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

FRANCO COLLODETTI MAZIOLI

PLANEJAMENTO DA DESIGNAÇÃO DE MAQUINISTAS A TRENS DE VIAGEM DE LONGA DISTÂNCIA EM FERROVIAS DE TRANSPORTE DE CARGA

VITÓRIA
2019

FRANCO COLLODETTI MAZIOLI

PLANEJAMENTO DA DESIGNAÇÃO DE MAQUINISTAS A TRENS DE VIAGEM DE LONGA DISTÂNCIA EM FERROVIAS DE TRANSPORTE DE CARGA

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

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

VITÓRIA
2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

Mazioli, Franco Collodetti, 1993-
M475p Planejamento da designação de maquinistas a trens de viagem de longa distância em ferrovias de transporte de carga / Franco Collodetti Mazioli. - 2019.
57 f. : il.

Orientador: Rodrigo de Alvarenga Rosa.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Trabalhadores do transporte. 2. Trabalhadores do transporte. 3. Transporte ferroviário de carga. 4. Ferrovias. I. Rosa, Rodrigo de Alvarenga. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PLANEJAMENTO DA DESIGNAÇÃO DE MAQUINISTAS A TRENS DE VIAGEM DE LONGA DISTÂNCIA EM FERROVIAS DE TRANSPORTE DE CARGA

Franco Collodetti Mazioli

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

Aprovada no dia **28 de março de 2019** por:

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Doutor em Engenharia Elétrica
Orientador – UFES

Prof. Dr. Macksuel Soares de Azevedo
Doutor em Engenharia Eletrica
Examinador Interno – UFES

Prof. Dr. Glaydston Mattos Ribeiro
Doutor em Computação Aplicada
Examinador Externo - COPPE/UFRJ
Por meio de video conferência

Vitória – ES, março de 2019

AGRADECIMENTOS

As conquistas alcançadas com a torcida e apoio de pessoas queridas sempre são um estimulo para perseguimos novos objetivos. Aproveito para prestar meus sinceros agradecimentos a todos que fizeram parte dessa conquista. À Deus, por ter me guiado nessa jornada. Aos meus pais e irmão que sempre me incentivaram a alcançar meus objetivos e são minha inspiração. Aos demais familiares que sempre estiveram presentes na minha vida. Aos meus amigos, que foram pacientes e me ajudaram nessa vitória. E a todas as pessoas especiais que conheci ao longo desses anos e trouxeram seu brilho para minha jornada. Agradeço ao grupo do Laboratório de Modelagem Matemática e Meta-heurísticas Aplicadas à Engenharia de Produção (LAMMEP) pelo apoio. Por fim, a Rodrigo Rosa, por toda dedicação, apoio e confiança na elaboração deste trabalho. O meu muito obrigado a todos.

RESUMO

No Brasil, as ferrovias de transporte de cargas, usualmente, necessitam realizar viagens por longas distâncias para transportar cargas da origem até o destino. Os trens para poderem circular pela malha ferroviária demandam profissionais qualificados para os conduzirem. Esses profissionais, denominados maquinistas, são regidos por leis trabalhistas específicas que regulamentam a atividade e que devem ser respeitadas quando da elaboração das escalas de trabalho. Por conta da grande extensão das viagens dos trens com tempo total de duração, geralmente, superior à escala de trabalho dos maquinistas, faz-se necessário realizar a troca de maquinistas durante a viagem em locais pré-definidos, denominados destacamentos. As ferrovias são divididas em trechos intercalados por destacamentos, nos quais os maquinistas são lotados. Na literatura, o problema é tratado de forma separada por dois subproblemas*: Crew Scheduling* e *Crew Rostering*. Diferentemente, esta dissertação propõe um modelo matemático para resolver de forma integrada os dois subproblemas, inspirado no Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplas Viagens e Múltiplos Depósitos, para planejar a designação de maquinistas para conduzir os trens que passarão pelos destacamentos, buscando minimizar o custo com pagamento de maquinistas. Na ferrovia estudada, atualmente a programação de escalas de maquinistas é feita manualmente o que demanda muito tempo para elaboração do planejamento. Os resultados obtidos demonstram a efetividade no planejamento das designações dos maquinistas.

Palavras-chave: Designação de Maquinistas, Operação Ferroviária, Transporte Ferroviário.

ABSTRACT

In Brazil, freight railways usually need to travel over long distances to transport cargo from origin to destination. Trains that can circulate through the railway network require qualified professionals to conduct them. These professionals, called engine drivers, are ruled by specific labor laws that regulate the activity and must be respected when the work shift scales are elaborated. Because of the large extension of the trains travelling and the travelling time duration, generally, bigger than the engine driver work shift, it is necessary to be replaced the engine driver during the trains travelling at predefined locations, called detachments. Railways are divided into sections where there is a detachment, where the engine drivers stay available to drive and where the drivers replacing takes place. In the literature, the problem is treated separately by two sub-problems: Crew Scheduling and Crew Rostering. This master thesis proposes a mathematical model to solve the two sub-problems in an integrated way, inspired by the Vehicle Routing Problem with Multiple Trips and Multiple Depots, to plan the designation of engine drivers to drive the trains that will pass through the detachments, seeking to minimize the cost with engine drivers payment. The crew scheduling has been done manually by the studied railway, which demands a lot of time to be done. The results demonstrate the effectiveness in planning the designations of engine drivers.

Key-words: Crew Management, Railway Optimization; Railway Operation, Railway Transport.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases da metodologia de pesquisa.....13
Figura 2 - Destacamentos EFVM. 22
Figura 3 - Trecho atendido pelo maquinista. 23
Figura 4 - Trecho vai e volta atendido pelo maquinista. 23
Figura 5 - Sequência de escalas dos maquinistas. 24
Figura 6 - Esquema EFVM.....29
Figura 7 - Trechos possíveis de serem atendidos pelo maquinista.....30
Figura 8 - Esquema do modelo matemático proposto.....32
Figura 9 - Conjuntos do modelo matemático.....33
Figura 10 - Intervalos entre escalas. 35
Figura 11 - Esquema de solução da Instância 1. 44
Figura 12 - Esquema de solução da Instância 2. 47
Figura 13 - Esquema de solução da Instância 3. 48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados das instâncias de teste.....27
*Tabela 2 - Detalhes dos arquivos *.lp.....28*
Tabela 3 - Resultados CPLEX.....42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 9
1.1 OBJETIVOS 11
1.1.1 OBJETIVO GERAL 11
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 11
1.2 JUSTIFICATIVA 11
1.3 MÉTODO DE PESQUISA 12
1.4 ESTRUTURA DA PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO 13
2 REFERENCIAL TEÓRICO 15
3 PROBLEMA ESTUDADO E GERAÇÃO DAS INSTÂNCIAS DE TESTE 22
4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO 29
5 RESULTADOS E ANÁLISES 42
6 CONCLUSÕES 52
REFERÊNCIAS 54

1 INTRODUÇÃO

As ferrovias representam um ganho logístico para economia de todos os países. Manter um desempenho operacional adequado e eficiente de forma a minimizar os custos relacionados é de grande importância para o aumento da competitividade das empresas. Segundo dados da Confederação Nacional do Transporte – CNT, o transporte ferroviário brasileiro vem crescendo com o aumento da demanda por meios mais eficientes (CNT, 2017). De acordo com a CNT, as ferrovias brasileiras são responsáveis por mais de 20% das cargas transportadas no país (CNT, 2017).

No Brasil, no ano de 2017, as ferrovias movimentaram cerca de 538 milhões de toneladas úteis, representando um crescimento de 1,07% em relação ao ano de 2016, segundo dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT, (ANTT, 2018).

Nas ferrovias de transporte de cargas são formados trens para atender a demanda de transporte. Os trens são compostos por locomotivas (material de tração) e vagões (material rebocado). Para que eles possam circular pela ferrovia devem ser designados profissionais qualificados e treinados para operá-los (ROSA; RIBEIRO, 2016). Esses profissionais são os maquinistas, responsáveis por efetivamente conduzir os trens aplicando aceleração e freio, a fim de realizar a melhor operação, visando à economia de tempo e combustível. Além dessas, outras funções exercidas pelo maquinista são: manter comunicação constante com o Centro de Controle Operacional (CCO); executar pequenos reparos em locomotivas e vagões; zelar pela documentação do trem; treinar auxiliares de maquinista na condução do trem. (ROSA; RIBEIRO, 2016). Um dos maiores custos da operação ferroviária é o pagamento de salários e horas extras aos maquinistas.

As ferrovias brasileiras de transporte de cargas possuem grandes extensões e os tempos de viagem dos trens, desde sua origem até o seu destino são, via de regra, superior a jornada de trabalho do maquinista. Desta forma, faz-se necessário, na maioria das vezes, realizar a troca desses profissionais durante a viagem do trem.

Assim, as ferrovias são divididas em trechos intercalados por destacamentos onde um conjunto de maquinista é alocado para atender a demanda diária de condução de trens que passam ou se originam nesses locais. Cada maquinista realiza uma viagem por escala, conduzindo apenas um trem entre dois destacamentos

contíguos, sendo um deles sempre a sua sede. Por questões de segurança a troca de maquinistas ocorre sempre em um destacamento.

O problema de alocação de maquinistas a trens, no contexto explicado, deve considerar diversos condicionantes como limite de tempo de jornadas de trabalho, gerenciamento de horas extras e imposições legais da legislação trabalhista vigente.

Foi tomada como base para o desenvolvimento do modelo a operação da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM). No problema estudado nessa dissertação, os maquinistas trabalham em regime de escala, sendo cada uma com seis horas de duração. Durante um dia, diversos trens são programados para circular na ferrovia em horários distintos. A cada destacamento que o trem passa, deve se proceder a troca de maquinista. Assim, em um dia, com base nos trens programados e com os maquinistas disponíveis nas várias escalas e destacamentos, deve se proceder a designação de maquinistas aos trens programados de forma a reduzir o pagamento de horas e extras e, se viável, diminuir o número de maquinistas necessários para o planejamento, possibilitando reduzir os custos totais.

Na ferrovia estudada, o planejamento das escalas dos maquinistas é realizada de forma manual e, portanto, propostas de ferramentas de otimização que venham a apoiar essa etapa são importantes para diminuir o tempo de planejamento, bem como apresentar soluções apuradas reduzindo os custos com maquinistas.

É proposto um modelo que toma como base o Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplas Viagens e Múltiplos Depósitos (PRV-MD-MV) adaptado para resolver o problema estudado, sendo capaz de propor designações aos maquinistas e gerar uma sequência de escalas para atender a programação de trens. Sherbeny (2010), Lin et al. (2014), Torres et al. (2015) e Braekers, Ramaekers e Nieuwenhuyse (2016) apresentaram extensas revisões sobre o problema de roteamento de veículos, abordando as diversas variações do problema, assim como as diferentes formas de taxonomia aplicadas para classificar as inúmeras produções existentes.

Na literatura, este problema é solucionado de forma separada por meio de dois subproblemas: 1) Crew Scheduling e 2) Crew Rostering. Diferentemente, o modelo matemático proposto nesse artigo soluciona o problema de forma integrada. Após a revisão bibliográfica realizada, não foi encontrado nenhum artigo que tenha tratado o

assunto descrito anteriormente por meio da abordagem do problema de roteamento de veículos, como é adotado nesta dissertação.

1.1 Objetivos

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Esta dissertação tem como objetivo elaborar um modelo matemático para a designação de maquinistas aos trens de transporte de carga em viagens de longa distância, visando a construção da sequência de escalas, minimizando os custos, representados pela quantidade de horas extras realizadas e o número de maquinistas necessários para a condução dos trens que devem circular.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos da dissertação são:

- Realizar uma revisão da literatura acerca do problema de alocação de empregados para modos de transporte, nos quais as viagens podem ter seu tempo de duração superior à escala dos empregados, i.e., tripulação de aviões e motoristas de caminhão;
- Realizar levantamento de informações sobre o processo de planejamento da designação de maquinistas para trens na EFVM;
- Aplicar o modelo matemático aos dados levantados da EFVM;

1.2 Justificativa

Tendo em vista que a alocação de maquinistas aos trens refere-se a um dos custos da operação ferroviária, é muito importante conhecer as variáveis que abrangem o processo de formação de escalas, já que o entendimento dessas informações pode levar à construção de modelos matemáticos específicos para a realidade brasileira visando uma operação mais eficiente e de menor custo.

Apesar de ser um assunto importante para o bom funcionamento da operação ferroviária, as publicações em revistas científicas são limitadas. Com isso um fator motivador é a busca de novos conhecimentos na área ferroviária apoiada pelo projeto FAPES em parceria com a Vale S/A (Projeto Cooperação FAPES/Vale, Processo FAPES - 75528452/2016, Termos de Outorga Edital FAPES Nº 01/2015).

Assim sendo, esta dissertação se justifica por propor a formulação de um novo modelo matemático para atender a demanda do setor ferroviário por uma ferramenta de apoio para formação de escalas de trabalho de maquinistas, acatando os condicionantes da mesma.

1.3 Método de pesquisa

O objeto de estudo desse trabalho científico é a Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM), que é apresentado no Capítulo 3 e é a referência para todas as etapas seguintes.

A pesquisa é desenvolvida com intuito de elaborar um modelo matemático, para definição de uma sequência ótima de designações de maquinistas a trens para atender a demanda de uma ferrovia minimizando os custos com o pagamento de horas extras e reduzindo o número de maquinistas utilizados.

A intenção é gerar conhecimento para a aplicação prática do modelo matemático. A pesquisa tem como base estudos publicados em periódicos e dissertações apresentados resumidamente no referencial teórico. As informações operacionais contidas nessa pesquisa são oficiais e divulgadas ao mercado por meio de órgãos reguladores.

O estudo foi realizado seguindo sete etapas distintas e sequenciais, que estão esquematizadas na Figura 1.

