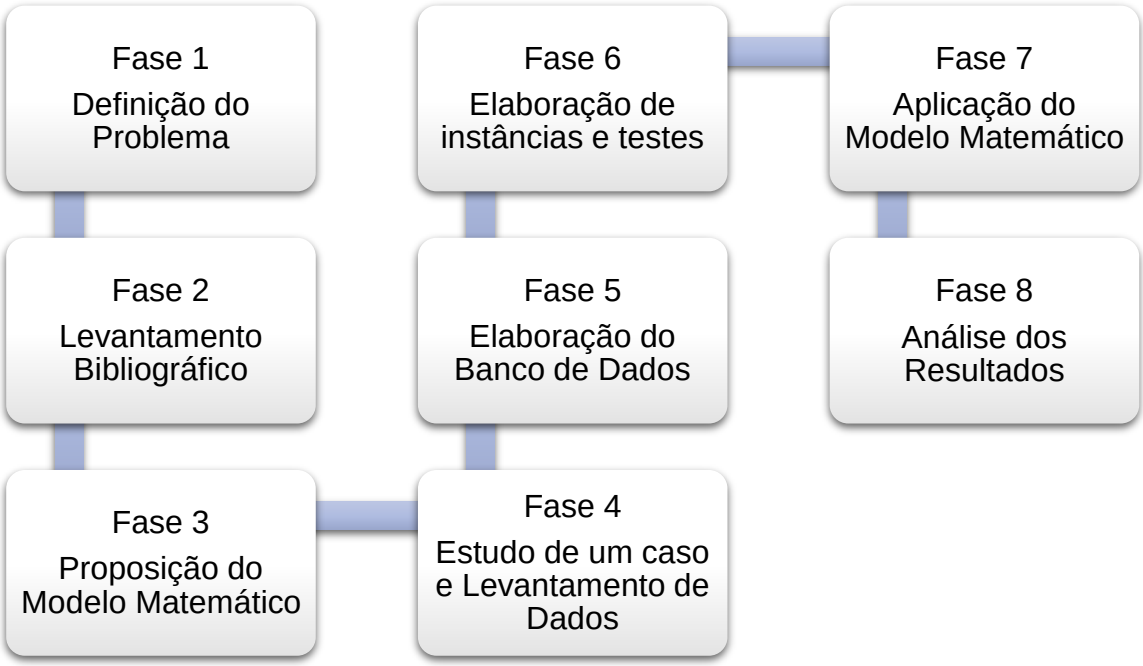
a ride problem, railroad e *railway*. Após o levantamento inicial, foram selecionados os principais artigos e autores. Ao analisar cada artigo observou-se que não há trabalhos que tratem o transporte de maquinistas, porém foram identificados outros artigos com características similares ao problema estudado

A validação do modelo proposto ocorreu por meio do estudo e avaliação de um caso específico para atender a operação da EFVM.

3.2. Etapas da metodologia de pesquisa

Com o intuito de atingir o objetivo da pesquisa, faz-se necessário seguir um método de pesquisa com fases bem definidas. Dessa forma, o método está dividido em oito fases que são apresentadas na Figura 2.

Figura 2: Fases da metodologia da pesquisa



Fonte: Próprio autor.

FASE 1: Definição do Problema

O problema tratado é o planejamento de transporte de maquinistas para troca de equipes das locomotivas dos trens, tema que envolve a roteirização de veículos dentro de um cenário de operação ferroviária.

FASE 2: Levantamento Bibliográfico

Foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o problema de planejamento do transporte de maquinistas para troca de equipes das locomotivas dos trens ao longo de uma ferrovia, a fim de aprofundar no tema da pesquisa e suas particularidades, nesta fase não foram encontrados trabalhos que discutissem este tema. Posteriormente, foi realizado uma pesquisa bibliográfica para buscar modelos matemáticos que possuíssem os maiores números de características compatíveis com o problema em questão. Nessa fase foi identificado o DARP como o modelo matemático que melhor se enquadrou à essa realidade, e foi possível conhecer a respeito das variáveis e parâmetros envolvidos no estudo, dando o embasamento para construção do modelo.

FASE 3: Proposição do Modelo Matemático

Com base no conhecimento adquirido na fase anterior, formulou-se o modelo matemático e o mesmo foi implementado no *solver* IBM® ILOG® CPLEX® 12.6 (IBM, 2017). A validação do modelo foi realizada por meio da aplicação de instâncias testes, criadas baseados na realidade operacional.

FASE 4: Estudo de caso e Levantamento de Dados

Para o levantamento de dados foi realizado a delimitação da área a ser analisada, neste caso definiu-se a região da Estação ferroviária de Costa Lacerda. Em seguida realizou-se a análise do perfil desta área: quantidade de pontos de troca; distâncias e tempo de percursos entre os locais de embarque e desembarque de maquinistas. Realizou-se também a análise do número de maquinistas, particularidades de escala, frota de veículos disponíveis e capacidade dos veículos. E por último, análise das restrições operacionais, como tempo máximo de percurso permitido, limites de espera permitido início e fim de escala, velocidade máxima de tráfego permitida, ocupação máxima dos veículos.

FASE 5: Elaboração do Banco de Dados

Elaborou-se se um banco de dados com todas as combinações possíveis de origem e destino dos maquinistas, com as respectivas distâncias e tempo de percurso direto. O banco de dados também contém informações referentes aos custos relacionados

aos veículos e horas improdutivas dos maquinistas. A partir deste arquivo é possível gerar as matrizes de distâncias necessárias para o teste das instâncias analisadas.

FASE 6: Elaboração de Instâncias e Testes

Foram formadas diferentes instâncias baseadas em dados reais objetivando observar e analisar a sensibilidade e resposta do modelo, assim como validar o mesmo.

FASE 7: Aplicação do Modelo Matemático

Aplicação do modelo matemático nas instâncias criadas a fim de obter o melhor planejamento do transporte de maquinistas para troca de equipes em locomotivas dos trens, ao menor custo de transporte e de horas improdutivas possíveis.

FASE 8: Análise dos Resultados

Os valores das variáveis de decisão e da função objetivo, obtidos por meio do CPLEX, foram organizados em forma de tabelas para entendimento e análise. Nessa fase, também, realizou-se a comparação dos resultados obtidos pelo modelo proposto com o planejamento manual das atividades realizado pelos Assistentes de composição da EFVM.

4. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS

O problema de planejamento do transporte para atender a troca de maquinistas das locomotivas dos trens foi levantado por meio de reuniões técnicas com a Equipe Operacional responsável pela distribuição (embarque e desembarque) de maquinistas na região do destacamento de Costa Lacerda.

Vale ressaltar que os dados utilizados para a elaboração dessa dissertação foram cedidos pela empresa Vale S/A por meio do convênio com a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), número 75528452/2016, em que a empresa Vale S.A. autoriza a utilização de alguns dados operacionais para fins de pesquisa. A fim de viabilizar a publicação, os dados foram somados a uma constante não divulgada com o objetivo de manutenção do sigilo dos mesmos.

O destacamento de Costa Lacerda atende a 6 (seis) pontos de carregamento, que podem ser observados na região em destaque no mapa da Figura 3. A região atendida é responsável por aproximadamente 60% do total de volume de minério de ferro carregado e transportado pela Estrada de Ferro Vitória a Minas. Além disso, também inclui a operação de intercâmbio operacional existente entre a Ferrovia Centro-Atlântica (FCA) e a EFVM (Vale, 2017b).

Figura 3: Mapa da EFVM

Fonte: VALE (2017c).

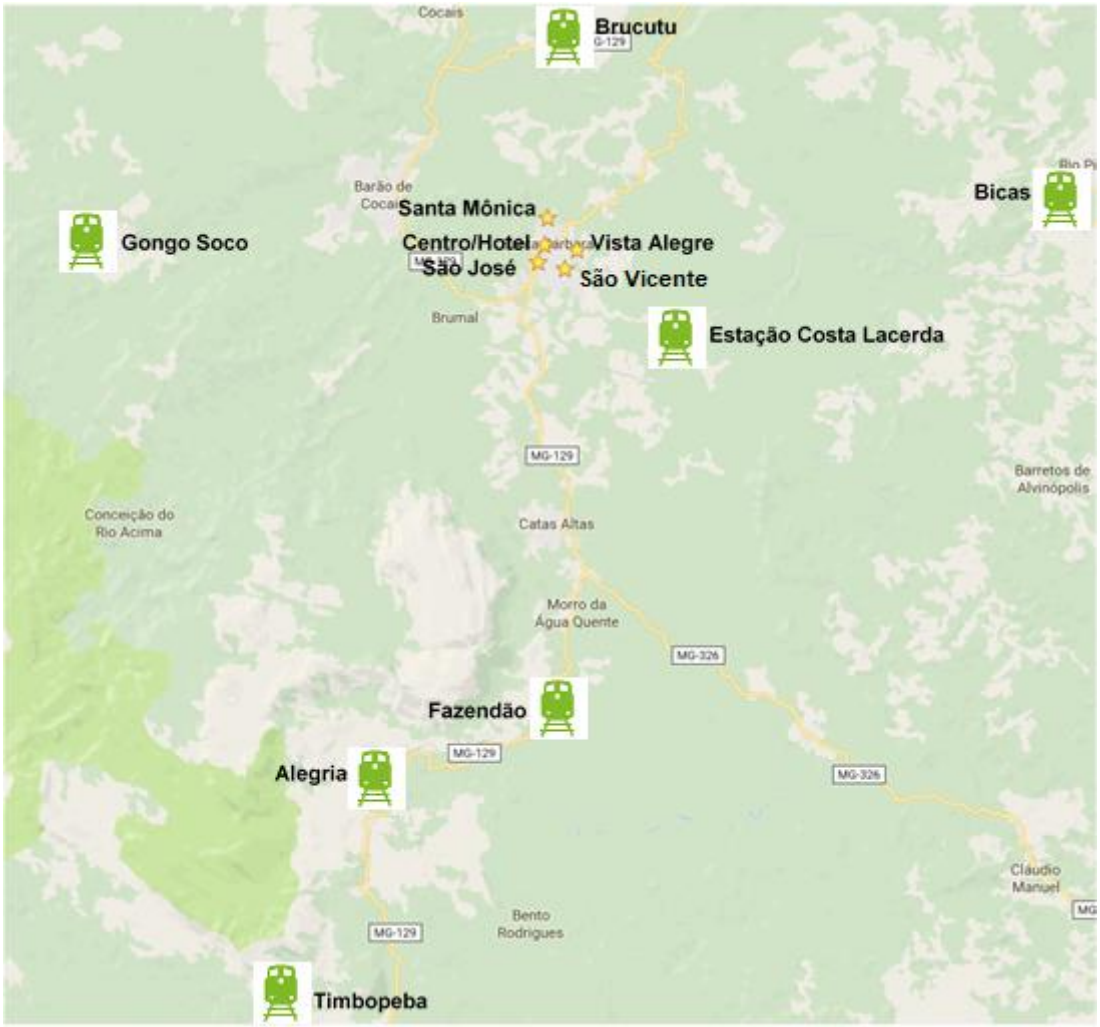
As trocas de maquinistas para atender as locomotivas dos trens devem ser realizadas nos pontos de carregamento de trens, em pátios de formação de trens e pontos de intercâmbio de trens da EFVM-FCA.

