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

Franco Collodetti Mazioli
Rodrigo de Alvarenga Rosa
Universidade Federal do Espírito Santo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Matheus da Silva Gravel
Vivian Parreira
Vale S.A.

RESUMO
Nas ferrovias, trens circulam para transportar cargas e cada trem é conduzido por um maquinista. As ferrovias de cargas possuem grandes extensões e, o tempo de viagem dos trens da origem ao destino é, geralmente, superior a escala de trabalho do maquinista, sendo necessário realizar a troca de maquinistas durante a viagem. As ferrovias são divididas em trechos onde existe um destacamento, onde os maquinistas se apresentam para conduzir os trens e onde ocorre a troca de maquinista. Este artigo propõe um modelo matemático para elaboração da designação de maquinistas para atender os trens que passarão pelo destacamento, buscando minimizar o pagamento de horas extras e atendendo as determinações legais. O modelo propõe uma abordagem diferente para descrever matematicamente o problema, algo que ainda não foi encontrado na literatura. Os resultados demonstram a efetividade no planejamento das designações dos maquinistas, podendo proporcionar economia com o pagamento de horas extras.

ABSTRACT
Freight trains transport several types of cargo and each train is driven by an engine driver. Freight railways have large extensions and, thus, the trains' travelling time, from the origin to the destination, is generally bigger than the engine driver work shift. Therefore, the engine driver must be replaced during the trains travelling time. 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. This article proposes a mathematical model to plan the designation of the engine driver to drive the trains passing through the detachment, aiming to minimize the payment of overtime and complying with legal determinations. The model proposes a different approach to describe the problem mathematically, something new in the literature. The results demonstrate the effectiveness in planning the designations of engine drivers and can provide savings with the payment of overtime.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Ministério dos Transportes, 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 carga são formados trens para atender a demanda de transporte de cargas. Para que os trens possam circular pela malha ferroviária devem ser designados maquinistas, que são profissionais treinados para operá-los (ROSA, 2016). As ferrovias brasileiras de cargas possuem grandes extensões e o tempo de viagens dos trens desde sua origem até o seu destino é, via de regra, superior ao tempo de uma escala de trabalho do maquinista. Assim, as ferrovias são divididas em trechos. Para cada trecho é designado um local como sede de um conjunto de maquinistas. Desta forma, faz-se necessário, na maioria das vezes, realizar a troca de maquinistas durante a viagem do trem. Cada maquinista realiza uma viagem por escala, conduzindo um trem entre dois destacamentos contíguos, sendo um deles sempre a sua sede. Por questões de segurança a troca de maquinista ocorre sempre em um destacamento.

Também devem ser designados maquinistas para os trens que iniciam a viagem no trecho do destacamento.

No problema estudado nesse artigo, os maquinistas trabalham em regime de escala com seis horas de duração cada. As escalas começam de hora em hora, sendo que em cada escala existe um conjunto de maquinistas disponível. 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, deve se proceder a designação de maquinistas aos trens programados de forma a evitar a geração de hora extra, i.e., momento de chegada do trem no próximo destacamento menos o momento de fim da escala do maquinista.

Desta forma, esse artigo propõe um modelo matemático para alocação de maquinistas a trens que realizam viagens de longa distância, tendo como objetivo a minimização dos custos com o pagamento de horas extras, atendendo os princípios legais e normas adotadas pela empresa. Para avaliar o modelo proposto o mesmo foi aplicado a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM). Na ferrovia estudada, a designação de maquinistas a trens é realizada de forma manual e, portanto, propostas de ferramentas de otimização que venham a apoiar o planejamento da designação de maquinistas são importantes para reduzir o tempo de planejamento, bem como apresentar soluções otimizadas reduzindo os custos de pagamento de horas extras com maquinistas.

A Seção 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre o planejamento de escalas de maquinistas em ferrovias de carga. Na Seção 3, são apresentados o estudo de caso e as instâncias de teste. Na Seção 4, apresenta-se o modelo matemático proposto. Na Seção 5 são apresentados os resultados obtidos. Por fim, na Seção 6, tem-se aas conclusões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como o presente artigo trata do problema de designação de maquinistas a trens em ferrovias em longa distância com necessidade de trocar maquinistas ao longo da viagem e designar maquinistas para trens iniciando a viagem, essa seção apresenta uma revisão bibliográfica sobre a designação de maquinistas a trens, sobretudo, em trens que realizarão viagens de longa distancia, ou seja, não foi tratado designação de maquinista no contexto de trens urbanos. A seguir é apresentada a revisão bibliográfica sobre o assunto.

Hanafi e Kozan (2014) em seu artigo tratam o problema de alocação de equipes (maquinista e auxiliar de maquinista), definindo sua sequência de atividades para atender a programação de trens de carga. O problema possui um conjunto de destacamentos, onde as equipes são locadas, e um conjunto de pontos de descanso. Para solucionar o problema foi proposta uma meta-heurística *Simulated Anealling*. Jütte et al. (2011) descreveram o desenvolvimento e implementação do software de programação de equipagem na DB Schenker baseado em Geração de Colunas para geração da matriz de trabalho. As atividades executadas pelos maquinistas têm início e termino no mesmo destacamento, sede do maquinista, sendo a lista de atividades geradas diariamente.