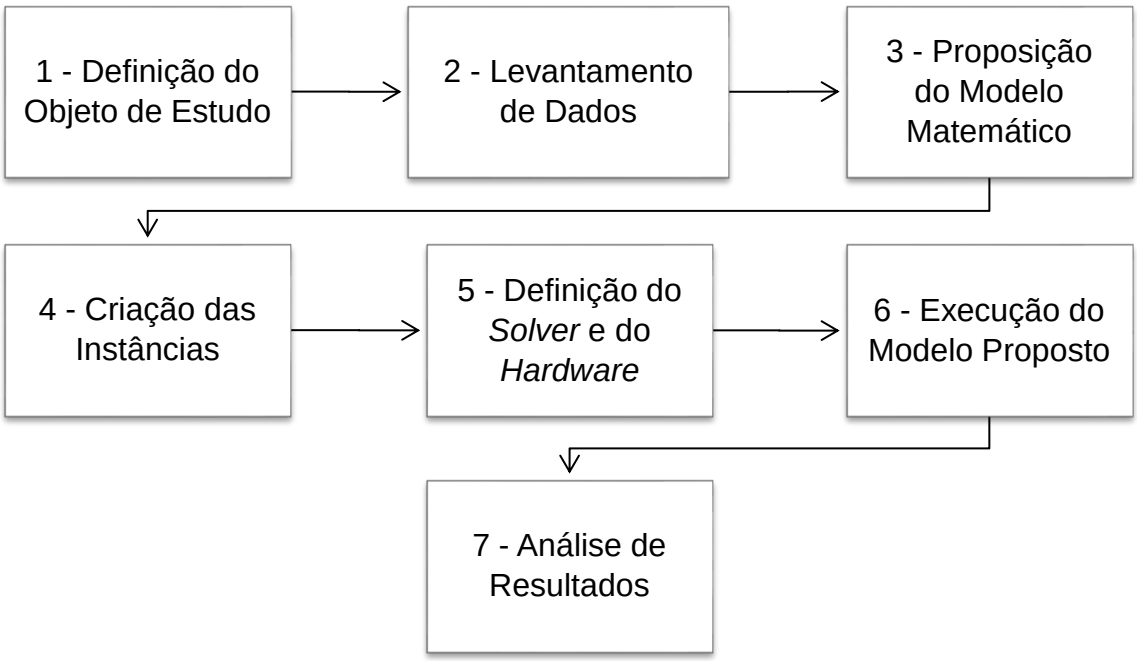

Figura 1 – Fases da metodologia de pesquisa.

Fonte: Autor.

Após a definição do objeto de estudo, foi realizada uma fundamentação teórica com a intenção de criar um modelo matemático para determinar a melhor forma de alocação de maquinistas para atender uma grade de trens.

Com base nos estudos da CLT e informações cedidas pela EFVM, via o projeto FAPES/UFES/Vale S/A, foi elaborado o modelo matemático de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM). Em seguida, foram desenvolvidas instâncias de teste e baseadas em dados reais para validação e ajustes no modelo, sendo utilizado o *solver* IBM® ILOG® CPLEX® 12.8 (IBM, 2018) para resolver o modelo matemático proposto, de modo a fornecer a designação ótima, reduzir os custos com horas extras e o número de maquinistas solicitados. Foi utilizando um computador com dois processadores Intel ® Xeon ® Silver com 128 GB de memória RAM.

1.4 Estrutura da proposta de dissertação

Este trabalho está dividido em seis capítulos, que estão distribuídos da seguinte forma:

- O Capítulo 1 contém a introdução do trabalho, que contextualiza e define o problema a ser tratado e propõe uma solução por meio do desenvolvimento de um modelo matemático. Fazem parte deste capítulo, objetivo geral e os

objetivos específicos, a justificativa do assunto, contém a metodologia utilizada, classificação da pesquisa, as etapas desenvolvidas e a estrutura do trabalho;

- O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura sobre os conceitos principais relativos ao problema e sobre a bibliografia existente;
- O Capítulo 3 contém a contextualização EFVM e são expostas as instâncias criadas para validar o modelo proposto;
- O Capítulo 4 apresenta o modelo matemático proposto que é o objetivo geral da pesquisa, bem como sua explicação;
- O Capítulo 5 apresenta os resultados dos experimentos computacionais e as subsequentes análises; e
- Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e também sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O problema de gerenciamento de tripulação (*Crew Management Problem*) tem por finalidade a elaboração das escalas de trabalho das equipes necessárias para atender o cronograma de planejamento e, usualmente, objetiva a redução do número de empregados necessários para realização do planejamento. Esse é um problema bem conhecido na Pesquisa Operacional e que tem sido historicamente associado a companhias aéreas e empresas de transporte coletivo (CAPRARA *et al*., 1997)

Segundo Ernst *et al*. (2001) o *Crew Management Problem* é decomposto em dois subproblemas, *Crew Scheduling* e *Crew Rostering*. O *Crew Scheduling Problem* elabora uma lista de tarefas, geralmente viagens, que serão atribuídas a cada tripulação. O problema de *Crew Rostering Problem* trata da alocação das tarefas geradas no *Crew Scheduling* a cada tripulação, respeitando as imposições legais e demais requisitos operacionais. Em uma empresa ferroviária, a escala da tripulação ocorre em uma sequência de etapas. Uma vez que os trens são programados e seus horários definidos é gerado a sequência de atividades, C*rew Scheduling*, posteriormente as sequência de atividades originam a matriz de trabalho e são atribuídas à tripulação, C*rew Rostering*, atendendo aos trens programados da ferrovia.

O *Crew Management Problem* é comumente abordado como um problema *Set Covering* e *Set Partitioning* (JÜTTE; ALBERS; THONEMANN, 2011). Bergh *et al.* (2013) e Ernst *et al*. (2004) apresenta uma ampla revisão sobre o tema abordando as diversas aplicações do problema. O *Crew Management Problem* se estende para os demais modos de transporte, tomando como exemplo o transporte aeroviário.

Vários autores trataram sobre o problema de escala de tripulação em companhias aéreas. Barnhart *et al.* (2003), Gopalakrishnan e Johnson (2005) e Kasirzadeh, Saddoune e Soumis (2017) apresentaram revisões sobre o problema de planejamento de tripulações em companhias aéreas. Além disso, Kasirzadeh, Saddoune e Soumis (2017) desenvolveram um modelo para solucionar o problema do planejamento da equipe de pilotos com escalas personalizadas com atividades pré-atribuidas. O modelo é solucionado usando um algoritmo de geração de colunas e instâncias criadas a partir de bases de dados fornecidas por uma empresa de

transporte aéreo norte americano. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que o nível de satisfação da equipe pode aumentar quando as escalas mensais são elaboradas com certo grau de personalização.

Wei e Yu (1997) estudaram o gerenciamento de tripulação em companhias aéreas durante operações atípicas causadas por situações que levam a alteração na escala de aviões, sendo necessário reescalonamento da tripulação, levando em conta horários restritos e legislação que atende a essa classe de trabalhadores. Os autores apresentaram um modelo de fluxo de rede inteira *multi-commodity* e um algoritmo de busca heurística para solucionar o problema. Os resultados apresentados mostraram que o algoritmo é eficiente ao resolver problemas de tamanho real e possui flexibilidade para acomodar requisitos comerciais práticos.

Cordeau *et al.* (2001) introduziram um modelo de solução simultânea para o roteamento de aeronaves e programação de tripulações, baseado em geração de colunas. O modelo adota restrições de manutenção de aeronaves, bem como as restrições de programação da tripulação. Um método heurístico *Branch-and-Bound* foi usado para o calculo das soluções. Instâncias de teste baseadas em dados fornecidos por uma companhia aérea demonstraram economias de custo significativas em comparação com o processo de planejamento sequencial comumente usado na prática.

Em sua pesquisa, Medard e Sawhney (2007) propuseram um modelo que integra a geração da matriz de trabalho e o escalonamento da tripulação para solucionar o problema de reescalonamento de tripulação em situações críticas durante o dia de operação em companhias de transporte aéreo. Os autores utilizaram os algoritmos de árvores de busca de solução, geração de coluna e o algoritmo de caminho mais curto, obtendo resultados viáveis.

O problema de programação de tripulação também é aplicado a companhias de transporte de carga rodoviárias. Koubâa *et al.* (2016) apresentaram uma revisão da literatura sobre o problema de programação de motorista de caminhões.

O problema de programação de motorista de caminhões foi estudado por Goel (2010). Em seu artigo o autor utilizou um algoritmo *Breadth-First Search*. Para avaliar o método proposto foram desenvolvidas instâncias *benchmark*, alcançando resultados positivos. Drexl *et al.* (2013) propuseram em seu artigo o planejamento

simultâneo de roteamento e agendamento de veículos e tripulação aplicado ao transporte rodoviário de longa distância. É adotada uma visão diferenciada do que comumente é praticado em problemas de roteamento de veículos, onde ocorre uma atribuição fixa de um motorista a um caminhão, ou seja, os motoristas e caminhões passam a ser independentes. Foi utilizado um algoritmo de solução heurística baseado na pesquisa de grande vizinhança, solucionando o problema em duas etapas, definindo rotas para os caminhões na primeira etapa e rotas para os motoristas na segunda etapa. Testes foram realizados com base em dados de uma transportadora europeia.

O *Crew Management Problem* no contexto ferroviário é comumente associado ao transporte de passageiros. Diferentemente do planejamento das equipes de trens de passageiros, o planejamento de equipes de trens de carga difere em tamanho e modelagem do problema. As redes de transporte de carga funcionam 24 horas por dia, sete dias por semana e, portanto, o problema para alocação dos recursos humanos torna-se mais complexo, pois se deve atender a inúmeras restrições relacionadas á qualidade de vida dos funcionários e legislações específicas (JÜTTE; ALBERS; THONEMANN, 2011).

Geralmente, uma operação ferroviária de transporte de carga utiliza uma grande quantidade de trens e exige vários maquinistas para operá-los. Devido ao grande tamanho do problema, até mesmo a economia de percentuais moderados de custos com a tripulação traduzirão grandes economias monetárias (JÜTTE; ALBERS; THONEMANN, 2011). Por isso, faz-se necessário realizar uma alocação de maquinistas mais eficiente e de menor custo, uma vez que se trata de um dos maiores custos da operação ferroviária.

No Brasil, a legislação vigente é a Consolidação das Leis Trabalhistas - CLT. O serviço ferroviário é regulamentado pela Seção V, do Capítulo I, Título III da CLT, compreendendo do Art. 236 ao Art. 247. A seguir são apresentados os artigos relevantes para elaboração da dissertação:

O Art. 237 referente aos trabalhadores ferroviários classifica os maquinistas, foco do presente trabalho, como categoria “C”, enquadrando a equipagem de trens em geral.

A legislação trabalhista no Art. 238 define que todo tempo no qual o empregado estiver à disposição da empresa será computado como trabalho efetivo. Ou seja,

não é considerado como trabalho efetivo o tempo gasto nos deslocamentos do local ou para o local de serviço. O mesmo artigo afirma que quando o intervalo entre dois períodos de trabalho for inferior à 1 hora, este intervalo deve ser considerado como de trabalho efetivo.

Segundo o Art. 239 da CLT, a duração máxima das escalas de trabalho é de 12 horas, contudo recomenda-se que as escalas devem ter duração normal de 8 horas em ferrovias com apoio de destacamentos nos trechos. A CLT assegura aos trabalhadores que após cada jornada de trabalho deve haver um descanso mínimo de 10 horas contínuas notando-se, do mesmo modo, o descanso semanal. Além disso, o Art. 239 observa que quando a alimentação e hospedagem não são ofertadas pela empresa, quando em viagem, deve ser concedida uma ajuda de custo para suprir as despesas.

Algumas das principais publicações que discutem alocação da tripulação a trens de carga estão conforme as configurações norte-americanas e europeias. As produções científicas encontradas sobre o tema propõem modelos e algoritmos destinados a atender a casos específicos e muitas vezes não podem ser aplicados para diferentes situações. Alguns exemplos de estudos nesta área são abordados a seguir.

Caprara *et al.* (1997) abordaram o problema de gerenciamento de tripulação aplicado a ferrovia italiana. Os autores apresentaram diferentes esboços para modelar os subproblemas apresentados e os possíveis métodos de solução, com a associação do problema a um grafo direcionado onde os nós são as atividades e os arcos correspondem ao sequenciamento dessas atividades. Foram discutidos métodos baseados em programação linear inteira e por particionamento de conjuntos. É apresentado um modelo baseado em relaxação Lagrangeana e testado com dados fornecidos por uma companhia ferroviária italiana, obtendo melhores resultados em comparação aos métodos adotados pela companhia. Em 1999, Caprara *et al.* (1999) apresentaram um sistema para o planejamento de tripulação, onde o problema é solucionado em 3 etapas, aplicando métodos heurísticos.

Gonçalves (2000) apresentou abordagens baseadas em inteligência computacional para o problema de alocação de maquinistas, mais especificamente, para a geração de escalas de trabalho. Foram apresentados dois métodos para geração de escalas cíclicas baseado em algoritmos de busca e outro baseado em algoritmos genéticos.

Num segundo momento foi discutido a geração de escalas personalizadas, que consideram dispensas solicitadas pelos maquinistas. Então propõe-se um algoritmo misto para solucionar o problema. Ambos os casos foram avaliados e testados, com dados reais alcançando soluções satisfatórias.

Ernst *et al.* (2001) propuseram um modelo de otimização integrado para resolver os problemas de C*rew Scheduling* e C*rew Rostering*. No problema estudado o número de equipes em cada destacamento é levado em conta no estágio de programação das equipes. Em cada escala, essas equipes realizam uma sequência de viagens podendo concluir a escala na estação onde eles estão lotados ou em estações diferentes da sua, podendo percorrer até três trechos de distância em relação a sua sede. O problema tratado possibilita que o maquinista se desloque sem necessariamente estar conduzindo um trem e de ocorrer descansos fora da sede. O objetivo é construir uma sequência de escalas ótima, sujeita a princípios legais e práticas adotadas pela empresa, a fim de cobrir o cronograma de trens com custo mínimo. O modelo foi testado com dados de uma ferrovia australiana. Os resultados numéricos mostraram que a organização pode reduzir o tamanho de sua força de trabalho.