Os pontos de carregamento de trens são os pontos em que ocorrem os carregamentos dos trens da EFVM com minério de ferro. A região do destacamento de Costa Lacerda contempla os pontos de carregamento de Brucutu, Alegria, Timbopeba, Fazendão, Bicas e Gongo Soco. Os pátios de formação de trens da EFVM são os locais onde ocorrem manobras de anexação e desanexação de vagões e/ou locomotivas, para formar trens que serão entregues em pontos de intercâmbio ou seguirão para os pontos de carregamento. Na região em questão existe o pátio de formação de Costa Lacerda.

O ponto de intercâmbio de trens da EFVM-FCA é o ponto em que ocorre a entrega da operação do trem para a ferrovia de interface. A região analisada contempla um ponto de intercâmbio que está localizado junto à entrada do ponto de carregamento Gongo Soco.

Na Figura 4 podem ser identificados os pontos de troca dos maquinistas considerados nessa dissertação, assim como os bairros onde estão localizados os hotéis e/ou residências de descanso dos maquinistas.

Figura 4**:** Pontos de Origens e Destinos de Maquinistas na Região de Costa Lacerda



Fonte: Adaptado de Google Maps (2017).

Conhecendo os locais onde há embarque e desembarque de maquinistas na região analisada, criou-se um banco de dados com todas as combinações possíveis de origem e destino dos maquinistas. Com o auxílio do Google Maps (Google Maps, 2017) encontrou-se as distâncias entre todos esses pontos conforme apresentado nas Tabelas 1, e calculou-se o tempo de trajeto direto para cada um deles, considerando a velocidade média de 40 km por hora.

Tabela 1: Distâncias (km) entre os possíveis pontos de origem e destinos dos maquinistas

	Hotel/ Centro	São Vicente	Sta Monica	São José	Vista Alegre	Estação Costa Lacerda	Brucutu	Fazendão	Alegria	Timbopeba	Gongo Soco	Bicas
Hotel / Centro	0	2,7	1,6	1,2	1,7	10,3	27,5	25,7	38	48,9	24,5	33
São Vicente	2,7	0	3,1	2,2	1,3	9	27,6	25,7	38,1	48,7	24,8	33,8
Sta Monica	1,6	3,1	0	2,5	2,8	10,7	28,4	26,6	38,9	49,6	25,4	33
São José	1,2	2,2	2,5	0	2,6	10,5	25,9	24	36,3	47,1	22,8	34,1
Vista Alegre	1,7	1,3	2,8	2,6	0	8,3	29	27,2	39,5	50,2	26	33,3
Estação Costa Lacerda	10,3	9	10,7	10,5	8,3	0	35,9	29	41,3	52	32,9	26,4
Brucutu	27,5	27,6	28,4	25,9	29	35,9	0	47,2	59,5	77,4	28,1	59,3
Fazendão	25,7	25,7	26,6	24	27,2	29	47,2	0	12,3	30,2	44,2	53,7
Alegria	38	38,1	38,9	36,3	39,5	41,3	59,5	12,3	0	15,1	56,6	74,7
Timbopeba	48,9	48,7	49,6	47,1	50,2	52	77,4	30,2	15,1	0	67,5	132
Gongo Soco	24,5	24,8	25,4	22,8	26	32,9	28,1	44,2	56,6	67,5	0	86,3
Bicas	33	33,8	33	34,1	33,3	26,4	59,3	53,7	74,7	132	86,3	0

Fonte: Próprio autor.

Para os maquinistas que iniciarão a jornada de trabalho, o transporte sairá de suas residências ou hotéis para os pontos de troca de maquinista das locomotivas dos trens, o inverso para os maquinistas que encerrarão a escala.

Deve-se garantir que todos os trens da ferrovia sejam supridos de maquinistas no momento de sua chegada ao ponto de troca, ou seja, que não haja atraso na partida do trem por falta de maquinista. No entanto, o maquinista não pode chegar ao ponto de troca muito antes da chegada do trem, pois isso acarreta a geração de horas improdutivas para serem pagas para ele, o que não é desejado pela ferrovia.

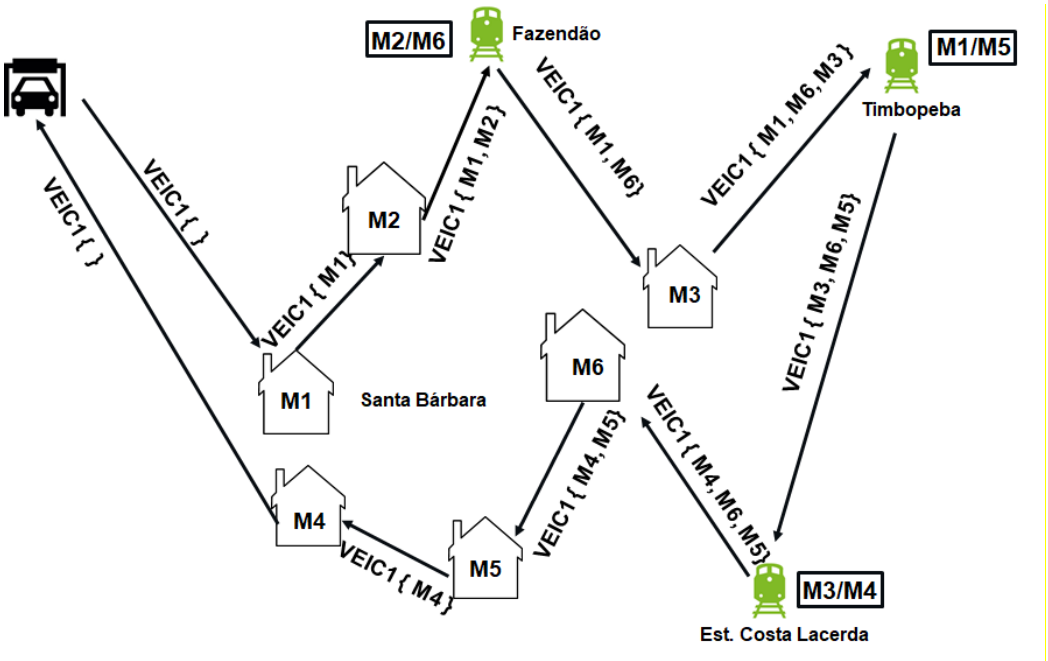
As horas improdutivas são aquelas que dentro do intervalo de início e fim da jornada de trabalho do maquinista, o mesmo não está exercendo a função de conduzir o trem. Para o maquinista que inicia a jornada de trabalho estas horas são consideradas pela antecipação superior a 15 minutos da sua chegada ao ponto para a troca, e para o maquinista que encerra a jornada de trabalho há geração de horas improdutivas quando o mesmo fica aguardando o transporte para o local de descanso por um tempo superior a 10 minutos. A partir desse ponto, esses intervalos para iniciar a contagem de hora improdutiva são denominados: 1) limite início de escala, que no caso da EFVM é 15 minutos e 2) limite fim de escala, que no caso da EFVM é 10 minutos. Vale ressaltar que para os maquinistas que encerram a jornada de trabalho há um limite máximo de espera pelo transporte que é de 15 minutos, também denominado limite máximo para embarque.

No problema em questão (Figura 5), o veículo sai da garagem vazio para iniciar a rota, segue para buscar o maquinista na sua residência ou hotel, podendo embarcar um ou mais maquinistas em diferentes origens antes de seguir para os pontos de troca (destinos). Durante o percurso de entrega dos maquinistas nos pontos de troca o veículo pode também embarcar maquinistas que encerraram a jornada de trabalho e se destinam as suas residências ou hotéis, para realizar desta forma a rota de retorno. Cada rota é atendida por um único veículo e motorista, que possui uma jornada de trabalho de 12 horas.