Guttkuhn *et al*. (2003) utilizaram uma ferramenta de simulação, *TrainSim*, desenvolvida pela parceria entre *Canadian National Rail* (CN Rail) e *Circadian Technologies, Inc*. A ferramenta foi criada para solucionar o problema da elaboração da escala da tripulação. Após sua implementação, aplicada ao dados fornecidos pela CN Rail, verificou-se grande utilidade para desenvolver o cronograma de tripulação e avaliar o desempenho esperado.

Jütte, Albers e Thonemann (2011) descreveram o desenvolvimento e implementação do *software* de programação de equipagem na empresa alemã de transporte ferroviária de carga DB Schenker. Para garantir que o *software* seja operacionalmente viável, todos os requisitos da empresa alemã foram adotados. A designação de atividades é feito diariamente e todo maquinista inicia e conclui suas atividades no mesmo destacamento. O *software* apresentado é baseado em uma técnica de solução de geração de colunas. Os autores afirmaram ter alcançado resultados computacionais com soluções de alta qualidade em tempos de execução razoáveis, mesmo para os casos de problemas complexos.

Jütte e Thonemann (2012) apresentaram um algoritmo de decomposição baseado em geração de colunas para solucionar o problema de programação de tarefas em curtos prazos, C*rew Scheduling*. Em seu modelo, existem varias estações sendo algumas delas destacamentos, onde os maquinistas podem iniciar ou concluir suas atividades. Os maquinistas devem sempre concluir suas atividades no destacamento que deram início a sua escala. O algoritmo apresentado decompõe o problema em regiões sobrepostas que são otimizadas em paralelo. Foram realizados testes com instâncias baseadas em dados de uma grande transportadora ferroviária européia que produziram resultados favoráveis com tempo de execução razoável.

Hanafi e Kozan (2014) em seu artigo trataram o problema de alocação de equipes, definindo sua sequência de atividades, para atender a programação de trens de carga em uma ferrovia com tempos de início e término das viagens definidos. Um trem pode ser atendido por uma única equipe durante seu trajeto, contudo cada equipe deve concluir sua escala no seu destacamento sede. Para solucionar o problema foi proposto um modelo para o planejamento de escalas da tripulação ferroviária, visando minimizar os números de tarefas e reduzir o tempo ocioso de transição entre elas. Posteriormente foi aplicada uma heurística construtiva hibrida com um algoritmo de busca baseado em *Simulated Annealing* para solucionar o problema. A heurística proposta foi avaliada com instâncias de teste geradas aletoriamente. Foram obtidas soluções com baixo GAP e tempo de processamento razoável para instâncias de grande porte.

Jütte e Thonemann (2015) acrescentaram ao problema de programação de tripulação descrito em Jütte e Thonemann (2012), a possibilidade dos maquinistas se deslocarem entre estações sem necessariamente estarem operando um trem, ou seja, se deslocam como passageiros por meio de taxi, ônibus, etc. Para solucionar o problema, Jütte e Thonemann (2015) apresentaram um algoritmo de decomposição baseado em G*raph* P*artitioning*, que objetiva encontrar um conjunto mínimo de maquinistas para atender a demanda de uma ferrovia. Os autores adotaram uma abordagem G*reenfield*, na qual não é necessária informação sobre as atividades anteriores. O algoritmo foi testado com dados de uma ferrovia europeia de transporte de cargas e gerou soluções adequadas para as instancias testadas.

Carvalho e Santos (2006), Fernandes (2012) e Rodrigues (2018) trataram do problema de alocação de maquinistas a trens em ferrovias brasileiras. Carvalho e Santos (2006) propuseram a aplicação de algoritmos genéticos para o C*rew Rostering Problem*, e realizaram testes em instâncias teóricas disponíveis na literatura. Fernandes (2012) propôs a centralização da tomada de decisão no planejamento das designações dos maquinistas junto ao centro de controle operacional da ferrovia, e para testar sua hipótese utilizou uma ferramenta de simulação para resolver o problema. Rodrigues (2018) propôs a utilização de programação linear aplicando o *solver* do *Microsoft Excel* para solucionar o problema.

Os trabalhos publicados não podem garantir a otimização do *Crew Management Problem*, pois eles abordam o problema, dividindo-o nos dois subproblemas citados anteriormente, *Crew Scheduling* e *Crew Rostering*, e então resolver cada um dos dois subproblemas. Nesta dissertação, diferentemente das demais publicações, o *Crew Management Problem* é tratado em uma única etapa, sem considerar o agrupamento de tarefas para serem realizadas em uma escala, que é o *Crew Scheduling*, para posterior alocação destas às tripulações. Ou seja, é estudado somente a etapa de *Crew Rostering* designando maquinistas a várias tarefas, i.e., viagens de trens, sem agrupá-las previamente, podendo então garantir a otimização do *Crew Management Problem* como um todo.

É adotado como base o PRV-MD-MV adaptado para o problema, algo que ainda não foi visto nas publicações levantadas. O modelo atribui características de um veículo ao maquinista, em comparação com o problema PRV-MD-MV, sendo capaz de alterar a localização em que o maquinista se encontra à medida que o planejamento é realizado, podendo atender trens com diferentes origens respeitando as restrições impostas. Além disso, o modelo é apto a realizar a designação de maquinistas a trens que realizam viagens onde sua origem é igual ao seu destino.

3 PROBLEMA ESTUDADO E GERAÇÃO DAS INSTÂNCIAS DE TESTE

Atualmente a extensão da malha ferroviária concedida no Brasil é de 29.075 km (ANTT, 2017). A Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), situada nos Estados do Espírito Santo e Minas Gerais possui uma extensão de 895 km de via, sendo 873 km de bitola métrica e 22 km de bitola mista (ANTT, 2019). Esta ferrovia está sobre a concessão de exploração para a Vale S/A.

A EFVM transporta minério de ferro, produtos agrícolas (grãos e fertilizante) e produtos siderúrgicos do interior do Estado de Minas Gerais até o Estado do Espírito Santo. No ano de 2018, a EFVM movimentou 124 milhões de toneladas úteis de produtos.

A EFVM possui 6 destacamentos distribuídos ao longo da ferrovia, Figura 2. Cada destacamento conta com um quadro de maquinistas para atenderem a demanda diária de condução de trens que passam ou se originam neles. O destacamento onde o maquinista está lotado é denominado *destacamento sede* do maquinista.

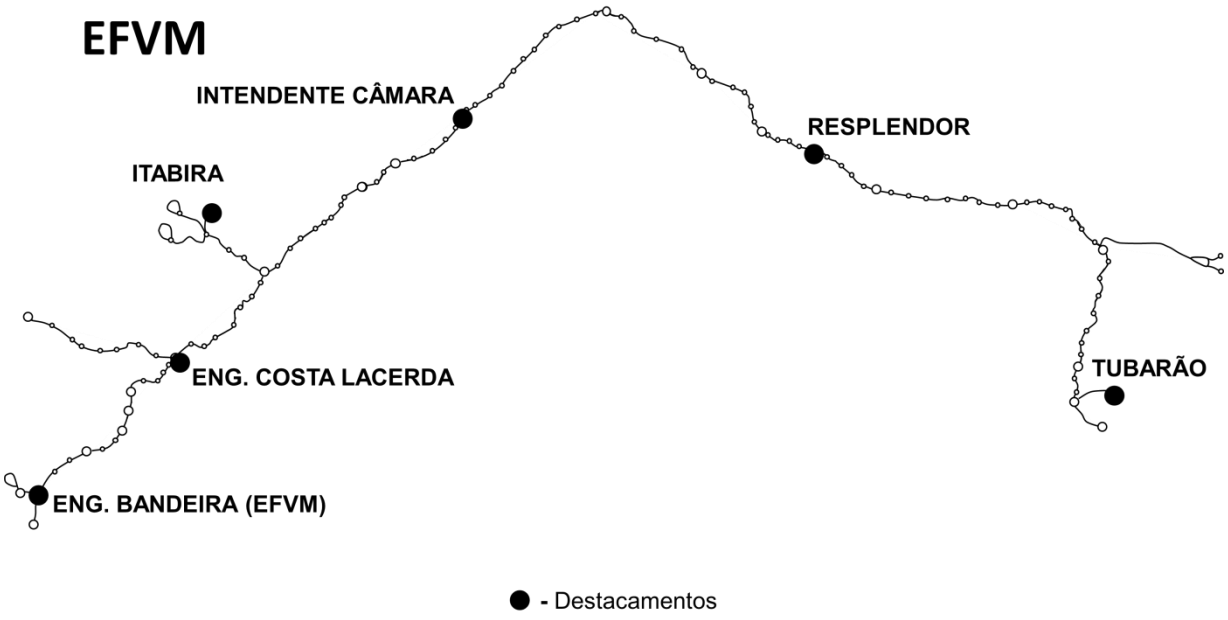

Figura 2 - Destacamentos EFVM.

Fonte: Adaptado de EFVM (2011).

O transporte ferroviário de cargas no Brasil, em geral, tem como característica viagens por longas distâncias. Assim, os trens possuem tempos de viagem superiores ao tempo da escala do maquinista. Para atender as determinações da legislação trabalhista de limite máximo de tempo de escala de trabalho, os maquinistas conduzem os trens em trechos específicos, ou seja, eles realizam viagens entre o destacamento onde estão lotados, e outro destacamento contíguo a esse, Figura 3, conduzindo somente um trem em cada escala.

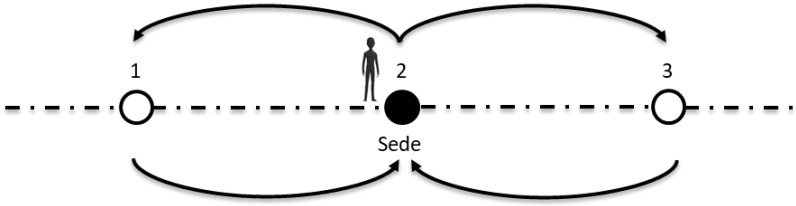

Figura 3 - Trecho atendido pelo maquinista.

Fonte: Autor.

Uma situação que ocorre na EFVM, entre o destacamento de Costa Lacerda e a mina de Brucutu, está representada na Figura 4. Neste trecho, o maquinista parte do destacamento de Costa Lacerda conduzindo um trem que viaja até a mina onde percorre a pera ferroviária, sendo carregado com minério de ferro, e retorna para o destacamento de origem do trem sem haver a troca do maquinista durante o trajeto. Esse tipo de viagem é denominado de *vai e volta*.

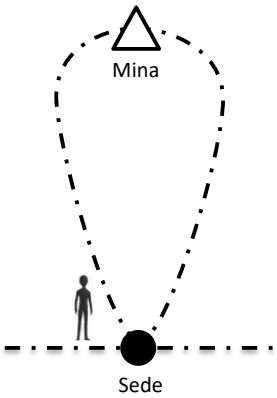

Figura 4 - Trecho vai e volta atendido pelo maquinista.

Fonte: Autor.

Após cumprirem uma escala, os maquinistas entram num período de descanso, retornando na escala seguinte para conduzir um novo trem. Quando esse descanso ocorre fora do destacamento sede do maquinista, tem-se o descanso fora de sede. Ao término de uma sequência de escalas, o maquinista deve receber uma folga.

No levantamento feito junto a EFVM, foi constatado que os maquinistas trabalham escalas de 6 horas e possuem um tempo máximo de permanência no trem de 10 horas. Os tempos de descanso e de folga adotados pela EFVM são 10 horas e 48 horas, respectivamente. O descanso e a folga têm um limite máximo de 2 horas além do tempo adotado, ou seja, o maquinista deve retornar em até 12 horas, quando atribuído o descanso, para iniciar a próxima escala mesmo que não haja trem para ele conduzir, assim como, quando ocorre a folga, retornando em até 50 horas para inicio da próxima escala, Figura 5.

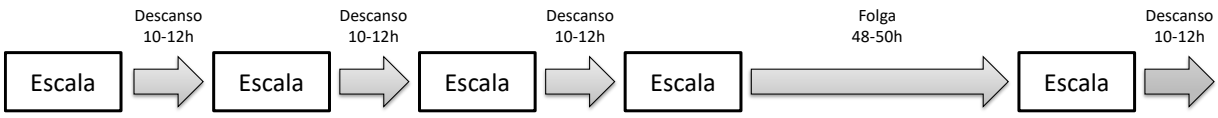

Figura 5 - Sequência de escalas dos maquinistas.

Fonte: Autor.

Na EFVM o planejamento da designação dos maquinistas a trens é elaborado por uma equipe especializada da ferrovia. Este processo é realizado de forma manual, atendendo as restrições descritas anteriormente, baseando-se na experiência dos profissionais envolvidos no processo de planejamento.

As instâncias para testar o modelo matemático proposto foram elaboradas com base nos dados levantados junto a EFVM. Foram desenvolvidas 18 instâncias, Tabela 1, variando: número de maquinistas, número de destacamentos, número de viagens de trens, número máximo de designações, tempo máximo de trabalho por escala e limite de tempo de uma escala do maquinista. A viagem de trem está relacionada à viagem no trecho entre dois destacamentos. Por questões de confidencialidade da EFVM, os valores referentes ao salário de cada maquinista, bem como os valores pagos de hora extra não podem ser divulgados.

As instâncias propostas têm por objetivo realizar os testes para validação do modelo matemático proposto, assim como, analisar a lógica e a coerência dos resultados obtidos com base nas restrições estabelecidas, e a viabilidade da utilização do s*olver* CPLEX 12.8 (IBM, 2018) para solucionar o problema.

As Instancias de 1 a 4 foram criadas para facilitar a observação do comportamento do modelo, possuindo um tamanho reduzido, e com situações diversas para validar o mesmo. A Instância 1 é uma instância de teste com dados aleatórios, contando com 6 maquinistas distribuídos por 3 destacamentos onde 13 viagens de trens irão ocorrer. Cada maquinista pode fazer um limite de 4 escalas trabalhadas, sendo que 2 maquinistas possuem um limite de duas designações antes de iniciar seu período de folga.

A Instância 2, foi criada para avaliar a programação de um trecho entre 2 destacamentos contíguos. Ela possui 20 viagens de trens e 6 maquinistas, sendo que duas viagens possuem o tempo igual ao tempo máximo que o maquinista pode trabalhar em uma escala (10 horas). Deseja-se com essa instância avaliar se o modelo proposto respeita os limites de trabalho impostos e facilitar a apresentação gráfica das soluções. A Instância 3 conta com 14 maquinistas e 17 viagens de trens distribuídos por 6 destacamentos. Os trechos passam a ter um tempo de viagem determinado. Além disso, essa instância possui dois trens que realizam viagens do tipo *vai e volta.*

A Instância 4 possui 20 maquinistas e 59 viagens de trens distribuídos por 6 destacamentos. Foi desenvolvida para demonstrar a evolução do tamanho do problema quando comparado com a Instância 3.

As Instâncias 5 e 6, foram desenvolvidas com base no número médio de trens que circulam pelo destacamentos de Costa Lacerda, sendo esse destacamento origem ou destino das viagens. O intuito é testar o planejamento de designações dos maquinistas que atendem aos trechos adjacentes à Costa Lacerda e verificar se o *solver* CPLEX, rodando o modelo proposto, é capaz de resolver instâncias do tamanho do problema real em um tempo razoável. Espera-se, assim avaliar o tempo de execução do CPLEX. A Instância 5 considera 3 destacamentos, 30 maquinistas, 54 viagens de trens (por dia) e que cada maquinista pode cumprir até 2 designações de viagem em um dia. A Instância 6 é similar a Instância 5, e é referente ao mesmo

destacamento, porém ela contempla 2 dias de planejamento. Desta forma, ela considera 3 destacamentos, 33 maquinistas e 120 viagens de trens e que cada maquinista pode ser designado a até 4 viagens.

As Instâncias de 7 a 15 foram criadas com base em dados fornecidos pela EFVM. Elas possuem um tamanho próximo do real referente a um dia de operação considerando somente trens de minério de ferro. Cada trecho da ferrovia possui um tempo médio de viagem dos trens. Essas instâncias tem a intenção de proporcionar a compreensão do impacto da variação do tempo de escala e o limite de tempo de trabalho de um maquinista em uma escala. As Instâncias 7 a 15 possuem 45 maquinistas e 119 viagens de trens distribuídos por 6 destacamentos. As Instâncias 7, 8 e 9 consideram o tempo máximo de trabalho por escala de 10 horas (padrão adotado pela EFVM). As Instâncias 10, 11 e 12 adotam o tempo máximo de trabalho por escala de 11 horas. Já nas Instâncias 13, 14 e 15 o tempo máximo de trabalho por escala é de 12 horas. O tempo limite de escala é variado em três valores sendo eles: 6 horas para as Instâncias 7, 10 e 13 (padrão adotado da EFVM), 7 horas para as Instâncias 8, 11 e 14 e 8 horas para as Instâncias 9, 12 e 15.

A Instância 16, 17 e 18 foram criadas para testar a capacidade do CPLEX resolver instâncias de grande porte. Nessas instâncias foram considerados para o planejamento 60 maquinistas distribuídos em 6 destacamentos. A Instância 16 possui 177 viagens de trens e representa o planejamento de uma faixa de designação, com a capacidade de atendimento de viagens inferior à máxima. A Instância 17 conta com 216 viagens de trens representando quatro escalas no planejamento do grupo de maquinistas. Já a Instância 18, possui 432 viagens de trens e simula o planejamento de 8 escalas dos 60 maquinistas, aproximadamente 6 dias contando com o período de folga.

Tabela 1 – Dados das instâncias de teste.

Instância	Parâmetros					
	Nº de Maq.	**Nº de Trens**	**Nº de Destac.**	**Nº de Escalas**	**Limite de tempo de uma escala (h)**	**Tempo máximo de trabalho de um maquinista por escala (h)**
1	6	13	3	4	6	10
2	6	20	2	4	6	10
3	14	17	6	4	6	10
4	20	59	6	4	6	10
5	30	54	3	2	6	10
6	33	120	3	4	6	10
7	45	119	6	4	6	10
8	45	119	6	4	7	10
9	45	119	6	4	8	10
10	45	119	6	4	6	11
11	45	119	6	4	7	11
12	45	119	6	4	8	11
13	45	119	6	4	6	12
14	45	119	6	4	7	12
15	45	119	6	4	8	12
16	60	177	6	4	6	10
17	60	216	6	4	6	10
18	60	432	6	8	6	10

Fonte: Autor.

No ambiente de desenvolvimento *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*, Versão 12.8, para o modelo matemático é gerado um arquivo com extensão **.mod* e para cada instância é gerado um arquivo com extensão **.dat*.

No entanto, o CPLEX não consegue ler os arquivos **.mod* e **.dat*. Assim, precisam ser gerados arquivos com extensão **.lp*, com o modelo linearizado, que possuem a linguagem compreendida pelo CPLEX. Para tal, o *ambiente IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*, Versão 12.8, dentro de uma janela do *Windows* 10.0, rodando o sistema operacional DOS, oferece o comando *oplrun –e arquivo.lp modelo.mod arquivo.dat* para geração do arquivo com linguagem CPLEX, *arquivo.lp*, gerado a partir do modelo, *modelo.mod*, e do arquivo de dados, *arquivo.dat*.

No problema tratado nessa dissertação, pôde-se notar que o tempo para geração do *arquivo.lp* é muito elevado. Isso se deve, sobretudo, ao número de variáveis de

decisão e parâmetros do modelo. O aumento do número de maquinistas e de viagens de trens levou a um aumento expressivo do número de variáveis de decisão. O tempo de geração e o tamanho do arquivo **.lp* foram gerados pelo CPLEX. O número de variáveis de decisão inteiras e contínuas foi calculado com base nas Equações 38 e 39 do capítulo anterior, sendo apresentados na Tabela 2.

Pode se destacar que as Instâncias 7 a 15 possuem cada uma 7.894.935 variáveis de decisão inteiras e 37.800 variáveis de decisão contínuas. A quantidade de variáveis de decisão é igual entre as instâncias, uma vez que, a quantidade de maquinistas, viagens de trens e número de escalas não são alterados entre elas. Já as Instâncias 16 e 17 possuem respectivamente 21.305.700 e 27.253.980 variáveis de decisão. A Instância 18 possui 146.679.420 variáveis de decisão, devido à proporção tomada pelo problema o CPLEX não foi capaz de gerar o arquivo *lp referente a está instância.

Tabela 2 – Geração dos arquivos **.lp*.

Inst.	**Tempo de geração (s)**	**Tamanho arquivos **.lp* (Kb)**	**Variáveis de Decisão do Modelo (un)**		
			Inteiras	**Contínuas**	**Total**
1	7,33	4.967,00	15.498	624	16.122
2	8,38	10.001,00	25.326	792	26.118
3	34,53	33.710,00	114.898	2.576	117.474
4	483,94	492.538,00	791.260	8.000	799.260
5	413,33	332.139,00	789.570	6.900	796.470
6	131.460,00	5.366.981,00	4.590.597	24.684	4.615.281
7	38.486,10	8.107.902,00	7.894.935	37.800	7.932.735
8	22.554,10	8.107.902,00	7.894.935	37.800	7.932.735
9	30.403,10	8.107.902,00	7.894.935	37.800	7.932.735
10	25.748,80	8.107.902,00	7.894.935	37.800	7.932.735
11	18.627,90	8.107.902,00	7.894.935	37.800	7.932.735
12	173.297,00	8.107.902,00	7.894.935	37.800	7.932.735
13	199.202,00	8.107.902,00	7.894.935	37.800	7.932.735
14	18.455,60	8.107.902,00	7.894935	37.800	7.932.735
15	19.978,00	8.107.902,00	7.894.935	37.800	7.932.735
16	146.452,00	32.477.394,80	21.234.180	71.520	21.305.700
17	313.215,00	52.475.395,00	27.173.100	80.880	27.253.980
18	471.864,00	*não gerado*	146.413.980	265.440	146.679.420

Fonte: Próprio autor.

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O modelo matemático proposto nessa dissertação foi desenvolvido com base nos dados levantados junto a EFVM, dando origem as considerações descritas a seguir.

Os maquinistas são lotados em destacamentos ao logo da ferrovia e são responsáveis por conduzir os trens. Cada maquinista é designado para trabalhar em trechos específicos entre seu destacamento sede e os destacamentos que ele pode atender ou em viagens onde o destino do trem é igual a sua origem, viagem *vai e volta*. Em cada escala o maquinista pode conduzir somente um trem.

A viagem completa de um trem da sua origem até o destino final é dividida em viagens menores correspondentes aos trechos entre destacamentos, Figura 6. A partir desse momento toda referência à viagem de trem está relacionada à viagem no trecho entre dois destacamentos como explicado.

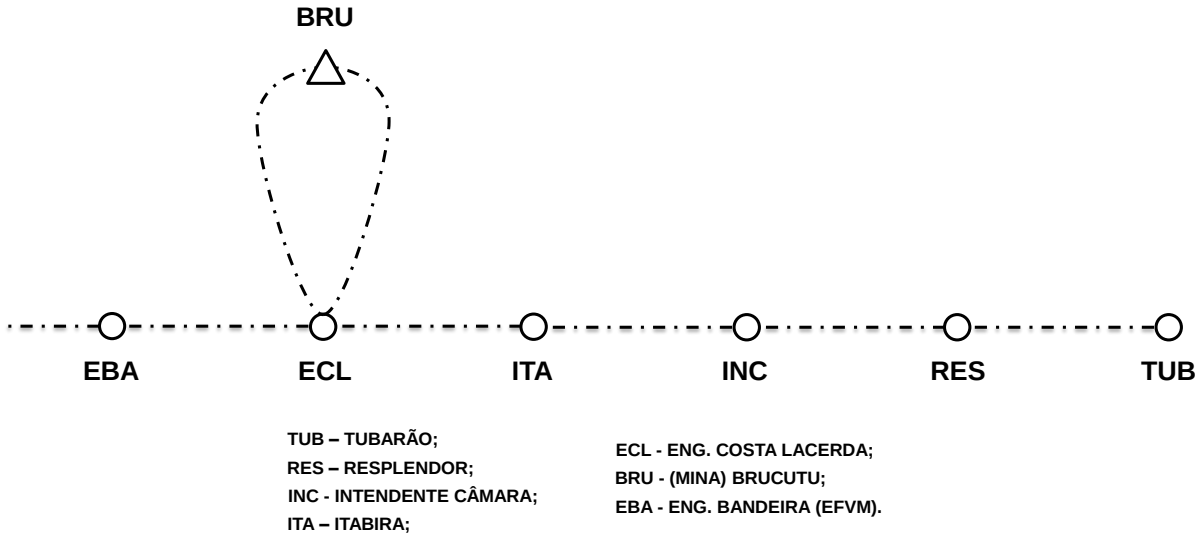

Figura 6 - Esquema EFVM.

Fonte: Autor.

Os trens são caracterizados por seus destacamentos de origem e destino em cada trecho. Para um maquinista ser designado a um trem, ambos devem estar no mesmo local de início da viagem, assim como o destino do trem deve ser um dos possíveis destacamentos para os quais o maquinista pode viajar, Figura 7. À medida

que o trem é atendidos, o destacamento do maquinista fica sendo o destacamento do destino do trem para o qual foi designado, possibilitando identificar o novo local que ele se encontra para prosseguir a programação.

Uma escala corresponde a cada momento que o maquinista se apresenta para trabalhar, atendendo ou não um trem. Já uma designação é quando, em uma escala, é determinado que o maquinista irá conduzir um trem. O maquinista pode atender no máximo três trechos da ferrovia sendo que todos devem ter como ponto em comum o destacamento sede do maquinista, Figura 7.

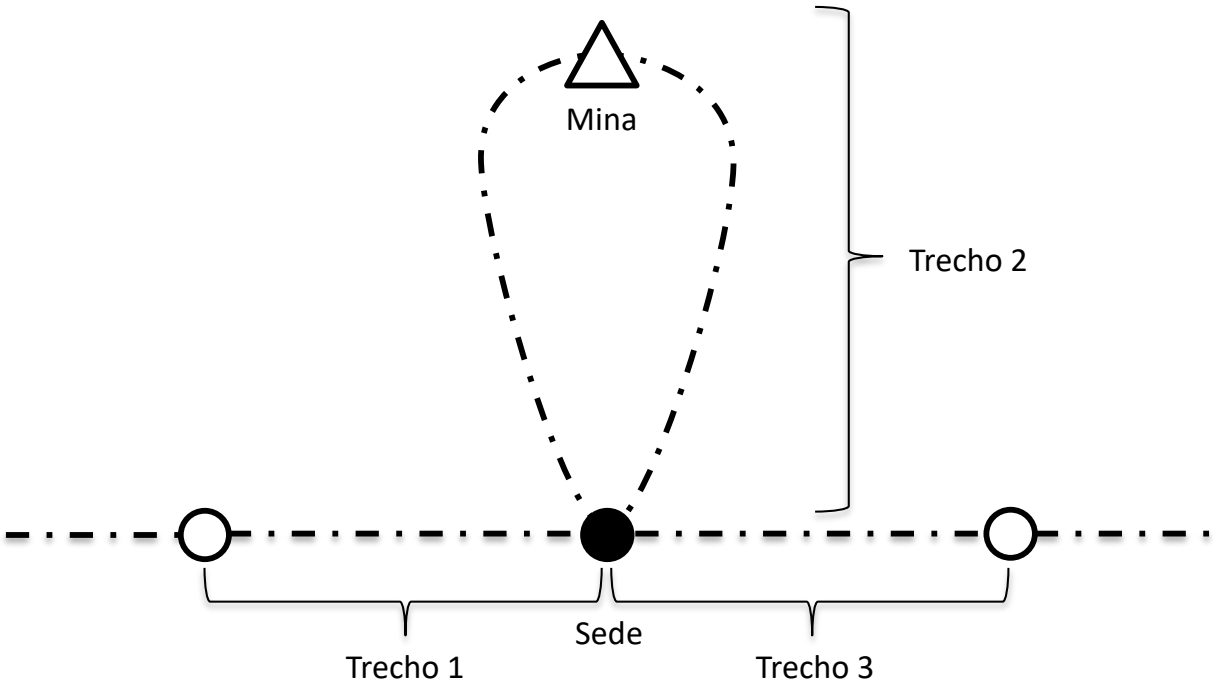

Figura 7 - Trechos possíveis de serem atendidos pelo maquinista.