Conforme a Figura 5 o veículo sai da garagem vazio e segue para o local de descanso do maquinista M1, que embarca no veículo, o veículo segue para o local de descanso do maquinista M2, que embarca no veículo, em sequência o veículo segue para

buscar o maquinista M3 em seu local de descanso. Com os maquinistas M1, M2 e M3 a bordo o veículo segue para o ponto de troca de Fazendão, onde ocorrerá a troca do maquinista M2, que iniciará a escala de trabalho, com o maquinista M6 que encerrará a escala de trabalho. O maquinista M6 embarca no veículo que se direciona para o ponto de troca Timbopeba, onde ocorrerá a troca do maquinista M1, que iniciará a escala de trabalho, com o maquinista M5 que encerrará a escala de trabalho. O maquinista M5 embarca no veículo que segue para o ponto de troca Est. Costa Lacerda onde o maquinista M3, que iniciará a escala de trabalho, desembarca do veículo para realizar a troca com o maquinista M4 que encerrará a escala de trabalho. O veículo então segue a rota com os maquinistas M4, M5 e M6 a bordo levando-os até seus respectivos pontos de descanso e retornando para a garagem vazio.

Figura 5 : Exemplo esquemático de uma possível rota a ser gerada



Fonte: Próprio autor.

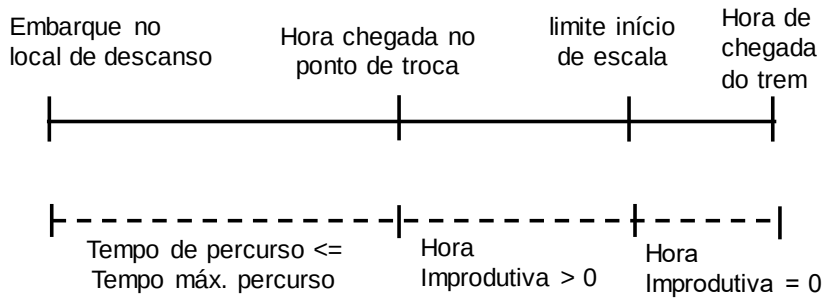
Com isso, para garantir o cumprimento da programação de embarque e desembarque de maquinistas é necessária a criação de rotas que atendam aos requisitos diários de transporte de maquinistas aos pontos de trocas, respeitando o horário do trem, o tempo máximo de percurso do maquinista, tempo máximo de espera do maquinista e a capacidade dos veículos disponíveis, visando minimizar o custo de utilização dos veículos, da quilometragem percorrida, bem como reduzir o custo de horas improdutivas geradas.

O embarque do maquinista em sua residência ou hotel deve ser realizado antes do horário que inicia a sua escala de trabalho e com antecipação suficiente para contemplar o tempo de percurso do ponto de embarque até o ponto de troca. As escalas de maquinistas sempre são programadas para início em horário cheios, ou seja, uma hora, duas horas, e assim por diante, sendo permitido programar a apresentação de no máximo 4 maquinistas por hora. Uma escala de trabalho efetiva contempla o período de 6 horas, livres do tempo de transporte do local de origem até o ponto de troca da equipe, podendo ser estendida até 12 horas com pagamento de hora extra.

No problema em questão, devem ser analisadas duas situações distintas: 1) Maquinistas que iniciarão a escala de trabalho e 2) Maquinistas que encerrarão a escala de trabalho.

A Figura 6 apresenta um esquema dos marcos numéricos para a situação 1. Para os maquinistas que iniciarão a escala de trabalho, o embarque no veículo ocorrerá em seu local de descanso e o tempo de percurso até o ponto de troca deverá ser menor ou igual ao tempo máximo de percurso estabelecido pela EFVM. Analisando em uma linha do tempo, se a hora de chegada do maquinista no ponto de troca ocorrer entre a hora de chegada do trem (horário que inicia a escala do maquinista) e o limite início escala (15 minutos que antecedem o horário que inicia a escala do maquinista) considera-se a hora improdutiva igual a 0. Ao contrário, caso o maquinista chegue ao ponto de troca em um tempo qualquer com antecedência superior ao limite início escala haverá geração de hora improdutiva.

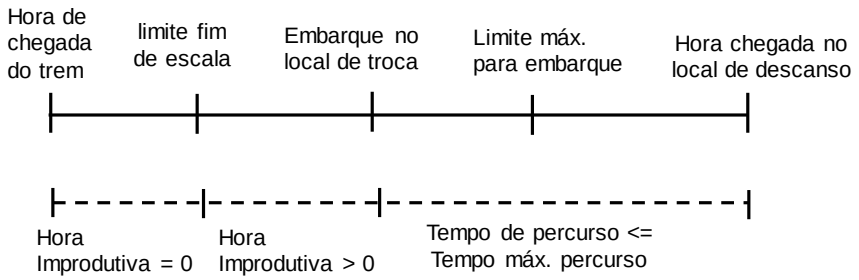
Figura 6: Esquema dos marcos horários considerados para o maquinista iniciando a escala



Fonte: Próprio autor.

A Figura 7 apresenta um esquema dos marcos numéricos para a situação 2. Para os maquinistas que encerrarão a escala de trabalho, o embarque no veículo ocorrerá no ponto de troca e o tempo de percurso até o seu local de descanso deverá ser menor ou igual ao tempo máximo de percurso estabelecido pela EFVM. Analisando em uma linha do tempo, se o embarque do maquinista no veículo ocorrer entre a hora de chegada do trem (horário que encerra a escala do maquinista) e o limite fim de escala (10 minutos após o horário que encerra a escala do maquinista) considera-se a hora improdutiva igual a 0. Ao contrário, caso o maquinista embarque no veículo em um tempo qualquer superior ao limite fim de escala haverá geração de hora improdutiva, vale ressaltar que o maquinista deve embarcar no veículo em um tempo de que respeite o limite máximo para embarque.

Figura 7: Esquema dos marcos horários considerados no maquinista encerrando a escala



Fonte: Próprio autor.

O transporte está sujeito a um conjunto de restrições operacionais e de segurança e é realizado com uma frota de veículos, sendo quatro veículos leves com capacidade máxima de 3 passageiros e um motorista, e dois veículos do tipo Van com capacidade de 13 passageiros e um motorista. No estudo considera-se que os veículos trafegam com velocidade média de 40 km/h.

Para calcular os custos relacionados ao transporte considerou-se, para cada modelo de veículo da frota, o custo por quilometro percorrido e o custo de utilização do veículo, que é calculado como sendo a soma do custo do aluguel do veículo mais o custo com o motorista. O tempo de percurso do maquinista dentro do veículo, entre o embarque e desembarque, deverá ser no máximo 1,5 horas, excetuando-se o ponto extremo de troca, que é a mina de Bicas, que deve ser de 2,5 horas.

As requisições de transporte são solicitadas com 24 horas de antecedência e contemplam o horário de chegada do trem no ponto de troca e o local de embarque e desembarque dos maquinistas que irão iniciar ou terminar a escala de trabalho, respectivamente.

4.1. Geração de instâncias

Para gerar as instâncias foram utilizados os dados apresentados na definição do problema, e foram realizados, para cada tipo de veículo, levantamentos referentes aos custos relacionados ao aluguel, motorista e custo por quilometro percorrido. Para obtenção de resultados reais, foi fornecido também dados referentes ao valor médio da hora improdutiva paga aos maquinistas. A partir deste banco de dados pode-se dar início a criação de instâncias que refletissem a rotina da troca de maquinistas.

Para a elaboração das instâncias foi fornecido, pelos assistentes de composição-EFVM, uma grade de doze horas da programação de troca de maquinistas. Nesta planilha havia informações referentes ao horário de chegada do trem, os pontos onde ocorreriam as trocas, os maquinistas disponíveis para iniciar a escala de trabalho e onde eles se encontravam (seus locais de descanso), assim como, os maquinistas que encerrariam a escala de trabalho e seus respectivos locais de destino.

De posse desses dados, e para a realização do teste computacional do modelo proposto, foi elaborado um conjunto de dezesseis instâncias, apresentadas na segunda coluna da Tabela 2, que variaram o número de requisições de 10 até 30, e que foram divididas em três grupos A, B, e C, conforme coluna 1 da Tabela 2.

Para cada um dos grupos estão evidenciadas variações para as seguintes características: número de requisições, número de veículos disponíveis, limite início de escala, limite fim de escala e o limite máximo para embarque do maquinista que encerra a escala de trabalho. Conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Instâncias para avaliar o modelo matemático

Grupo	Instâncias	número de requisições	número de veículos disponíveis	limite início escala (h)	limite fim de escala (h)	limite máximo para embarque (h)
A	1	10	4	0,25	0,17	0,25
	2	15	6			
	3	17	6			
	4	20	6			
	5	22	5			
	6	24	5			
	7	26	6			
	8	28	6			
	9	30	6			
B	10	20	6	0,25	0,17	0,25
	11	20	6	0,33	0,25	0,5
	12	20	6	0,42	0,33	0,5
	13	22	5	0,25	0,17	0,25
	14	22	5	0,33	0,25	0,5
	15	22	5	0,42	0,33	0,5
C	16	24	5	0,25	0,17	0,25

Fonte: Elaborado pelo autor.

As instâncias do Grupo A refletem características reais do destacamento em estudo, como, por exemplo, limite início de escala, limite fim de escala, limite máximo para embarque, tempo máximo de percurso de 1,5 horas, bem como o número de veículos disponíveis. Este grupo foi criado com o objetivo de avaliar o desempenho do CPLEX executando o modelo proposto como: tempo de processamento e número limite de requisições capaz de atingir resultados com soluções ótimas.

Com relação às características do Grupo A, nota-se por meio da Tabela 2 que suas instâncias possuem as seguintes características idênticas: limite início de escala, limite fim de escala, tempo máximo de percurso e o limite máximo para embarque. Em

relação as características diferentes têm-se o número de requisições e número de veículos disponíveis.

No que tange as características diferentes entre as Instâncias do Grupo A, têm-se entre as Instâncias 1 e 2: número de requisições, número de veículos disponíveis. Nas Instâncias 2, 3 e 4 observa-se as mesmas características, exceto pela variação do número de requisições.