Fonte: Autor.

Foi convencionado que após uma sequência de no máximo quatro escalas o maquinista deve cumprir a folga, adotada pela EFVM como 48 horas, após o fim da ultima escala. A faixa de designação determina a quantidade de escalas que o maquinista irá cumprir antes da próxima folga.

No modelo matemático proposto, podem existir maquinistas que não são designados para atender um trem na sua escala de trabalho. No entanto, nenhum trem pode

deixar de ser atendido, ou seja, ter um maquinista designado para ele, assim como, o início da viagem do trem deve ocorrer exatamente no momento que ele estiver disponível no destacamento.

O modelo matemático proposto para planejar a designação de maquinistas aos trens tomou como base o Problema de Roteamento de Veículos, com Múltiplos Depósitos e com Múltiplas Viagens (PRV-MD-MV) (BRAEKERS; RAMAEKERS; NIEUWENHUYSE, 2016).

Para adaptar o PRV-MD-MV ao problema tratado nesta dissertação, considerou-se que cada maquinista é um depósito e existe um depósito virtual correspondente para ele. Em cada depósito, é considerado que existe um único veículo que inicia uma viagem para atender clientes, que são os diversos trens que demandam maquinistas.

Uma viagem representa a designação do maquinista a um trem e é limitada ao tempo máximo de trabalho por escala. Um veículo/maquinista pode ou não atender trens em uma viagem e, caso não atenda nenhum trem, é considerado que o tempo de viagem do veículo é igual ao período de uma escala de trabalho do maquinista. Ao fim da viagem, o veículo/maquinista retorna para seu respectivo depósito virtual e, no caso do problema estudado, o veículo deve ficar parado até o início da próxima viagem, representando o descanso entre escalas ou a folga obrigatória do maquinista, de acordo com sua faixa de designação. Essa definição pode ser vista na Figura 9.

Pode-se destacar na Figura 9, o maquinista 3 que na escala 1 realiza uma viagem do tipo vai e volta, ou seja, atende um trem com o destacamento de início igual ao de destino.

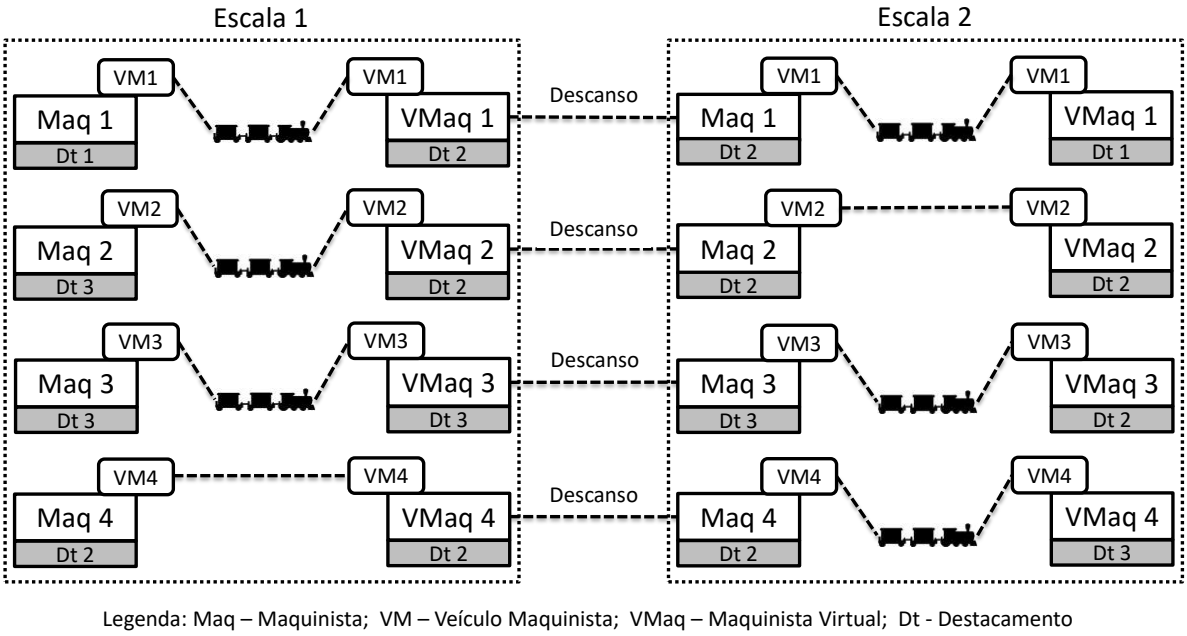

Figura 8 - Esquema do modelo matemático proposto.

Fonte: Autor.

Considerando nm, o número de maquinistas disponíveis, nt, o número de viagens de trens a serem atendidas, ne, o número máximo de escalas dos maquinistas, e nf, o número de faixas de designação.

O modelo trata o maquinista como um depósito que possui um veículo virtual. No caso os veículos virtuais correspondem aos maquinistas reais que vão de 1 até nm e formam o conjunto MR. Este percorre um trecho atendendo o cliente designado, que é o trem pertencente ao conjunto NT que compreende os valores de $1 + nm$ *até* $nm + nt$, e ao final retorna para seu deposito virtual, contido no conjunto MV que está compreendido entre os valores de $1 + nm + nt$ *até* $2\,nm + nt$.

O tempo decorrido entre os depósitos correspondentes aos maquinistas se refere ao tempo de viagem do trem (t_i). O tempo de deslocamento do veículo/maquinista do depósito para um trem que será atendido é igual a zero. Logo, após atender o trem, o veículo virtual viaja para seu depósito virtual equivalente.

O modelo matemático proposto é apresentado a seguir em cinco partes, a saber: os conjuntos, os parâmetros, as variáveis de decisão, a função objetivo e as restrições. Os conjuntos do modelo matemático são definidos a seguir e ilustrados na Figura 9:

MR Conjunto dos maquinistas reais, $MR = \{1, \dots, nm\}$;

NT Conjunto dos trens, $NT = \{(nm + 1), \dots, (nm + nt)\}$;

MV Conjunto dos maquinistas virtuais, $MV = \{(1 + nm + nt), \dots, (2\,nm + nt)\}$;

TMR Conjunto dos maquinistas reais e dos trens, $TMR = \{1, \dots, (nm + nt)\}$;

TMV Conjunto dos maquinistas virtuais e dos trens, $TMV = \{(nm + 1), \dots, (2\,nm + nt)\}$;

TMT Conjunto de todos os maquinistas, trens e maquinistas virtuais, $TMT = \{1, \dots, (2\,nm + nt)\}$;

E Conjunto de escalas, $E = \{1, \dots, ne\}$;

EA Conjunto auxiliar de escala, não considerando a primeira escala, $EA = \{2, \dots, ne\}$;

EB Conjunto auxiliar de escala, não considerando a última escala, $EB = \{1, \dots, (ne - 1)\}$;

D Conjunto auxiliar para definir um trecho que o maquinista pode ser designado a trem, $D = \{1, 2\}$. Sendo o primeiro número o destacamento sede do maquinista e o segundo um possível destacamento que define o trecho que o maquinista pode ser designado a trem;

OP Conjunto de possíveis trechos a serem atendidos, $OP = \{1, \dots, 3\}$;

F Conjunto de faixas de designação, $F = \{1, \dots, nf\}$;

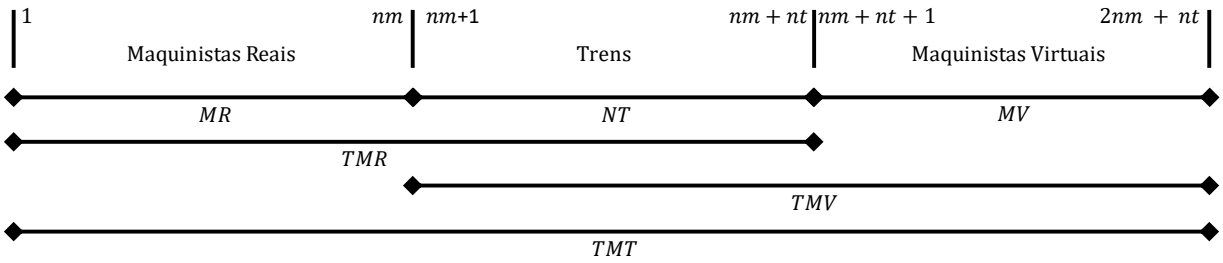

Figura 9 - Conjuntos do modelo matemático.

Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros do modelo são:

t_i	Representa o tempo de viagem do trem. No caso dos nós pertencentes à MR e à MV, esse tempo é igual a 0;
a_i	Momento de início da viagem do trem $i \in NT$;
s^k	Momento de chegada do maquinista no destacamento, $k \in MR$;
tl	Tempo máximo de trabalho de um maquinista por escala;
te	Limite de tempo de uma escala do maquinista;
td	Tempo de descanso após o término de uma escala;
tf	Tempo de folga após atender uma sequência de designações;
lr	Limite de tempo para retornar da folga e/ou do descanso;
odt_i	Destacamento de origem do trem $i \in NT$;
ddt_i	Destacamento de destino do trem $i \in NT$;
$tdm^{k,d,p}$	Trecho $p \in OP$ entre destacamentos $d \in D$ que o maquinista $k \in MR$ pode trabalhar. Sendo que o destacamento sede será sempre quando $d = 1$. Ele estabelece uma matriz para os possíveis trechos que o maquinista pode trabalhar.
$lfs^{k,f}$	Limite superior da faixa de designação, $f \in F$, de um maquinista $k \in MR$;
$lfi^{k,f}$	Limite inferior da faixa de designação, $f \in F$, de um maquinista $k \in MR$;
sh^k	Salário do maquinista $k \in MR$;
sm^k	Valor da hora extra paga ao maquinista $k \in MR$;
M	Valor grande para lógica do modelo;
m	Valor pequeno para lógica do modelo.

Como mencionado, existem dois tipos de período para descansar entre escalas: 1) Descanso e 2) Folga. Para determinar esse tipo de período é determinada sua faixa de designação, $f \in F$, que indica a quantidade de escalas que o maquinista irá cumprir antes desse período. Cada faixa de designação é caracterizada com um limite inferior $li^{k,f}$ e um limite superior $ls^{k,f}$ do número de escalas. A EFVM estabeleceu que o limite superior da faixa de designação é de 4 escalas. O descanso ocorre ao final de cada escala enquanto o maquinista não atinge o limite superior da faixa. A folga ocorre ao término da última escala igual ao limite superior da faixa, como pode ser visto na Figura 11.

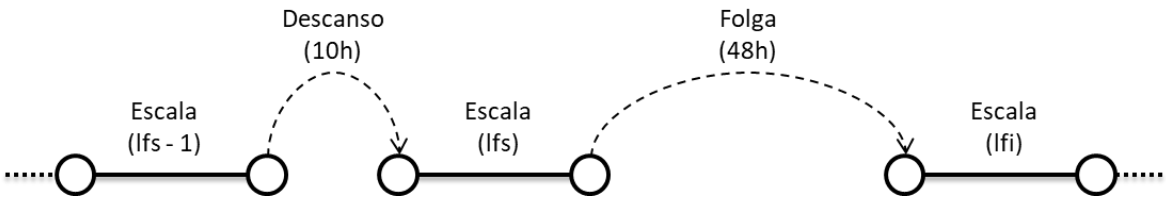

Figura 10 - Intervalos entre escalas.

Fonte: Autor.

As variáveis de decisão do modelo matemático são:

$x_{i,j}^{k,e}$ Variável binária que assume o valor igual a 1 se existe viagem do maquinista $k \in MR$, na designação $e \in E$, entre os depósitos, trens e depósitos virtuais $i, j \in TMT$ e, 0 caso contrário;

$T_i^{k,e}$ Momento que o maquinista $k \in MR$, na escala $e \in E$, inicia o atendimento, dos depósitos, trens ou depósitos virtuais $i \in TMT$;

$ldm^{k,e}$ Destacamento onde o maquinista $k \in MR$ está lotado na designação $e \in E$;

bu^k Variável binária que assume o valor igual a 1 se o maquinista $k \in MR$ for designado para trabalhar em pelo menos uma escala e, 0 caso contrário;

$he^{k,e}$ Horas extras do maquinista $k \in MR$, na escala $e \in E$.

$ft_i^{k,p,d}$ Variável binária que assume o valor 1 se o maquinista $k \in MR$ pode

conduzir o trem $i \in NT$, viajando no trecho $p \in OP$, tendo início no destacamento $d \in D$ e 0, caso contrário.

Antes de definir as restrições, é necessária explicar que foi utilizado nas Restrições (21), (22), (25), (26) e (27) a notação "→" que é própria do ambiente IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Versão 12.8 (IBM, 2019), onde foi desenvolvido o modelo matemático, e que representa uma restrição lógica com a função de implicação. Ou seja, utilizando esta notação, uma vez que a restrição lógica é atendida, lado esquerdo, ela implica em um valor específico de uma variável de decisão no lado direito. Assim, este ambiente transforma um modelo matemático não linear em um modelo linear que o CPLEX Versão 12.8 consegue resolver. A partir das descrições anteriores, são apresentadas a seguir a função objetivo e as restrições do modelo.