A Instância 5 possui as mesmas especificidades da Instância 6, com exceção do número de requisições. E ambas diferem das Instâncias 2, 3, e 4 pela variação no número de requisições e o número de veículos disponíveis. A partir das Instâncias 5 e 6 criou-se mais três Instancias, a 7, 8 e 9, variando o número de requisições e número de veículos disponíveis. Por fim, as instâncias 7, 8 e 9 diferem entre si apenas pelo número de requisições.

O Grupos B foi criado com o intuito de analisar o ganho em relação ao transporte, relacionado a utilização do veículo e quilômetros percorridos, e quantidade de horas improdutivas geradas, considerando um cenário mais flexível onde é possível variar o limite início escala, limite fim escala e o limite máximo para embarque. A Instância 10 possui as mesmas características da Instância 4 e a Instância 13 possui as mesmas características da Instância 5, como podem ser observadas na Tabela 2, estas Instâncias refletem as características reais do problema e foram repetidas no Grupo B para servirem de comparação com as Instâncias 11,12, 14 e 15 que refletem situações hipotéticas e que não correspondem plenamente à realidade do processo de troca de maquinistas neste destacamento.

Para o Grupo B, as Instâncias 10 a 12 se diferenciam das Instâncias 13 a 15 pelo número de requisições. Sendo que as distinções entre as Instâncias 10, 11 e 12 concernem às características do limite início de escala, limite fim de escala e limite máximo para embarque, as mesmas distinções podem ser observadas entre as Instâncias 13,14 e 15.

O Grupo C tem o propósito de testar o modelo matemático proposto como uma ferramenta de auxílio à decisão para o planejamento do transporte de maquinistas para a troca nas locomotivas dos trens. Para tanto, foi cedido pela EFVM a execução de um planejamento de transporte para atender a troca de maquinistas das

locomotivas dos trens no destacamento de Costa Lacerda. Sendo os dados reais referentes aos locais de origem e destino dos maquinistas e os horários dos trens retirados de planilhas de controle, utilizadas pelos assistentes de composição, e os dados relacionados aos veículos utilizados, as rotas realizadas pelos veículos e os quilômetros percorridos retirados dos sistemas de GPS (*Global Positioning System)* instalados nos veículos.

A Instância 16 foi criada utilizando os mesmos números de requisições, locais de origem e destino dos maquinistas e horário de chegada dos trens que o caso real. O limite de espera para o maquinista iniciando escala, limite de espera para o maquinista fim de escala, limite máximo para embarque do maquinista encerrando escala e tempo máximo de percurso foram mantidos conforme as restrições operacionais descrita na definição do problemas, e que refletem os objetivos buscados diariamente pelos assistentes de composição da EFVM ao realizarem o planejamento manual do transporte de maquinistas.

O resultado do modelo matemático proposto será comparado com o planejamento real da troca de maquinistas realizado pelos planejadores da EFVM no destacamento em estudo.

5. MODELO MATEMATICO PROPOSTO

O modelo matemático proposto para solucionar o problema de planejamento do transporte de maquinistas é baseado no modelo DARP. Para o modelo matemático proposto a seguir, considerou-se duas situações: 1) maquinista iniciando escala e 2) maquinista encerrando escala. Para o maquinista iniciando escala, o ponto de início da viagem no veículo é o ponto de descanso do maquinista e o ponto de fim da viagem é o ponto de troca do maquinista. Para os maquinistas que estão encerrando escala, o ponto de início de viagem no veículo é o ponto de troca de maquinista e o ponto de fim da viagem é o ponto de descanso do maquinista. Considerando nr o número de requisições de transporte e nv o número de veículos da frota, lista-se a seguir os conjuntos do modelo matemático proposto.

NP	Conjunto dos nós de embarque, $NP = \{1, \ldots, nr\}$
ND	Conjunto dos nós de desembarque, $ND = \{nr + 1, \ldots, 2nr\}$
NPD	Conjunto dos nós de embarque e desembarque, $NPD = \{1, \ldots, 2nr\}$
N	Conjunto de todos os nós do grafo, $N = \{0\} \cup NP \cup ND \cup \{2nr + 1\}$
$N0$	Conjunto dos nós de garagem, embarque e desembarque, $N0 = \{0\} \cup NP \cup ND$
$N1$	Conjunto dos nós de embarque, desembarque e garagem virtual, $N1 = NP \cup ND \cup \{2nr + 1\}$
K	Conjunto dos veículos da frota, $K = \{1 \ldots nv\}$

Os parâmetros considerados no modelo proposto são apresentados a seguir. Como parâmetros gerais, têm-se:

tp	Tempo máximo de percurso padrão
tpe	Tempo máximo de percurso para ponto extremo
li	Limite de espera para o maquinista que inicia a escala de trabalho
le	Limite de espera para o maquinista que encerra a escala de trabalho
lm	Limite máximo de espera para o maquinista que encerra a escala de trabalho
M	Parâmetro de valor muito grande para a lógica do modelo, $M = 9999$

Cada veículo $k \in K$ possui os parâmetros:

o^k	Ocupação máxima em número de assentos
v^k	Velocidade média
cv^k	Custo de utilização
cq^k	Custo por quilômetro percorrido

Cada nó $i \in N$ tem os parâmetros a seguir:

$d_{i,j}$	Distância entre os nós $i,j \in N$
a_i	Parâmetro de apoio que assume o valor 1 caso seja um nó de embarque e -1 caso seja um nó de desembarque
b_i	Horário de chegada do trem que o maquinista da requisição i deverá iniciar ou terminar sua escala
ts_i	Tempo de embarque ou desembarque do maquinista no nó $i \in N$
s_i	Valor da hora improdutiva de cada maquinista
pe_i	Parâmetro que assume valor 1 quando o nó da requisição i está localizado no ponto extremo e 0 caso contrário
e_i	Parâmetro que assume valor 1 quando o maquinista da requisição i está iniciando a escala de trabalho e 0 quando está terminando escala

Cada requisição de transporte $n\ (i,j)$, $i,j \in NPD$, especifica um local *i* de embarque e um local $j = i + nr$ de desembarque. Os locais de embarque e desembarque são constituídos pelos pontos de troca de equipes e locais de descanso dos maquinistas.

Para cada caminho possível entre nós, representado por um arco (i,j), tem-se uma distância $d_{i,j}$ entre os locais i e j. Caso um ponto de embarque ou desembarque possua mais de um passageiro, cada passageiro será representado por um novo nó com distância $d_{i,j}$ nula, entre eles.

O parâmetro ts_i representa o tempo de serviço no nó i, que é o tempo de o maquinista entrar e sair do carro. No modelo matemático o tempo de serviço pode variar conforme a necessidade a individual do passageiro atendido.

As variáveis de decisão do modelo matemático são:

$x_{i,j}^{k}$ Variável binária que assume valor igual a 1 caso o veículo $k \in K$ viaje do nó i para o nó j, $i,j \in N$. caso contrário igual a 0

t_i^k Instante em que o veículo $k \in K$ começa a atender o nó $i \in N$

y_i^k Variável utilizada para linearização do termo $t_i^k \, x_{i,j}^k$. Caso o veículo k atenda o nó i, y_i^k representa o instante em que o veículo $k \in K$ começa a atender o nó $i \in N$. Caso contrário, y_i^k será igual a 0

q_i^k Número de assentos ocupados após o veículo $k \in K$ visitar o $nó\ i \in N$

h_i Total de horas improdutivas gerada pelo maquinista i

Com base nas definições anteriores serão apresentadas a seguir a Função Objetivo e as restrições do modelo proposto.

Função Objetivo

$$Minimizar \sum_{i \in N} s_i \, h_i + \sum_{k \in K} \sum_{j \in NP} cv^k x_{0,j}^k + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} cq^k \, d_{i,j} \, x_{i,j}^k \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in NP} x_{0,j}^k \geq 1 \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in NP} x_{0,j}^k \leq nv \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{i,j}^k = 1 \qquad \forall\, i \in NP \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{i,j}^k - \sum_{j \in N} x_{i+nr,j}^k = 0 \qquad \forall\, i \in NP, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j \in NP} x_{0,j}^k \leq 1 \qquad \forall\, k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in ND} x_{0,j}^k = 0 \qquad \forall\, k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in ND} x_{i,2nr+1}^{k} \leq 1 \qquad \forall\, k \in K \qquad (8)$$

$$\sum_{j \in N | i \neq j} x_{j,i}^{k} - \sum_{j \in N | i \neq j} x_{i,j}^{k} = 0 \qquad \forall\, i \in NPD, k \in K \qquad (9)$$

$$q_j^k \geq q_i^k + a_j\, x_{i,j}^k - M(1 - x_{i,j}^k) \qquad \forall\, k \in K,\, i \in N0, j \in N1 \qquad (10)$$

$$q_i^k \leq o^k \sum_{j \in N} x_{i,j}^k \qquad \forall\, k \in K, i \in N \qquad (11)$$

$$q_0^k = 0 \qquad \forall\, k \in K \qquad (12)$$

$$q_{2nr+1}^k = 0 \qquad \forall\, k \in K \qquad (13)$$

$$t_j^k \geq t_i^k + (ts_i + \frac{d_{i,j}}{v^k})\, x_{i,j}^k - M(1 - x_{i,j}^k) \qquad \forall\, k \in K,\, i \in N0, j \in N1 \qquad (14)$$

$$x_{i,i}^k = 0 \qquad \forall\, k \in K, i \in N \qquad (15)$$

$$t_{i+nr}^k - t_i^k \leq tp \qquad \forall\, k \in K, i \in NP | pe_i = 0 \qquad (16)$$

$$t_{i+nr}^k - t_i^k \leq tpe \qquad \forall\, k \in K, i \in NP | pe_i \neq 0 \qquad (17)$$