Função Objetivo:

$$Minimizar \sum_{k \in MR} \sum_{e \in E} sh^k he^{k,e} + \sum_{k \in MR} sm^k bu^k \tag{1}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in TMT} \sum_{e \in E} \sum_{k \in MR} x_{i,j}^{k,e} = 1 \qquad \forall\, i \in NT \tag{2}$$

$$\sum_{j \in TMV} \sum_{ka \in MR} x_{k,j}^{ka,e} = 1 \qquad \forall\, k \in MR, e \in E \tag{3}$$

$$\sum_{j \in TMV} \sum_{\substack{ka \in MR \mid \\ ka \neq k}} x_{k,j}^{ka,e} = 0 \qquad \forall\, k \in MR, e \in E \tag{4}$$

$$\sum_{i \in TMR} \sum_{ka \in MR} x_{i,k+nt+nm}^{ka,e} = 1 \qquad \forall\, k \in MR, e \in E \tag{5}$$

$$\sum_{i \in TMR} \sum_{\substack{ka \in MR \mid \\ ka \neq k}} x_{i,k+nt+nm}^{ka,e} = 0 \qquad \forall\, k \in MR, e \in E \tag{6}$$

$$\sum_{j \in TMT} \sum_{ka \in MR} \sum_{e \in E} x_{k+nt+nm,j}^{ka,e} = 0 \qquad \forall\, k \in MR \qquad (7)$$

$$\sum_{i \in TMT} \sum_{ka \in MR} \sum_{e \in E} x_{i,k}^{ka,e} = 0 \qquad \forall\, k \in MR \qquad (8)$$

$$\sum_{j \in TMV} x_{i,j}^{k,e} - \sum_{j \in TMR} x_{j,i}^{k,e} = 0 \qquad \forall\, i \in NT, k \in MR, e \in E \qquad (9)$$

$$x_{i,i}^{k,e} = 0 \qquad \forall\, i \in TMT, k \in MR, e \in E \qquad (10)$$

$$\sum_{i \in NT} \sum_{j \in TMV} x_{i,j}^{k,e} \geq 0 \qquad \forall\, k \in MR, e \in E \qquad (11)$$

$$\sum_{i \in NT} \sum_{j \in TMV} x_{i,j}^{k,e} \leq 1 \qquad \forall\, k \in MR, e \in E \qquad (12)$$

$$T_j^{k,e} \geq T_i^{k,e} + t_i\, x_{i,j}^{k,e} - \left(1 - x_{i,j}^{k,e}\right)M \qquad \forall\, i \in TMR, j \in TMV,\ k \in MR,\ e \in E \qquad (13)$$

$$T_i^{k,e} = a_i \left(x_{i,k+nt+nm}^{k,e} + \sum_{j \in NT} x_{i,j}^{k,e} \right) \qquad \forall\, i \in NT, k \in MR, e \in E \qquad (14)$$

$$T_{k+nt+nm}^{k,e} - T_k^{k,e} \leq tl \qquad \forall\, k \in MR, e \in E \qquad (15)$$

$$T_k^{k,1} = s^k \qquad \forall\, k \in MR \qquad (16)$$

$$T_k^{k,e} \geq T_{k+nt+nm}^{k,e-1} + tf \qquad \forall\, k \in MR, e \in EA, f \in F \mid (e-1) = lfs^{k,f} \qquad (17)$$

$$T_k^{k,e} \leq T_{k+nt+nm}^{k,e-1} + tf + lr \qquad \forall\, k \in MR, e \in EA, f \in F \mid (e-1) = lfs^{k,f} \qquad (18)$$

$$T_k^{k,e} \geq T_{k+nt+nm}^{k,e-1} + td \qquad \forall\, k \in MR, e \in EA, f \in F \mid (((e-1) \geq lfi^{k,f})\ and\ ((e-1) < lfs^{k,f}))) \qquad (19)$$

$$T_k^{k,e} \leq T_{k+nt+nm}^{k,e-1} + td + lr \qquad \forall\, k \in MR, e \in EA, f \in F \mid (((e-1) \geq lfi^{k,f})\ and\ ((e-1) < lfs^{k,f}))) \qquad (20)$$

$$\left(\sum_{i \in NT} \sum_{j \in TMV} x_{i,j}^{k,e} = 0 \right) \rightarrow T_{k+nt+nm}^{k,e} = T_k^{k,e} + te \qquad \forall\, k \in MR, e \in E \qquad (21)$$

$$\left(\begin{array}{c}(ldm^{k,e} = odt_i)\ and \\ \left(\sum_{p\in OP}\sum_{d\in D} ft_i^{k,p,d} \geq 1\right)\ and \\ \left(\sum_{r\in NT}\sum_{j\in TMV} x_{r,j}^{k,e} = 1\right) and \\ \left(\sum_{j\in MV} x_{i,j}^{k,e} = 1\right)\end{array}\right) \rightarrow (ldm^{k,e+1} = ddt_i) \qquad \forall\, k \in MR, i \in NT, e \in EB \qquad (22)$$

$$ft_i^{k,p,d} = 1 \qquad \forall\, i \in NT, k \in MR, p \in OP,\ d \in D \mid (tdm^{k,p,d} = ddt_i) \qquad (23)$$

$$ft_i^{k,p,d} = 0 \qquad \forall\, i \in NT, k \in MR, p \in OP,\ d \in D \mid (tdm^{k,p,d} \neq ddt_i) \qquad (24)$$

$$\left(\sum_{p\in OP}\sum_{d\in D} ft_i^{k,p,d} = 0\right) \rightarrow \left(\sum_{j\in TMV} x_{i,j}^{k,e} = 0\right) \qquad \forall\, i \in NT, k \in MR, p \in OP, d \in D \qquad (25)$$

$$\left(\sum_{i\in NT}\sum_{j\in TMV} x_{i,j}^{k,e-1} = 0\right) \rightarrow (ldm^{k,e} = ldm^{k,e-1}) \qquad \forall\, k \in MR, e \in EA \qquad (26)$$

$$(ldm^{k,e} \neq odt_i) \rightarrow \sum_{j\in TMV} x_{i,j}^{k,e} = 0 \qquad \forall\, i \in NT, k \in MR, e \in E \qquad (27)$$

$$ldm^{k,1} = tdm^{k,1,1} \qquad \forall\, k \in MR \qquad (28)$$

$$\sum_{j\in NT}\sum_{e\in E} x_{k,j}^{k,e} \geq m\ bu^k \qquad \forall\, k \in MR \qquad (29)$$

$$\sum_{j\in NT}\sum_{e\in E} x_{k,j}^{k,e} \leq M\ bu^k \qquad \forall\, k \in MR \qquad (30)$$

$$he^{k,e} \geq T_{k+nt+nm}^{k,e} - T_k^{k,e} - \left(te \sum_{j\in TMV} x_{k,j}^{k,e}\right) \qquad \forall\, k \in MR, e \in E \qquad (31)$$

$$he^{k,e} \leq tl - te \qquad \forall\, k \in MR, e \in E \qquad (32)$$

$$bu^{k} \in \{0,1\} \qquad \forall\, k \in MR \tag{33}$$

$$x_{i,j}^{k,e} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i \in TMT, j \in TMT, k \in MR, e \in E \tag{34}$$

$$ft_{i}^{k,p,d} \in \{0,1\} \qquad \forall\, i \in NT, k \in MR, p \in OP, d \in D \tag{35}$$

$$T_{i}^{k,e} \in \mathbb{R}^{+} \qquad \forall\, i \in TMT, k \in MR, e \in E \tag{36}$$

$$he^{k,e} \in \mathbb{R}^{+} \qquad \forall\, k \in MR, e \in E \tag{37}$$

A função objetivo, Equação (1), representa a soma do pagamento das horas extras trabalhadas por todos os maquinistas e o pagamento de salário de todos os maquinistas que foram designados a pelo menos um trem. A hora extra é calculada como o tempo que o maquinista chega ao destacamento de destino menos o momento de início da escala do maquinista menos o tempo de escala determinado. A soma de ambos os pagamentos devem ser minimizadas.

As Restrições (2) garantem que cada trem $i \in NT$ é atendido apenas uma vez e por um único maquinista $k \in MR$. As Restrições (3) e (4) garantem que cada veículo virtual, equivalente ao maquinista $k \in MR$, na designação $e \in E$, sairá do seu respectivo depósito para atender um trem $i \in NT$ ou irá para seu depósito virtual correspondente. As Restrições (5), para cada veículo $k \in MR$ na designação $e \in E$, garante que um trem ou o depósito de origem do maquinista, $i \in TMR$, será o nó anterior ao depósito virtual de destino do veículo. As Restrições (6) determinam que apenas o veículo representando um determinado maquinista pode atender o depósito virtual do mesmo.

As Restrições (7) garantem que nenhuma viagem tem início nos depósitos virtuais e as Restrições (8) garantem que nenhuma viagem termine nos depósitos reais. As Restrições (9) garantem a conservação do fluxo. As Restrições (10) garantem que não ocorra um arco ligando o nó $i \in TMT$ para ele mesmo. As Restrições (11) e (12) definem se um maquinista é destinado a atender um trem numa designação ou não.

As Restrições (13) garantem que caso o nó $j \in TMV$ seja atendido após o nó $i \in TMR$ com o veículo $k \in MR$ na designação $e \in E$, então o instante de início do atendimento do nó $j \in TMV$ seja após o instante de início do atendimento do nó anterior $i \in TMR$ mais o tempo de viagem do mesmo. As Restrições (14) garantem que o maquinista $k \in MR$ começa a atender o trem $i \in NT$ no mesmo horário que o mesmo está disponível para iniciar a viagem. As Restrições (15) asseguram que o tempo de chegada ao depósito virtual menos o tempo de partida do veículo $k \in MR$, seja menor que o limite de tempo de trabalho de um maquinista por escala. As Restrições (16) assumem que o tempo de partida do veículo/maquinista $k \in MR$ na sua primeira designação deve ser maior ou igual ao momento de início da sequência de escalas que ele irá cumprir até a próxima folga.

As Restrições (17) e (18) definem se o maquinista irá cumprir folga, caso tenha realizado o máximo de designações para o período de planejamento. As Restrições (19) e (20) definem se o maquinista irá cumprir o descanso caso o maquinista tenha realizado menos designações que o limite estabelecido para o período de planejamento. Nas Restrições (21) caso o maquinista não tenha sido designado a atender um trem, então, o tempo de chegada ao depósito virtual é igual ao tempo de partida do veículo $k \in MR$ mais o tempo de uma escala te.

Caso o destacamento atual do maquinista seja igual à origem do trem e o maquinista possa viajar para o destacamento de destino do trem e o maquinista conduza um trem nessa escala e o maquinista esteja designado para conduzir esse trem, então as Restrições (22) garantem que o destacamento que o maquinista estará na próxima designação será o mesmo que o destacamento do destino do trem.

As Restrições (23) e (24) definem se o destino do trem é igual a um dos possíveis destacamentos de trabalho do maquinista, $ft_i^{k,p,d} = 1$, caso contrário, $ft_i^{k,p,d} = 0$. As Restrições (25) garantem que caso o destino do trem $i \in NT$ seja diferente de um dos possíveis destacamentos que o maquinista $k \in MR$ pode atender, então o maquinista não poderá ser designado para este trem.

As Restrições (26) garantem que caso o maquinista não seja alocado a nenhum trem na escala, o destacamento da próxima escala será o mesmo da escala atual.

As Restrições (27) garantem que caso o maquinista $k \in MR$ não esteja no mesmo destacamento de origem do trem $i \in NT$, então o maquinista não poderá conduzir o trem. As Restrições (28) asseguram que a primeira designação do maquinista $k \in MR$ ocorra no seu destacamento sede. As Restrições (29) e (30) definem se o maquinista $k \in MR$ teve alguma designação a trem em ao menos uma das suas escalas, $bu = 1$ e zero caso contrário.

As Restrições (31) definem as horas extras realizadas por cada maquinista em cada uma de suas escalas. As Restrições (32) limitam a quantidade de horas extras por escala de cada maquinista, ao limite de tempo de trabalho em uma escala (tl) menos o tempo de uma escala (te). As Restrições (33)-(37) definem o domínio das variáveis.

Com a definição do modelo matemático é possível calcular o número de variáveis de decisão inteiras e contínuas. Sendo as variáveis inteiras do modelo matemático: $x_{i,j}^{k,e}$, $ldm^{k,e}$, bu^{k} e $ft_{i}^{k,p,d}$, então, o modelo possui $|TMT|^2|MR||E| + |MR||E| + |MR| + |NT||MR||OP||D|$ variáveis de decisão inteiras. As variáveis contínuas são: $T_{i}^{k,e}$ e $he^{k,e}$ e, portanto, o modelo possui $|TMT||MR||E| + |MR||E|$ variáveis de decisão contínuas.

Sabendo que a quantidade de elementos do conjunto $|TMT|$ é igual a $2|MR| + |NT|$, então, é possível definir a quantidade de variáveis de decisão do modelo em função do número de elementos do conjunto maquinista $|MR|$ como:

Número de variáveis de decisão inteiras:

$$|MR|^3(4|E|) + |MR|^2(4|NT||E|) + |MR|(|NT|^2|E| + |NT||OP||D| + |E| + 1) \quad (38)$$

Número de variáveis de decisão contínuas:

$$|MR|^2(2|E|) + |MR|(|NT||E| + |E|) \quad (39)$$

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Para desenvolver o modelo e gerar o arquivo **.lp* foi utilizado o *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio* 12.8. Para resolver o modelo matemático proposto, foi utilizado o *solver* IBM CPLEX Versão 12.8 (IBM, 2018). Ambos rodaram em um computador com dois processadores Intel® Xeon® Silver 4116 CPU@ 2.10GHz+2.10GHz com 128 GB de memória RAM. Na Tabela 3 são apresentados o tempo de execução do CPLEX, o tempo de geração do arquivo **.lp*, também apresentado na Tabela 2, o tempo total para resolver a instância, a função objetivo (FO), a quantidade de maquinistas utilizados e a quantidade de horas extras geradas.

Tabela 3 - Resultados CPLEX.

Inst.	**Tempo de execução CPLEX (s)**	**Tempo de Geração do Arquivo **.lp* (s)**	**Tempo Total (s)**	**FO (R$)**	**Maqui. Utilizados (un)**	**Horas Extras (h)**
1	0,66	7,33	7,99	22.720,00	5	8
2	1,14	8,38	9,52	27.220,00	6	8
3	2,36	34,53	36,89	54.027,50	12	1
4	31,89	483,94	515,83	67.692,50	15	7
5	15,81	413,33	429,14	135.000,00	30	0
6	1.019,25	131.460,00	132.479,25	135.000,00	30	0
7	3.423,56	38.486,10	41.909,66	139.802.50	31	11
8	1.457,03	22.554,10	24.011,13	135.055,00	30	2
9	2.104,38	30.403,10	32.507,48	135.000,00	30	0
10	5.220,27	25.748,80	30.969,07	144.275,00	32	10
11	1.842,97	18.627,90	20.470,87	135.055,00	30	2
12	2.673,38	173.297,00	175.970,38	135.000,00	30	0
13	6.188,97	199.202,00	205.390,97	144.275,00	32	10
14	2.078,91	18.455,60	20.534,51	135.055,00	30	2
15	1.962,50	19.978,00	21.940,50	135.000,00	30	0
16	72.346,95	146.452,00	218.798,95	207.495,00	46	18
17	22.719,89	313.215,00	335.934,89	243.000,00	54	0
18	*não gerado*	471.864,00	*não gerado*	*não gerado*	*não gerado*	*não gerado*

Fonte: Próprio autor.

A Instância 1 conta com 6 maquinistas distribuídos por 3 destacamentos e 13 viagens de trens. A Figura 11 apresenta a designação dos 6 maquinistas aos trens. A Figura 11 ilustra a solução do modelo matemático O veículo maquinista, sai do seu depósito, para atender um trem no instante de tempo que o mesmo se torna disponível para ser conduzido. Após o trem ser atendido, o veículo maquinista se desloca para o depósito virtual equivalente. Pode se notar que após atendimento do trem o destacamento onde o maquinista se encontra é alterado para o de destino da viagem realizada anteriormente.

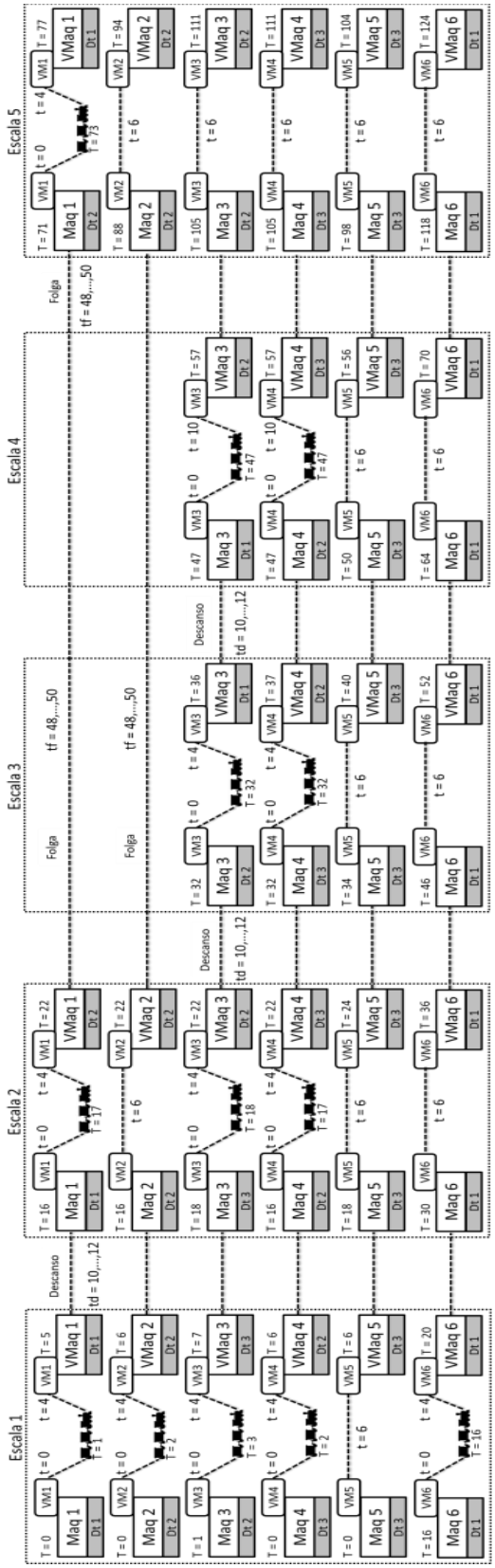

Figura 11 - Esquema de solução da Instância 1.

Fonte: Próprio autor.

O maquinista 1 (Maq 1) é designado na sua primeira escala para atender um trem que ira fazer uma viagem do tipo *vai e volta,* com início e termino no destacamento 1 (Dt 1) , sede de Maq 1. Em seguida o maquinista cumpre o tempo de descanso e retorna para cumprir a segunda escala, partindo da sua sede para o destacamento 2 (Dt 2). O maquinista 1, nesse cenário, pode realizar duas designações antes de entrar para folga de 48 horas. Após a folga ele retorna para atender mais um trem cumprindo uma escala na próxima faixa de designação.

O maquinista 2 (Maq 2) , assim como o anterior, tem como limite duas designações antes de cumprir a folga obrigatória. Na primeira escala o Maq 2 atende um trem que realiza uma viagem do tipo *vai e volta*, tendo como origem e destino o destacamento 2 (Dt 2), sede do maquinista 2. Após atender o trem, ele cumpre o período de descanso obrigatório e retorna para o Dt 2 na próxima escala, onde permanece por 6h, tempo de uma escala, pois não foi designado para atender nenhum trem. Ao termino desta escala o maquinista 2 entra no período de folga.

Os maquinistas 3 e 4, com sede nos destacamentos 2 e 3, respectivamente, são designados para atender trens em todas as 4 escalas antes de entrar na folga. Na quarta escala de cada um desses maquinistas está previsto o atendimento de um trem com tempo de viagem equivalente ao limite de tempo de trabalho por escala de um maquinista, 10 horas, sendo assim, notasse que o modelo faz a opção por aumentar o descanso em relação a escala anterior em 1hora, respeitando os limites impostos, para que o retorno do maquinista coincida com o início da partida do trem que o maquinista irá atender, tornando essa designação possível. O maquinista 5 não foi necessário para atender a demanda do planejamento, permanecendo no seu destacamento sede, Dt 3, cumprindo os tempos de cada escala e de descanso.

Por fim, o maquinista 6 é designado para atender um trem na primeira escala, realizando uma viagem do tipo *vai e volta*, tendo como origem e destino destacamento 1. Após a designação ele cumpre o período de descanso e retorna na próxima escala. Como não há mais designações ele cumpre os tempos de escala e descanso até atingir o limite de escalas, entrando no período de folga.

A Instância 2 possui 20 trens e 6 maquinistas, sendo que 2 viagens de trens possuem o tempo igual ao tempo máximo que o maquinista pode trabalhar em uma escala (10 horas). A Figura 12 apresenta a designação dos 6 maquinistas aos trens. O maquinista 1 (Maq 1) é designado na sua primeira escala para atender um trem que tem como origem o destacamento 1 (Dt 1), sede de Maq 1, e destino o destacamento 2 (Dt 2), com o tempo de viagem igual ao tempo máximo que o maquinista pode permanecer no trem. Após o a viagem o maquinista cumpre o tempo de descanso e retorna para o destacamento onde terminou a viagem anterior para cumprir a próxima escala. Na segunda escala, Maq 1 é designado para atender outro trem, que tem origem em Dt 2 e destino Dt 1. Ao termino da segunda escala, Maq 1 cumpre o descanso e retorna para cumprir mais duas designações. O mesmo ocorre com Maq 2 e Maq 4, com seus respectivos tempos de viagem e destacamentos de origem e destino. Os maquinistas 3, 5 e 6 possuem escalas nas quais não ocorre designação a trens, logo eles cumprem o tempo de escala e entram no descanso, até atingirem o limite da faixa de designação.

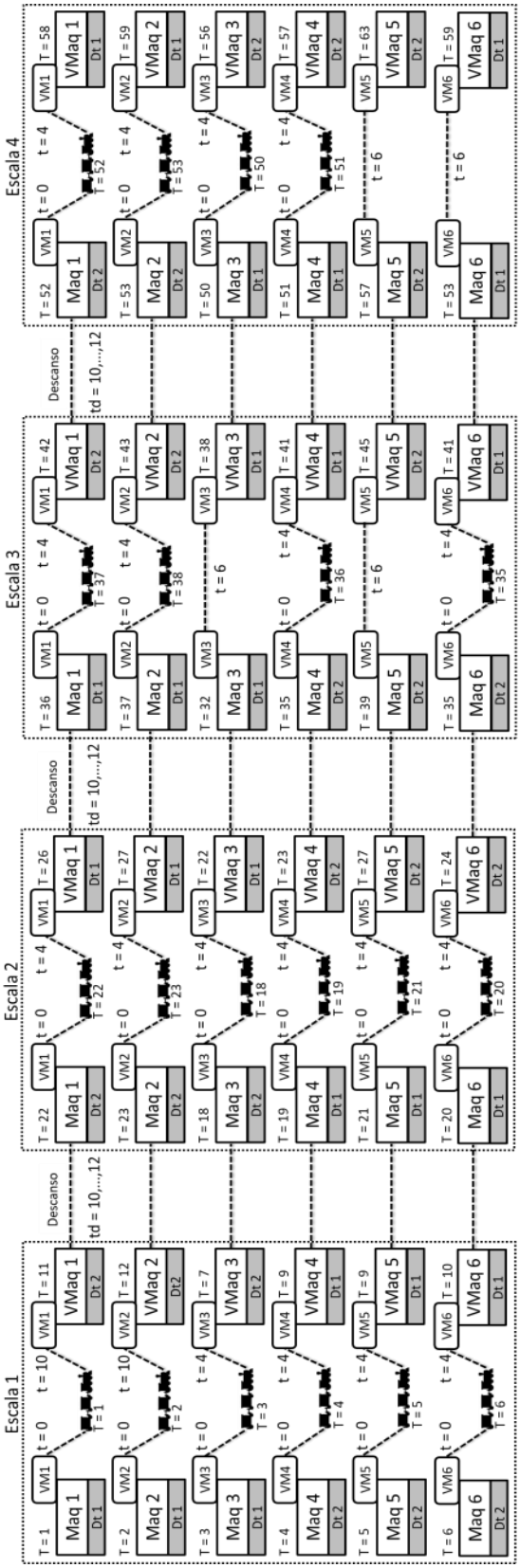

Figura 12 - Esquema de solução da Instância 2.

Fonte: Próprio autor.

As Instâncias 3 e 4 foram elaboradas para testar o planejamento das designações dos maquinistas, atendendo 6 destacamentos e viagens do tipo vai e volta. Cada trecho passa a ter um tempo de viagem específico. A Instância 3 conta com 14 maquinistas e 17 viagens de trem, Figura 13, e a Instância 4 com 20 maquinistas e 59 viagens de trem, sendo os tempos totais de processamento (tempo de geração e execução) de 36,89 e de 515,83 segundos, respectivamente. Nota-se que com o acréscimo de 6 maquinistas e 42 trens houve um crescimento do número de variáveis de decisão inteiras e contínuas que o modelo passa a analisar, Tabela 3.

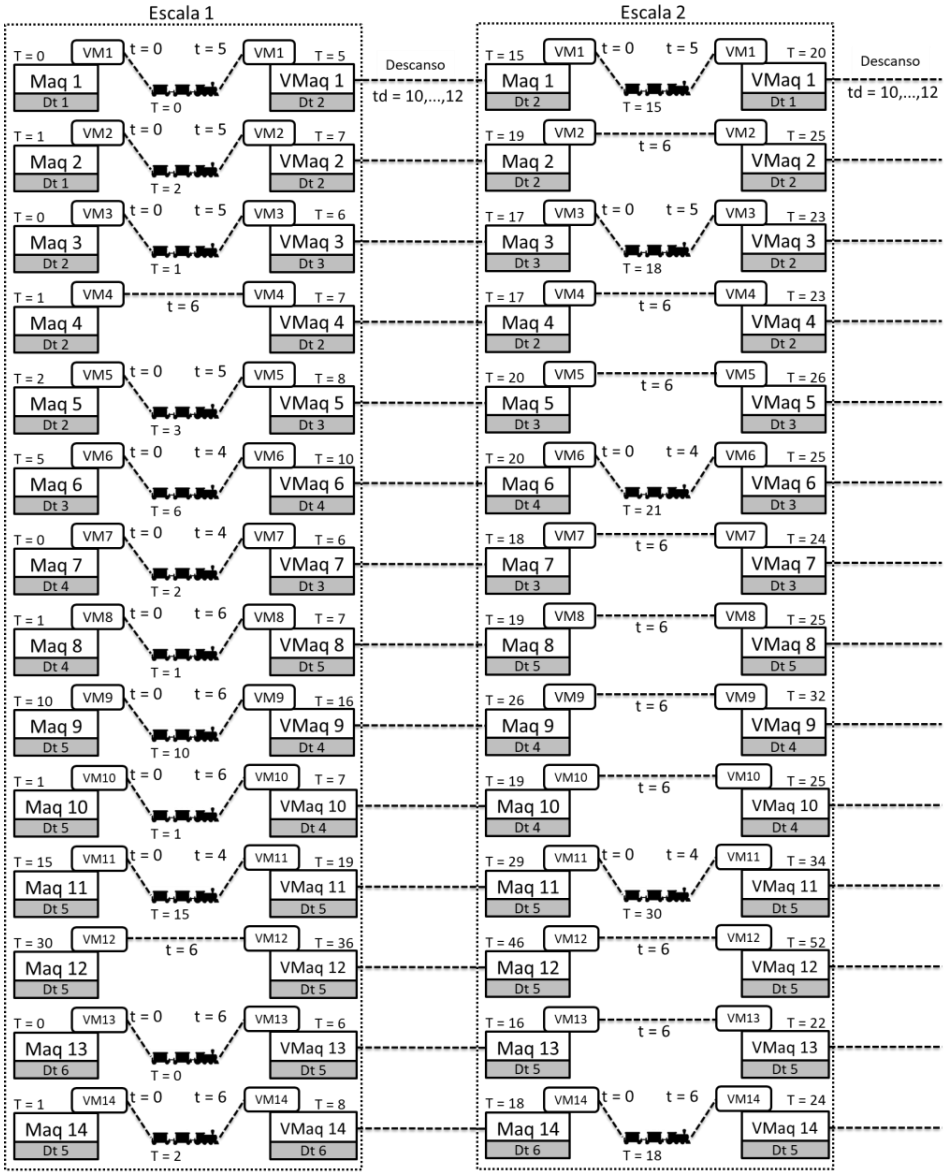

Figura 13 - Esquema de solução da Instância 3.