$$t_i^k \geq b_i \sum_{j \in N} x_{i,j}^k \qquad \forall\, k \in K, i \in NP | e_i = 0 \qquad (18)$$

$$t_i^k \leq (b_i + lm) \sum_{j \in N} x_{i,j}^k \qquad \forall\, k \in K, i \in NP | e_i = 0 \qquad (19)$$

$$t_i^k \geq (b_i + ts_i + \frac{d_{i-nr,i}}{v^k}) \sum_{j \in N} x_{i,j}^k \qquad \forall\, k \in K, i \in ND| \; e_i = 0 \qquad (20)$$

$$t_i^k \leq b_i \sum_{j \in N} x_{i,j}^k \qquad \forall\, k \in K, i \in ND| \; e_i = 1 \qquad (21)$$

$$t_i^k \geq (b_i - tp) \sum_{j \in N} x_{i,j}^k \qquad \forall\, k \in K, i \in NP| \; e_i = 1 \qquad (22)$$

$$t_i^k \geq (b_i - tpe) \sum_{j \in N} x_{i,j}^k \qquad \forall\, k \in K, i \in NP| \; e_i = 1 \qquad (23)$$

$$t_i^k \leq (b_i - ts_i - \frac{d_{i,i+n}}{v^k}) \sum_{j \in N} x_{i,j}^k \qquad \forall\, k \ \in K, i \in NP| \; e_i = 1 \qquad (24)$$

$$t_0^k \leq b_0 \qquad \forall\, k \ \in K \qquad (25)$$

$$t_{2nr+1}^k \leq b_{2nr+1} \qquad \forall\, k \in K \qquad (26)$$

$$t_i^k \leq \ ti_{i+nr}^k \qquad \forall\, k \in K, i \in NP \qquad (27)$$

$$x_{j,0}^k = 0 \qquad \forall\, k \in K, j \in N \qquad (28)$$

$$x_{2nr+1,j}^k = 0 \qquad \forall\, k \in K, j \in N \qquad (29)$$

$$h_i = 0 \qquad \forall\, k \in K, i \in \mathrm{NP}| e_i = 1 \qquad (30)$$

$$h_i = 0 \qquad \forall\, k \in K, i \in \mathrm{ND}| e_i = 0 \qquad (31)$$

$$h_i \geq ((b_i - li)\sum_{j \in N} x_{i,j}^k) - t_i^k \, x_{i,j}^k \qquad \forall\, k \in K, i \in ND | e_i = 1 \qquad (32)$$

$$h_i \geq t_i^k \sum_{j \in N} x_{i,j}^k - ((b_i + ts_i + le)\sum_{j \in N} x_{i,j}^k) \qquad \forall\, k \in K, i \in NP | e_i = 0 \qquad (33)$$

$$q_i^k \in \mathbb{Z}^+ \qquad \forall\, k \in K,\, i \in N \qquad (34)$$

$$t_i^k \in \mathbb{R}^+ \qquad \forall\, k \in K, i \in N \qquad (35)$$

$$h_i \in \mathbb{R}^+ \qquad \forall\, i \in NPD \qquad (36)$$

$$x_{i,j}^k \in \{0,1\} \qquad \forall\, k \in K, i \in N, j \in N \qquad (37)$$

A função objetivo, Equação (1) do modelo proposto, representa o custo relacionado a geração de horas improdutivas mais o custo de transporte, relacionado ao número de veículos e custo por quilômetro percorrido por todos veículos. A função objetivo deve ser minimizada.

As restrições (2) e (3) determinam que deve ser utilizado pelo menos um veículo e no máximo nv veículos (o número máximo de veículos da frota). As restrições (4) garantem que todas as requisições são atendidas. As restrições (5) asseguram que o mesmo veículo faça o embarque e desembarque do maquinista de uma certa requisição. As Restrições (6) a (7) garantem que cada veículo inicie a rota em um nó de embarque ou não seja utilizado. As restrições (8) asseguram que cada veículo utilizado só pode retornar para a garagem virtual a partir de um nó de desembarque. As restrições (9) são as restrições de continuidade de fluxo. As restrições (10) a (11) calculam a ocupação dos veículos e garantem que a capacidade do veículo seja respeitada. As restrições (12) e (13) asseguram que os veículos iniciem e terminem a rota sem maquinistas.

As restrições (14) calculam o instante em que o veículo chega no nó j, considerando o instante em que o veículo chega no nó i, o tempo de serviço no nó i e o tempo de percurso do nó i para o nó j. As restrições (15) garantem que um veículo não pode realizar um percurso de um nó para este mesmo nó. As restrições (16) asseguram que o tempo máximo de percurso padrão não seja excedido. As restrições (17) asseguram que o tempo máximo de percurso para ponto extremo (mina de Bicas) não seja excedido.

As restrições (18) e (19) asseguram, para aqueles que encerram a escala, que o veículo chegue ao ponto de troca dentro do intervalo de tempo entre a chegada do trem até o limite máximo de espera para o embarque do maquinista no veículo. As restrições (20) asseguram, para aqueles que encerram a escala, que o instante de chegada no ponto de descanso deve ser igual ou maior que o horário de chegada do trem mais o tempo de embarque no veículo mais o tempo de percurso até o ponto de descanso.

As restrições (21) asseguram, para aqueles que iniciam a escala, que o tempo de chegada no ponto de troca seja inferior ou igual ao instante de chegada do trem. As restrições (22) e (23) asseguram, para aqueles que iniciam a escala, que o instante do maquinista entrar no veículo no ponto de descanso para iniciar a viagem até o ponto de troca, deve ser maior ou igual ao instante de chegada do trem menos o tempo de percurso padrão ou tempo de percurso para o ponto extremo. As restrições (24) asseguram, para aqueles que iniciam a escala, que o instante do maquinista entrar no veículo no ponto de descanso para iniciar a viagem até o ponto de troca, deve ser menor ou igual ao instante de chegada do trem menos o tempo de embarcar no veículo menos o tempo de viagem entre o ponto de embarque até o ponto de troca.

As restrições (25) e (26) garantem que o veículo saia da garagem dentro de um limite máximo estabelecido de início de rota e terminem a viagem dentro de um limite máximo estabelecido de fim de rota. As restrições (27) garantem que o instante de embarque do maquinista seja menor que o instante de desembarque do mesmo maquinista. As restrições (28) garantem que nenhum veículo retorne para a garagem e as restrições (29) garantem que nenhum veículo possa sair da garagem virtual.

As restrições (30) asseguram que, para o maquinista que está iniciando a escala, a hora improdutiva seja 0 no embarque e as restrições (31) asseguram que, para o maquinista que está encerrando a escala, a hora improdutiva seja 0 no desembarque.

As restrições (32) calculam, para o maquinista que está iniciando a escala, a hora improdutiva como sendo: o instante de chegada do trem menos o limite de espera no início da escala menos o instante que o maquinista chegou no ponto de troca. As restrições (33) calculam, para o maquinista que está encerrando a escala, a hora improdutiva como sendo: o instante que o maquinista embarcou no veículo menos o instante de chegada do trem, menos o tempo de o maquinista embarcar no veículo, menos o limite de espera no término da escala. As restrições (34) a (37) definem o domínio das variáveis de decisão.

Nas restrições (32) e (33), o termo $t_i^k \sum_{j \in N} x_{i,j}^k$ é não linear e, para lineariza-lo são propostas as restrições (38) a (41) e uma nova variável de decisão y_i^k.

$$y_i^k \leq b_{2nr+1} \sum_{j \in N} x_{i,j}^k \qquad \forall\, k \in K, i \in NPD \qquad (38)$$

$$y_i^k \leq ti_i^k \qquad \forall\, k \in K, i \in NPD \qquad (39)$$

$$y_i^k \geq ti_i^k - b_{2nr+1}\,(1 - \sum_{j \in N} x_{i,j}^k) \qquad \forall\, k \in K, i \in NPD \qquad (40)$$

$$y_i^k \in \mathbb{R}^+ \qquad \forall\, k \in K, i \in NPD \qquad (41)$$

Assim, o modelo linearizado é composto pelas equações (1)-(31) e (34)-(41) e pela variável de decisão y_i^k. As restrições (32) e (33) são substituídas pelas restrições (42) e (43).

$$h_i \geq ((b_i - li) \sum_{j \in N} x_{i,j}^k) - y_i^k \qquad \forall\, k \in K, i \in ND | e_i = 1 \qquad (42)$$

$$h_i \geq \left(y_i^k - ((b_i + ts_i + le) \sum_{j \in N} x_{i,j}^k)) \right) \qquad \forall\, k \in K, i \in NP | e_i = 0 \qquad (43)$$

6. RESULTADOS E ANÁLISES

Os testes computacionais foram realizados com o *solver* IBM® ILOG® CPLEX® Versão 12.6 em um computador com processador Intel *i7* com 64 GB de memória RAM. O tempo limite para execução do CPLEX foi de 86.400 segundos, equivalente a 24 horas.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados separados por grupos e suas respectivas instâncias. Na terceira coluna pode ser observado o Tempo de Execução do modelo matemático para obtenção do resultado. A quarta coluna apresenta o resultado obtido pelo CPLEX para a Função Objetivo, que assume valor igual ao *Upper bound quando* o CPLEX não consegue encontrar a solução ótima dentro do tempo limite de execução. E por fim o GAP pode ser observado na sexta coluna, que é calculado como sendo $GAP = ((UB - LB)/UB)\,100)$, UB representa o *Upper bound*, e LB representa o *Lower bound*, quinta coluna. O resultado de cada uma dessas instâncias será discutido a seguir.