Fonte: Próprio autor.

Conforme visto anteriormente, as Instâncias 5 e 6 foram desenvolvidas com base no número médio de trens de minério que circulam na EFVM por dia no destacamento de Costa Lacerda, tendo ele como origem ou destino. A Instância 5 considera 3 destacamentos, 30 maquinistas, 54 viagens de trens (em um dia) e que cada maquinista pode atender no máximo 2 designações de viagem em trens em um dia em função da escala de 6 horas que eles cumprem. A Instância 6 é similar a Instância 9, porém considera 2 dias de planejamento. Desta forma, ela considera 33 maquinistas, 120 viagens de treme tem como premissa que cada maquinista pode ser designado a no máximo 4 viagens em trem. No planejamento realizado pelo CPLEX, para as duas instâncias, foram necessários 30 maquinistas e nenhuma hora extra foi paga.

O CPLEX para a Instância 5 obteve uma solução ótima com um tempo de execução de 429,14 segundos, demonstrando a capacidade do modelo em lidar com instâncias muito próximas do tamanho do problema real e podendo ser aplicável até para o replanejamento de designações caso seja necessário, dando respostas muito rápida aos planejadores da EFVM. O CPLEX para a Instância 6 obteve uma solução ótima com um tempo de execução de 132.479,25 segundos, 1,53 dias, o que não é aceitável para realidade de uma ferrovia.

As Instâncias 7 a 15 contam com 45 maquinistas e 119 viagens de trens distribuídos por 6 destacamentos. Essas instâncias representam um cenário próximo do real em relação ao número de trens referente a um dia de operação do minério de ferro e visam avaliar o impacto do tempo máximo de trabalho de um maquinista em uma escala e o limite de tempo de uma escala do maquinista. A variação do limite de tempo de trabalho de um maquinista por escala tl não ocasionou interferências na solução ótima encontrada para cada instância. Isso provavelmente ocorreu devido aos destacamentos da EFVM serem distribuídos de forma que, em condições normais, as viagens de trens não tenham duração superior ao tempo de escala dos maquinistas, ou seja, não ocorra a necessidade de fazer uso de horas extras para cumprir as viagens de trem.

O tempo de escala (te) se mostrou relevante para o planejamento das escalas. À medida que ele foi aumentado, tornou-se mais fácil de distribuir os trens usando menos maquinistas como pode ser visto nas Instancia 7 a 15. Conforme o tempo de

escala aumenta, consequentemente, as horas extras geradas ($he^{k,e}$) devem diminuir, uma vez que $he^{k,e}$ é dada em função de te, como visto na Equação 32 do Capítulo 4.

A Instância 16 conta com 60 maquinistas, 177 viagens de trens distribuídos por 6 destacamentos. O CPLEX alcançou a solução ótima igual a R$ 207.495,00. Foi utilizado 46 maquinistas e 18 horas extras realizadas, após um tempo total de geração e execução de 218.798,95 segundos, aproximadamente 2,5 dias. Observa-se que uma fração dos maquinistas que realizaram viagens não tiveram designações em todas as quatro escalas do planejamento, ou seja, o número de trens atendidos é inferir a capacidade máxima que os maquinistas podem atender. As escalas sem designações podem ser utilizadas pela empresa para que os maquinistas atendam demandas como cursos de reciclagem, exames periódicos, dentre outros.

A Instância 17 conta com 60 maquinistas, 216 viagens de trens distribuídos por 6 destacamentos e alcançou a solução ótima de R$ 243.000,00, formado por 54 maquinistas sem demanda por horas extras. O tempo total (tempo de geração e de execução pelo CPLEX) foi de 335.934,89 segundos, aproximadamente 4 dias, para alcançar a solução ótima.

A Instância 18 conta com 60 maquinistas e 432 viagens de trem. Para essa instância, utilizando o comando *oplrun*, após 5 dias de processamento, não conseguiu gerar o arquivo **.lp* para ela. Provavelmente isso ocorreu pela quantidade de variáveis analisadas pelo modelo, superior a 100 milhões de variáveis, Tabela 3. Vale ressaltar que estava sendo utilizado um computador com 128 GB de memória RAM e, mesmo assim não foi possível a geração do arquivo.

Como esperado, o CPLEX para o modelo matemático proposto, que é baseado no PRV-MD-MV, que é NP-Hard, para as Instâncias 16, 17 e 18, os tempos de geração e de execução foram superiores a dois dias, o que para a realidade do planejamento ferroviário é inviável.

Com as instâncias propostas foram analisados dois parâmetros do problema: 1) Tempo de escala e 2) Tempo máximo de permanência no trem. Os resultados para as instâncias nas quais houve o aumento do tempo de escala mostraram reduções de custo significativas. Já o parâmetro Tempo máximo de permanência apresentou ganhos moderados.

Após as análises apresentadas anteriormente, o CPLEX rodando o modelo matemático proposto mostrou ser capaz de resolver o problema de designação de maquinistas, alcançando soluções para as instâncias de maior porte que representam o planejamento global de toda a ferrovia, porém necessitando um tempo computacional grande. A abordagem por meio do modelo PRV-MD-MV se mostrou robusta, sendo uma alternativa inovadora para resolver o problema *Crew Management Problem.*

6 CONCLUSÕES

Esta dissertação analisou o problema de designação de maquinistas para conduzir trens. Este problema é complexo e muitas ferrovias carecem de ferramentas computacionais para realizar o planejamento dessa designação, apesar do custo com pagamento de maquinistas ser um dos maiores custos da operação ferroviária.

Na literatura, este problema é tratado de forma separada por dois subproblemas: Crew Scheduling e Crew Rostering. Diferentemente, este artigo propôs um modelo matemático para resolver de forma integrada os dois subproblemas, inspirado no Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplas Viagens e Múltiplos Depósitos, para planejar a designação de maquinistas para atender aos trens que passarão pelos destacamentos buscando minimizar o custo com pagamento de maquinistas.

As instâncias analisadas mostraram que o CPLEX conseguiu resolver as instâncias que representam um dia de operação em um determinado trecho da ferrovia, levando menos de 16 segundos de execução para alcançar uma solução ótima.

Foram analisados dois parâmetros do problema: 1) Tempo de escala e 2) Tempo máximo de permanência no trem. Em relação ao tempo de escala, os resultados mostraram que um aumento neste parâmetro pode trazer reduções de custo importantes. Já o parâmetro Tempo máximo de permanência apresentou ganhos modestos. Para mudar qualquer um deles a ferrovia deve negociar com os sindicatos, o que é uma tarefa difícil. Assim, os resultados sugerem que é mais proveitoso uma negociação em aumento do tempo de escala de 6 para 8 horas.

Em função dos testes realizados, o modelo proposto, demonstra ser uma ferramenta funcional para designação de maquinistas de forma a atender os trens, podendo vir a ser adotada como um mecanismo de apoio para o planejamento e replanejamento da operação das ferrovias e por buscar a minimização do pagamento de horas extras e a redução de maquinistas utilizados, pode vir a trazer ganhos financeiros para a ferrovia.

O CPLEX rodando o modelo matemático proposto desempenhou bem seu objetivo de planejar a designação de maquinistas a trens, contudo seu tempo de processamento para instâncias próximas do real se tornou muito grande, em alguns casos dias, o que inviabiliza seu uso para planejamento diário da designação.

Pode-se concluir que o modelo matemático proposto é uma ferramenta aplicável ao problema de planejamento da designação de maquinistas a trens da EFVM, dando resposta em curto espaço de tempo para instâncias pequenas, respeitando todas as imposições legais e todas as normas internas da ferrovia.

Propõe-se como possível continuação da pesquisa a elaboração de uma meta-heurística para resolver o modelo proposto a fim de que instâncias com maior número de trens e de maquinistas possam ser resolvidas, reduzindo o tempo de execução para alcançar uma solução ótima.

REFERÊNCIAS

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres (2018). Disponível em: http://www.antt.gov.br/ Acessado em: 06 de janeiro de 2018.

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres. Anuário Estatístico 2019. Disponível em: http://www.antt.gov.br/salaImprensa/noticias/arquivos/2019/01/ANTT_publica_anuario_estatistico_ferroviario_2019.html. Acesso em: 26 de janeiro de 2019.

BARNHART, Cynthia et al. Airline crew scheduling. In: **Handbook of transportation science**. Springer, Boston, MA, 2003. p. 517-560.

BRAEKERS, Kris; RAMAEKERS, Katrien; VAN NIEUWENHUYSE, Inneke. The vehicle routing problem: State of the art classification and review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 99, p. 300-313, 2016.

BRASIL, Decreto-lei n.º 5.452, de 1º de maio de 1943. Consolidação das Leis do Trabalho – CLT. Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil, Brasília, 1° de maio de 1943. p. 11937.

CAPRARA, Alberto *et al.* Algorithms for railway crew management. **Mathematical programming**, v. 79, n. 1-3, p. 125-141, 1997.

CAPRARA, Alberto; FISCHETTI, Matteo; TOTH, Paolo. A heuristic method for the set covering problem. **Operations research**, v. 47, n. 5, p. 730-743, 1999.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. Anuário CNT do Transporte 2017 – Estatísticas Consolidadas. Disponível em: http://anuariodotransporte.cnt.org.br/. Acesso em: 02 de fevereiro de 2018.

CORDEAU, J., STOJKOVIĆ, G., SOUMIS, F., DESROSIERS, J. Benders decomposition for simultaneous aircraft routing and crew scheduling. **Transportation Science**, v. 35, n. 4, p. 375-388, 2001.

DE CARVALHO, Marco Antonio Moreira; DOS SANTOS, André Gustavo. Algoritmo genético aplicado à seleção de colunas no problema de alocação de tripulações. **Anais do XII Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA–XII ENCITA-**Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil, Outubro, v. 16.

DREXL, Michael *et al.* Simultaneous vehicle and crew routing and scheduling for partial-and full-load long-distance road transport. **Business Research**, v. 6, n. 2, p. 242-264, 2013.

FERNANDES, L.F.D. **Novo modelo de gestão para alocação e controle de equipagens-Caso MRS Logística SA**. Monografia. (Especialização em transporte ferroviário de carga). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

EL-SHERBENY, Nasser A. Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. **Journal of King Saud University-Science**, v. 22, n. 3, p. 123-131, 2010.

ERNST, Andreas T. *et al*. An integrated optimization model for train crew management. **Annals of Operations Research**, v. 108, n. 1-4, p. 211-224, 2001.

ERNST, Andreas T. et al. Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models. **European journal of operational research**, v. 153, n. 1, p. 3-27, 2004.

GOEL, Asvin. Truck driver scheduling in the European Union. **Transportation Science**, v. 44, n. 4, p. 429-441, 2010.Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., & Sier, D. (2004). Staff scheduling and rostering : A review of applications , methods and models, *153*, 3–27. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00095-X

GONÇALVES, Rodrigo Almeida et al. Sistemas inteligentes para planejamento de escalas de equipagens em sistemas de transporte: aplicação a sistemas ferroviarios. 2000.

GOPALAKRISHNAN, Balaji; JOHNSON, Ellis L. Airline crew scheduling: state-of-the-art. **Annals of Operations Research**, v. 140, n. 1, p. 305-337, 2005.

GUTTKUHN, Rainer *et al.* Simulation planning and rostering: a discrete event simulation for the crew assignment process in north american freight railroads. In: **Proceedings of the 35th conference on Winter simulation: driving innovation**. Winter Simulation Conference, 2003. p. 1686-1692.

HANAFI, Rosmalina; KOZAN, Erhan. A hybrid constructive heuristic and simulated annealing for railway crew scheduling. ***Computers & Industrial Engineering***, v. 70, p. 11-19, 2014.

IBM. *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6*. **Using logical constraints**. Disponível em: <https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/pt-br/SSSA5P_12.7.1/ilog.odms.ide.help/OPL_Studio/opllanguser/topics/opl_languser_app_areas_cplex_using.html>. Acesso em: 17 nov. 2017.

JÜTTE, Silke *et al.* Optimizing railway crew scheduling at DB Schenker. **Interfaces**, v. 41, n. 2, p. 109-122, 2011.

JÜTTE, Silke; THONEMANN, Ulrich W. Divide-and-price: A decomposition algorithm for solving large railway crew scheduling problems. **European Journal of Operational Research**, v. 219, n. 2, p. 214-223, 2012.

JÜTTE, Silke; THONEMANN, Ulrich W. A graph partitioning strategy for solving large-scale crew scheduling problems. **OR spectrum**, v. 37, n. 1, p. 137-170, 2015.

KASIRZADEH, Atoosa; SADDOUNE, Mohammed; SOUMIS, François. Airline crew scheduling: models, algorithms, and data sets. **EURO Journal on Transportation and Logistics**, v. 6, n. 2, p. 111-137, 2017.

KOUBÂA, Mayssa *et al.* Truck driver scheduling problem: literature review. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 12, p. 1950-1955, 2016.

LIN, Canhong *et al.* Survey of green vehicle routing problem: past and future trends. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 4, p. 1118-1138, 2014.

MEDARD, Claude P.; SAWHNEY, Nidhi. Airline crew scheduling from planning to operations. **European Journal of Operational Research**, v. 183, n. 3, p. 1013-1027, 2007.

MONTOYA-TORRES, Jairo R. et al. **A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots**. Computers & Industrial Engineering, v. 79, p. 115-129, 2015.

RODRIGUES, R. S. **Alocação eficiente da tripulação nos trens da MRS Logística**. Monografia Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.

ROSA, Rodrigo de Alvarenga; RIBEIRO, Rômulo Castello Henriques. **Estradas de ferro: projeto, especificação & construção**. Vitória, ES: EDUFES, 2016. 351 p. ISBN 9788577723454 (broch.).

VALE S/A, INFOGRÁFICO EFVM, Espírito Santo, 2011.

WEI, Guo; YU, Gang; SONG, Mark. **Optimization model and algorithm for crew management during airline irregular operations**. Journal of Combinatorial Optimization, v. 1, n. 3, p. 305-321, 1997.

VAN DEN BERGH, Jorne et al. Personnel scheduling: A literature review. **European journal of operational research**, v. 226, n. 3, p. 367-385, 2013.