Tabela 3: Resultados Encontrados pelo CPLEX

Grupo	Instância	Tempo de Execução (s)	Função Objetivo (R$)	Lower bound (R$)	GAP (%)
A	1	3,70	2.581,35	2.581,35	0,00
	2	4.362,80	1.842,15	1.842,15	0,00
	3	5.874,47	1.900,35	1.900,35	0,00
	4	61.931,61	1.911,16	1.911,16	0,00
	5	86.400,00	1.932,89	1.910,85	1,14
	6	86.400,00	1.950,94	1.924,98	1,33
	7	86.400,00	3.121,46	1.139,16	63,51
	8	86.400,00	-	760,60	-
	9	86.400,00	-	694,18	-
B	10	61.931,61	1.911,16	-	0,00
	11	86.400,00	1.900,52	1.889,03	1,74
	12	86.400,00	1.892,62	1.857,34	1,86
	13	86.400,00	1.932,89	1.910,85	1,14
	14	86.400,00	1.926,99	1.903,60	1,21
	15	86.400,00	1.925,89	1.895,74	1,57
C	16	86.400,00	2.542,50	1.235,17	51,42

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1. Resultados e Análises – Grupo A

Conforme descrito no Capítulo 4, as instâncias do Grupo A consideram características reais e foram criadas para avaliar o desempenho do CPLEX executando o modelo matemático proposto. Assim sendo, pode-se observar na Tabela 3 que foram encontradas soluções ótimas para as Instâncias de 1 a 4 que variaram o número de requisições entre 10 e 20, ao contrário das Instâncias 5 a 7 que variaram o número de requisições de 22 a 26 e apresentaram soluções com GAP variando entre 1,14% a 63,51%. Já para as Instâncias 8 e 9, com 28 e 30 requisições respectivamente, o CPLEX não encontrou solução, apenas o *Lower bound*. Pôde-se observar que ao aumentar gradativamente o número de requisições das instâncias o tempo de

processamento para tentar encontrar uma solução ótima aumentou significativamente, isso ocorre pelo aumento do número de variáveis resultando em soluções com GAP apresentados na Tabela 3. Contudo, é possível constatar que o modelo apresentou soluções ótimas para as Instâncias com até 20 requisições para um tempo de processamento de 86.400 segundos, equivalente a 24 horas.

Analisando o grupo B, para as instâncias com 20 requisições foi encontrado solução ótima para a Instância 10 que equivale a Instância 4 e reflete as características reais do destacamento em estudo, já as Instâncias 11 e 12 em que aumentou-se os limites início de escala e limite fim de escala foram encontradas soluções com GAP, 1,74% e 1,86% respectivamente, para um tempo de processamento de 86.400 segundos, equivalente a 24 horas.

Ainda sobre o grupo B, para as instâncias com 22 requisições não foram encontradas soluções ótimas. A solução para a Instância 13 que equivale a Instância 5 e reflete as características reais do destacamento em estudo obteve GAP de 1,14%, já as Instâncias 14 e 15 em que aumentou-se os limites início de escala e limite fim de escala foram encontradas soluções com GAP, 1,21% e 1,57% respectivamente, para um tempo de processamento de 86.400 segundos, equivalente a 24 horas.

Sobre o grupo C, para a Instância 16 com 24 requisições foi encontrada uma solução com GAP de 51,42% para um tempo de processamento de 86.400 segundos, equivalente a 24 horas. Observa-se na Tabela 3 que o GAP da solução encontrada para a Instância 16 foi mais alto que o GAP da solução encontrada para a Instância 6, mesmo a Instância 16 possuindo o mesmo número de requisições que a Instância 6, o que pode ser explicado pelo fato de o tempo de rota utilizado para o grupo C ter sido de 6 horas enquanto que para os grupos A e B foi de 12 horas, ou seja para atender 24 requisições a Instância 16 teve 50% de tempo a menos que a Instância 6 para realizar a rota.

6.2. Resultados e Análises – Grupo B

De acordo com o Capítulo 4, o Grupo B com as Instâncias 10 a 15 buscou avaliar o ganho em relação ao transporte e a geração de horas improdutivas quando aumenta-se o limite início de escala, limite fim de escala e o limite máximo de embarque. Neste caso, as Instâncias 10 e 13 mantiveram as características reais do destacamento em estudo, considerando o limite início de escala igual a 0,25 horas, o limite fim de escala igual a 0,17 horas e o limite máximo para embarque igual a 0,25 horas. Para as Instâncias 11 e 14, aumentou-se o limite início de escala para 0,33 horas, o limite fim de escala para 0,25 horas e o limite máximo para embarque para 0,5 horas, e para as Instâncias 12 e 15 aumentou-se o limite início de escala para 0,42 horas, o limite fim de escala para 0,33 horas e o limite máximo para embarque para 0,5 horas.

A partir dessas instâncias obteve-se os resultados para o Grupo B, demostrados na Tabela 4, que apresenta para cada instância a quantidade de Hora improdutiva gerada, terceira coluna, e o Número de veículos utilizados, quarta coluna. Os tipos de veículos utilizados na rota são apresentados na quinta coluna e são diferenciados por veículo leve (VL) e veículo van (VV). Assim como, na sexta coluna os Quilômetros percorridos por cada tipo de veículo, na sétima coluna os Quilômetros percorridos totais, e o Custo desses Quilômetros percorridos na última coluna.

Tabela 4: Resultados Encontrados pelo CPLEX para o Grupo B

Grupo	Instância	Hora improdutiva (h)	Número de veículos	Tipo de veículo	Quilômetros percorridos (km)	Quilômetros percorridos totais (km)	Custo dos quilômetros percorridos totais (R$)
B	10	0,443	3	1 VL	233,8	514,3	127,63
				2 VV	280,5		
	11	0,203	3	1 VL	281,4	537,1	126,59
				2 VV	255,7		
	12	0,005	3	1 VL	281,4	537,1	126,59
				2 VV	255,7		
	13	0,175	3	2 VL	393,9	494,6	92,31
				1 VV	100,7		
	14	0,028	3	2 VL	393,9	494,6	92,31
				1 VV	100,7		
	15	0,000	3	2 VL	393,9	494,6	92,31
				1 VV	100,7		

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Tabela 3, foi encontrada a solução ótima para a Instância 10. Para as outras, foram encontradas soluções com gaps menores que 1,86%, em um tempo de execução de 24 horas.

Pode-se observar na Tabela 3 que, mesmo obtendo soluções com GAP neste conjunto de instâncias, com o aumento do limite início de escala, o limite fim de escala e o limite máximo para embarque, houve a redução dos valores da função objetivo tanto em relação a Instância 10 para a 12 quanto em relação a Instância 13 para a 15, mostrando que diante de um cenário mais flexível há uma tendência de diminuição dos custos de transporte.

Com relação a geração de horas improdutivas, pode-se observar na Tabela 4 que houve redução quando comparada a Instância 10, que possui limite início de escala, limite fim de escala e limite máximo para embarque reais, com as Instâncias 11 e 12

que possuem limite início de escala e limite fim de escala acrescidos de 5 e 10 minutos, respectivamente, e limite máximo para embarque acrescido de 15 minutos em ambos os casos. Comparando a Instância 10 com a Instância 12, houve redução na quantidade de hora improdutiva gerada, aproximadamente meia hora. A quantidade de hora improdutiva gerada na Instância 13 também foi menor que a quantidade de horas improdutivas geradas nas Instâncias 14 e 15, que possuem o limite início de escala e limite fim de escala acrescidos de 5 e 10 minutos, respectivamente. Entre as Instâncias 13 e 15 a redução na quantidade de hora improdutiva gerada foi de 0,175 horas. Esta redução na quantidade de Hora improdutiva era esperada já que se aumentou os limites de espera em que não há geração de Horas improdutivas, deixando o cenário mais flexível e favorável a resultados melhores.

Em relação aos custos com o transporte, pode-se observar na Tabela 4 que a quantidade e tipo de veículos utilizados foram os mesmos, tanto para as Instâncias 10 a 12, quanto para as Instâncias 13 a 15, sinalizando que mesmo diante de um cenário mais flexível e favorável não houve redução dos custos relacionados a utilização do veículo.

Ao analisar os custos relacionados aos quilômetros percorridos, observou-se ao comparar a Instância 10 com as Instâncias 11 e 12, uma redução no custo de aproximadamente R$1,04, e ao comparar as Instâncias 11 e 12 os custos permaneceram iguais. Ao analisar a Instância 13 em relação as Instâncias 14 e 15 nota-se que, para este conjunto de instâncias, os custos relacionados aos quilômetros percorridos permaneceram iguais. Sinalizando que devido à redução na geração de horas improdutivas para ambos os conjuntos de instâncias, o melhor cenário para redução dos custos foi o calculado nas Instâncias 12 e 15, que consideraram o limite início escala e limite fim escala acrescidos de 10 minutos em relação a Instância 10 e 13, que consideram os limites reais.

Entende-se a partir das análises anteriores que, o aumento no limite inicio de escala, limite fim de escala e limite máximo para embarque não influenciam nos custos do transporte de maquinistas, tanto referentes a utilização do veículo quanto referentes aos quilômetros percorridos. Porém influenciam na redução dos custos relacionados a geração de horas improdutivas.

6.3. Resultados e Análises – Grupo C

O Grupo C, com a Instância 16, foi criado para testar o modelo matemático proposto como uma ferramenta de auxílio à decisão para o planejamento do transporte de maquinistas para a troca de equipe das locomotivas. Neste caso, a Instância 16 manteve as características reais do destacamento em estudo, considerando os mesmos números de requisições, locais de origem e destino dos maquinistas e horário de chegada dos trens, o limite início escala, limite fim de escala, limite máximo para embarque e tempo máximo de percurso foram mantidos conforme as restrições operacionais descrita na definição do problema, apresentada no Capítulo 4.

Os resultados da Instância 16 e para o Caso Real são demonstrados na Tabela 5, que apresenta na segunda coluna a quantidade de Hora improdutiva gerada, na terceira e quarta coluna o Número e o Tipo de veículos utilizados respectivamente. Assim como, na sexta coluna os Quilômetros percorridos por tipo de veículo, na sétima coluna os Quilômetros percorridos totais, e o Custo desses Quilômetros percorridos na última coluna.

Tabela 5: Resultados encontrados pelo CPLEX para o Grupo C e para o Caso Real

Instância	Hora improdutiva (h)	Número de veículos	Tipo de veículo	Quilômetros percorridos (km)	Quilômetros percorridos totais (km)	Custo dos quilômetros percorridos totais (R$)
16	0,000	4	3 veíc. leve	442,8	484,5	80,18
			1 Van	41,7		
Caso Real	0,850	4	3 veíc. leve	433,0	523,0	94,65
			1 Van	90,0		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme pode ser observado na Tabela 5, a Instância 16 realizou o planejamento do transporte de maquinistas a um custo menor de transporte e horas improdutivas que o planejamento do Caso Real. Em relação ao custo com o transporte pode-se observar que houve redução relacionada ao custo por quilômetro percorrido. Para a Instância 16, o modelo além de reduzir o total de quilômetros percorridos, também maximizou a utilização dos veículos leves, fazendo com que a Van percorresse menos

quilômetros quando comparada a quilometragem percorrida no caso real, já que o custo do quilômetro percorrido da Van é maior que o custo do quilômetro percorrido do veículo leve. O custo referente a utilização do veículo manteve-se constante, pois nos dois casos utilizou-se a mesma frota de veículos. Vale ressaltar que a solução obtida na Instância 16 possui um GAP de 51,42% e que, mesmo assim, houve ganho em relação ao planejamento do Caso Real com potencial de redução de custo maior caso o gap possa ser reduzido.

Estas instâncias, 16 e Real, consideraram um intervalo de tempo correspondente a seis horas de trabalho da grade de programação de troca de maquinistas das locomotivas. Desta forma, comparando os resultados da Instância 16 com a programação real e analisando a redução dos custos em ambito percentual, percebe-se que em relação a geração de Horas improdutivas houve uma redução de 100%, enquanto o custo com transporte relacionados aos Quilometros percorridos totais foi reduzido em 15,28%. Quando comparado os Quilômetros percorridos totais o ganho foi de 7,36%, com base em estimativas reais de quilômetros percorridos fornecidos pela EVFM é possível estimar que esta redução no total de quilometros percorridos pode atingir um ganho real de aproximadamente 16.000 quilômetros rodados por mês no destacamento em estudo, com ganho potencial anual de aproximadamente 192.000 quilômetros percorridos.

A Tabela 6 mostra quais foram as direferenças entre o planejamento de transporte realizado com o resultado da Instância 16 e o Caso Real. Para as 24 requisições de transporte é possível verificar, na segunda coluna, quantos maquinistas iniciaram a escala e, na terceira coluna, quantos chegaram ao ponto de troca dentro do limite início escala. Na quarta coluna têm-se quantos maquinistas finalizaram a escala e, na quinta coluna, quantos sairam do ponto de troca dentro do limite fim de escala. A sexta coluna informa quantos maquinistas chegaram ao ponto de troca após a hora do trem.

Tabela 6: Informações do Planejamento Calculado pelo CPLEX e do Caso Real

Instâncias	Quantidade de Maquinistas				
	Início de escala	**limite início escala**	**fim de escala**	**limite fim escala**	**Chegaram após hora do trem**
16	16	16	8	8	0
Caso Real	16	11	8	4	5

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Tabela 6, em relação as horas improdutivas, é possivel constatar para o Caso Real que, de oito maquinistas fim de escala, o transporte buscou quatro deles após o limite fim de escala, enquanto na Instância 16 o limite fim de escala foi respeitado para todas as requisições. Analisando as dezesseis requisições de maquinistas inicio escala na Instância 16 todos os maquinistas chegaram ao ponto de troca respeitando o limite início de escala, já no Caso Real percebe-se que onze requisições foram atendidas respeitando os limites início escala e cinco chegaram após a hora do trem. Salienta-se que a possibilidade de chegar após a hora do trem não ocorre no planejamento calculado a partir do modelo matematico proposto, tendo em vista que foi considerado como uma das restrições do problema o horário limite para a chegada do maquinista no ponto de troca ser o horário do trem.

Desta forma, apesar de não ser objetivo, neste trabalho, quantificar os impactos gerados por esses atrasos, entende-se que eles acarretam custos com horas extras a serem pagas aos maquinistas que aguardam para trocar com aqueles que atrasaram, custo com horas improdutivas dos maquinistas que chegaram atrasados ao ponto de troca por responsabilidade do transporte, assim como a necessidade de replanejamento das escalas dos maquinistas diante destas mudanças de horários. Desta maneira é possível dizer que o modelo matemático contribui também por não permitir que haja estes atrasos.

6.4. Análise Geral dos Resultados

Diante dos resultados discutidos nas análises de resultados dos Grupos A, B e C é possível constatar que o modelo matemático proposto contribui para um planejamento de transporte para troca de maquinistas das locomotivas dos trens, reduzindo os

custos de transporte e horas improdutivas, além de garantir que os maquinistas cheguem aos pontos de troca antes da hora do trem.

Foi possível observar também, que os aumentos do limite início escala e do limite fim escala não influenciam na redução do custo do transporte, e que é possível atender a estes limites gerando uma quantidade menor de horas improdutivas ou até sem gerar horas improdutivas, como constatado na Instância 16. Desta maneira é possível afirmar que os requisitos operacionais relacionados ao limite início escala e do limite fim escala utilizados pela EFVM são coerentes, e podem ser atendidos a menores custos com o transporte e horas improdutivas, desde que o planejamento para o transporte de maquinistas para a troca não seja realizado de forma empírica.

7. CONCLUSÕES

Essa dissertação tratou o problema de planejamento do transporte de maquinistas para a troca nas locomotivas dos trens nos pontos de troca, com o objetivo de reduzir a geração de horas improdutivas dos maquinistas e o custo para transporta-los. Para resolver tal problema, foi proposto um modelo matemático baseado no DARP.

Por meio da revisão bibliográfica realizada, não foi encontrada publicação que levasse em consideração o planejamento para o transporte de maquinistas para a troca de equipes das locomotivas dos trens. Além disso, não foi encontrada a aplicação do DARP com a finalidade de atender esta necessidade que compõe a operação ferroviária.

O modelo matemático proposto mostrou-se adequado para a minimização das horas improdutivas e dos custos de transporte e, além disso, revelou-se uma ferramenta útil para melhorar o planejamento do transporte de maquinistas.

Somado a isso, o modelo matemático proposto mostrou-se, ainda, adequado ao planejamento do caso real, obtendo resultados melhores ao alcançado pelo destacamento estudado.

7.1 Trabalhos Futuros

Propõe-se como uma possível continuação da pesquisa a elaboração de uma meta-heurística para o modelo proposto a fim de que instâncias com maior número de requisições possam ser resolvidas, além de reduzir o tempo de execução para encontrar a solução.

8. REFERÊNCIAS

ANTF. Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários. Informações gerais. Disponível em: <http://www2.antf.org.br/informacoes-gerais/>. Acesso em: 20 de abril. 2018.

ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Informações Gerais. Disponível em: < http://www.antt.gov.br/ferrovias/index.html>. Acesso em 20 de abril de 2018.

ATTANASIO, A.; CORDEAU, J.-F.; GHIANI, G.; LAPORTE, G. Parallel tabu search heuristics for the dynamic multi-vehicle dial-a-ride problem. Parallel Comput., Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 30, n. 3, p. 377–387, mar. 2004.

BAUGH, J. W. J.; KAKIVAYA, D.; STONE, J. Intractability of the dial-a-ride problem and a multiobjective solution using simulated annealing. Engineering Optimization, v. 30, n. 2, p. 91–124, 1998.

BEAUDRY, A.; LAPORTE, G.; MELO, T.; NICKEL, S. Dynamic transportation of patients in hospitals. OR Spectrum, Springer-Verlag, v. 32, n. 1, p. 77–107, Jan 2010.

BERBEGLIA, G.; CORDEAU, J-F.; LAPORTE, G. Dynamic pickup and delivery problems. European Journal of Operational Research, v. 202, p. 8–15, 2010.

BERBEGLIA, G.; CORDEAU, J.-F.; LAPORTE, G. A hybrid tabu search and constraint programming algorithm for the dynamic dial-a-ride problem. INFORMS Journal on Computing, Institute for Operations Research and the Management Sciences, v. 24, n. 3, p. 343–355, 2012.

BODIN, L. D.; GOLDEN, B. L.; ASSAD, A. A.; BALL, M. O. Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. Computers & Operations Research, v. 10, n. 2, p. 63-211, 1983.

BODIN L. D.; SEXTON T. The multi-vehicle subscriber dial-a-ride problem. TIMS Studies in Management Science 2, p. 73–86, 1986.

BORNDÖRFER, R.; GROTSCHEL, M.; KLOSTERMEIER, F.; KUTTNER, C. Telebus Berlin: p. vehicle scheduling in a dial-a-ride system. In: Wilson, N. (Ed.), Computer-Aided Transit Scheduling. Economics and Mathematical Systems, Berlin, vol. 471, 391–422, 1997.

BRAEKERS, K.; KOVACS A. A. A multi-period dial-a-ride problem with driver consistency. Transportation Research Part B, v. 94, p. 355–377, Oct 2016.

BRAEKERS, K., RAMAEKERS, K., & VAN NIEUWENHUYSE, I. The vehicle routing problem: State of the art classification and review. Computers & Industrial Engineering, 99, 300-313, 2016.

CALVO, R. W. A new heuristic for the traveling salesman problem with time windows. Transportation Science, INFORMS, Institute for Operations Research and the

Management Sciences (INFORMS), Linthicum, Maryland, USA, v. 34, n. 1, p. 113–124, fev. 2000.

CALVO, R. W.; COLORNI, A. An effective and fast heuristic for the dial-a-ride problem. 4OR, Springer-Verlag, v. 5, n. 1, p. 61–73, Mar 2007.

CHEVRIER, R.; LIEFOOGHE, A.; JOURDAN, L.; DHAENENS, C. Solving a dial-a-ride problem with a hybrid evolutionary multi-objective approach: Application to demand responsive transport. Appl. Soft Comput., Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 12, n. 4, p. 1247–1258, abr. 2012.

CORDEAU, J.-F. A branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem. Operations Research, Institute for Operations Research and the Management Sciences, v. 54, n. 3, p. 573–586, May 2006.

CORDEAU, J.-F., LAPORTE, G. The Dial-a-Ride Problem (DARP): Variants, Modeling issues and algorithms. Quarterly Journal of the Belgian, French and Italian Operations Research Societies, 4OR, v. 1, p. 89–101, 2003.

CORDEAU, J.-F.; LAPORTE, G. A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem. Transportation Research Part B: Methodological, Elsevier, v. 37, n. 6, p. 579–594, Jul 2003. The dial-a-ride problem: models and algorithms. Annals of Operations Research, Springer-Verlag, v. 153, n. 1, p. 29–46, Jun 2007.

DESROSIERS, J.; DUMAS, Y. e SOUMIS, F. A dynamic programming solution of the largescale single-vehicle dial-a-ride problem with time windows. American Journal of Mathematical and Management Sciences, v. 6, n. 34, p. 301-325, 1986.

DETTI, P.; PAPALINI, F.; LARA G. Z. M. D. A multi-depot dial-a-ride problem with heterogeneous vehicles and compatibility constraints in healthcare. Omega, v. 70, p. 1–14, Aug 2016.

DIANA, M.; DESSOUKY, M. M. A new regret insertion heuristic for solving large-scale dial-a-ride problems with time windows. Transportation Research – Part B, n. 38, p. 539-557, 2004.

GARAIX, T.; ARTIGUES, C.; FEILLET, D.; JOSSELIN, D. Optimization of occupancy rate in dial-a-ride problems via linear fractional column generation. Computers & Operations Research, Elsevier, v. 38, n. 10, p. 1435–1442, Oct 2010.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

GoogleMaps, Em: <http://googlemaps.com>. Acesso em: 09 de abril, 2017.

HAIDEMANN, H. P. O Problema Dial-a-ride Estático: Estudo de Caso para o Transporte Escolar. São José dos Campos: [s.n.], 2005.

HAIDEMANN, H. P. O Problema Dial-a-ride Estático: Estudo de Caso para o Transporte Escolar. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-

Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia - Programação Matemática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

HÄME, L. An adaptive insertion algorithm for the single-vehicle dial-a-ride problem with narrow time windows. European Journal of Operational Research, Elsevier, v. 209, n. 1, p. 11–22, Feb 2011.

HEILPORN, G.; CORDEAU, J.-F.; LAPORTE, G. An integer l-shaped algorithm for the dial-a-ride problem with stochastic customer delays. Discrete Applied Mathematics, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, The Netherlands, The Netherlands, v. 159, n. 9, p. 883–895, jun. 2011.

HYYTIÄ, E.; AALTO, S.; PENTTINEN, A.; SULONEN, R. A stochastic model for a vehicle in a dial-a-ride system. Operations Research Letters, Elsevier, v. 38, n. 5, p. 432–435, Sep 2010.

IOACHIM, I.; DESROSIERS, J.; DUMAS, Y.; SOLOMON, M. M. A request clustering algorithm for door-to-door handicapped transportation. Transportation Science, v. 29, p. 63–78, 1995.

JAW, J.-J.; ODONI, A. R.; PSARAFTIS, H. N.; WILSON, N. H. A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows. Transportation Research Part B: Methodological, Elsevier, v. 20, n. 3, p. 243–257, Jun 1986.

JORGENSEN, R. M.; LARSEN, J.; BERGVINSDOTTIR, K. Solving the dial-a-ride problem using genetic algorithms. Journal of the Operational Research Society, v. 58, n. 10, p.1321–1331, 2007.

KARABUK, S. A nested decomposition approach for solving the paratransit vehicle scheduling problem. Transportation Research Part B: Methodological, Elsevier, v. 43, n. 4, p. 448–465, May 2008.

LIU, M.; LUO, Z.; LIM, A. A branch-and-cut algorithm for a realistic dial-a-ride problem. Transportation Research Part B, v. 81, p. 267–288, Jun 2015.

MADSEN, O. B. G.; RAVN, H. F.; RYGAARD, J. M. A heuristic algorithm for a dial-a-ride problem with time windows, multiple capacities, and multiple objectives. Annals of Operations Research, Springer-Verlag, v. 60, n. 1, p. 193–208, Dec 1995.

MAURI, G. R.; LORENA, L. A. N. Uma nova abordagem para o problema dial-a-ride. Produção, v. 19, n. 1, Apr 2009.

MASMOUDI, M. A.; BRAEKERS, K.; MASMOUDI, M.; DAMMAK, A. A hybrid Genetic Algorithm for the Heterogeneous Dial-A-Ride Problem. Computers and Operations Research, v. 81, p. 1–13, Dec 2016.

MASMOUDI, M. A.; Hosny, M.; BRAEKERS, K.; Dammaka A. Three effective metaheuristics to solve the multi-depot multi-trip heterogeneous dial-a-ride problem. Transportation Research Part E, v. 96, p. 60–80, Oct 2016.

MOLENBRUCH, Y.; BRAEKERS, K.; CARIS, A.; BERGHE G. V. Multi-directional local search for a bi-objective dial-a-ride problem in patient transportation. Computers & Operations Research, v. 77, p. 50–71, Jul 2016.

PARRAGH, S. N.; DOERNER, K. F.; HARTL, R. F. A survey on pickup and delivery problems Part II: Transportation between pickup and delivery locations. Journal für Betriebswirtschaft, v. 58, n. 2, p. 81-117, 2008.

PARRAGH, S. N.; DOERNER, K. F.; HARTL, R. F. Variable neighborhood search for the dial-a-ride problem. Computers & Operations Research, v. 37, p. 1129–1138, 2010.

PSARAFTIS, H. N. A dynamic programming approach to the single-vehicle, many-to-many immediate request dial-a-ride problem. Transportation Science, v. 14: 130–154, 1980.

PSARAFTIS, H. N. An exact algorithm for the single-vehicle many-to-many dial-a-ride problem with time windows. Transportation Science, v. 17, p. 351–357, 1983.

RODRIGUES, P. P.; ROSA, R. de A.; RESENDO, L. C. Proposta de um modelo matemático para o problema dial-a-ride aplicado ao transporte público de cadeirantes. Transportes, 2012.

RODRIGUES, P. P.; ROSA, R. de A.; RESENDO, L. C; MAURI, G. R.; RIBEIRO, G. M. Resolução de um caso real do problema dial-a-ride multicritério via clustering search. Production, 2014.

ROSA, Rodrigo et al. A mathematical model and a Clustering Search metaheuristic for planning the helicopter transportation of employees to the production platforms of oil and gas. Computers & Industrial Engineering, v. 101, p. 303-312, 2016.

SAVELSBERGH, M. W. P.; SOL, M. The general pickup and delivery problem. Transportation Science, Institute for Operations Research and the Management Sciences, v. 29, n. 1, p. 17–29, Feb 1995.

SEXTON T. The single vehicle many-to-many routing and scheduling problem. Ph.D. dissertation, SUNY at Stony Brook, 1979.

SEXTON T., BODIN L. D. Optimizing single vehicle many-to-many operations with desired delivery times: I. Scheduling. Transportation Science, v. 19, p. 378–410, 1985a.

_____. Optimizing single vehicle many-to-many operations with desired delivery times: II. Routing. Transportation Science, v. 19, p. 411–435, 1985b.

TANG, J.; KONG, Y.; LAU, H.; W.H. LP, A. A note on Efficient feasibility testing for dial-a-ride problems. Operations Research Letters, v. 38, p. 405-407, 2010.

TOTH, P.; VIGO, D. Heuristic algorithms for the handicapped persons transportation problem. Transportation Science, Institute for Operations Research and the Management Sciences, v. 31, n. 1, p. 60–71, Feb 1997.

VALE. Sistema de gestão Vale S.A. Maio, 2017a

_____. Sistema de gestão de equipagem Vale S.A. Maio, 2017b.

_____. Sobre a Vale. Notícias: Site institucional da Vale S.A.. Disponível em: < http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/trem-passageiros-estrada-ferro-vitoria-minas-tem-pagina-reformulada.aspx>. Acesso em: 31 maio 2017.

VERGARA, S. C. Métodos de pesquisa em administração. 1 ed. São Paulo: Editora Atlas, 2005.

WONG, K. I.; BELL, M. G. H. Solution of the dial-a-ride problem with multidimensional capacity constraints. International Transactions in Operational Research, Wiley Blackwell (Blackwell Publishing), v. 13, n. 3, p. 195–208, May 2006.

XIANG, Z.; CHU, C.; CHEN, H. A fast heuristic for solving a large-scale static dial-a-ride problem under complex constraints. European Journal of Operational Research, Elsevier, v. 174, n. 2, p. 1117–1139, Oct 2006.

ZIDI, I.; MESGHOUNI, K.; ZIDI, K.; GHEDIRA, K. A multi-objective simulated annealing for the multi-criteria dial a ride problem. Eng. Appl. Artif. Intell., Pergamon Press, Inc., Tarrytown, NY, USA, v. 25, n. 6, p. 1121–1131, set. 2012.