Jütte e Thonemann (2012) abordaram o problema de programação da tripulação em ferrovias de transporte de cargas. As escalas da tripulação se originam e terminam no mesmo destacamento. Jütte e Thonemann (2015) acrescentaram ao trabalho de 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. Caprara et al. (1997), trataram os problemas de agendamento e do escalonamento da tripulação ferroviária para atender uma programação diária cíclica. Eles utilizaram Relaxação Lagrangeana para solução dos modelos matemáticos.

Ernst et al. (2001) propuseram um modelo matemático para resolver os problemas de agendamento e do escalonamento das equipes de uma ferrovia de transporte de cargas. Em cada escala as equipes realizam uma sequência de viagens podendo concluir a escala na estação onde eles estão lotados ou em estações diferentes das suas. O problema tratado possibilita que o maquinista se desloque sem necessariamente estar conduzindo um trem. O modelo foi testado com dados de uma ferrovia australiana.

Após esta revisão, foi constatado que poucos artigos foram publicados sobre a designação de maquinistas a viagens em trem de longa distância, sendo que muitos deles resolvem problemas muito específicos de cada ferrovia.

3. ESTUDO DE CASO E GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS DE TESTES

A Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), situada entre os Estados do Espírito Santo e Minas Gerais possui uma extensão de 895 km de via (ANTT, 2018). Ela transporta minério de ferro, produtos agrícolas e produtos siderúrgicos do interior do estado de Minas Gerais até o porto de Tubarão no Espírito Santo. No ano de 2016, a EFVM movimentou 129 milhões de toneladas úteis de produtos. A EFVM conta com 6 destacamentos distribuídos por sua malha (Figura 1). Cada destacamento conta com um quadro de maquinistas para atender a demanda diária de condução dos trens que passam ou se originam nele.

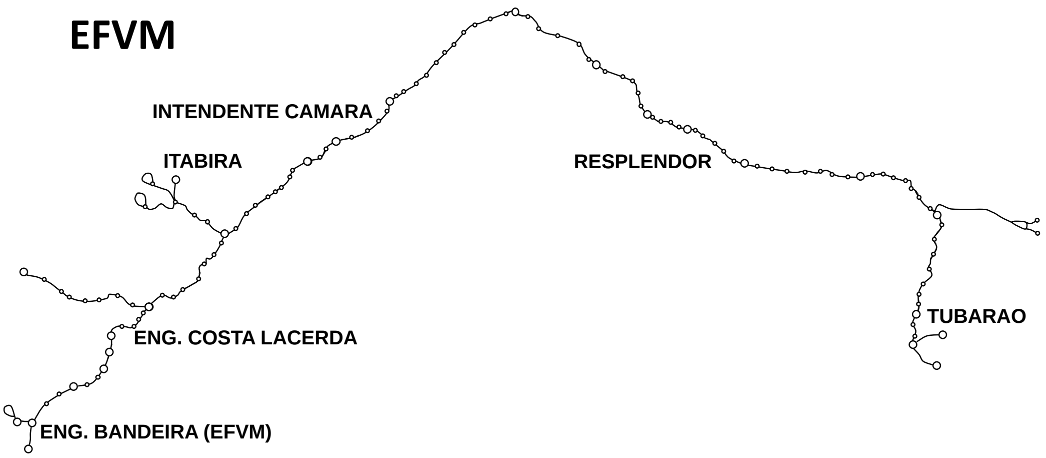
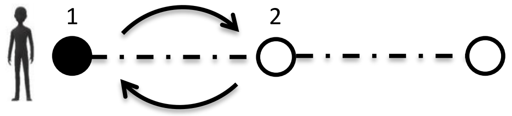


Figura 1: Destacamentos EFVM.
Fonte: Adaptado de EFVM (2011).

O trabalho dos maquinistas no Brasil é regulamentado pela Seção V, do Capítulo I, Título III da Consolidação das Leis Trabalhistas (CLT) (Brasil, 1943). A CLT define que: 1) a duração máxima das escalas de trabalho é de 12 horas; 2) após cada jornada de trabalho deve haver um descanso mínimo de 10 horas contínuas. O transporte ferroviário de cargas no Brasil, em geral, tem como característica viagens por longas distâncias, o que leva a trens com tempo de viagem superior 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 do destacamento onde estão lotados para outro destacamento contiguo a esse como mostra a Figura 2, usualmente, conduzindo somente um trem em cada escala. Cada destacamento possui sua respectiva equipe de maquinistas. O destacamento onde o maquinista está lotado é denominado destacamento sede do maquinista.



1- Destacamento sede do maquinista; 2- Destacamento de troca

Figura 2: Trecho atendido pelo maquinista.

Os maquinistas após realizarem uma viagem entram num período de descanso de no mínimo 10 horas, segundo a CLT, retornando na escala seguinte para conduzir um novo trem no mesmo trecho da escala anterior. Quando esse descanso ocorre fora do destacamento de lotação do maquinista é denominado descanso fora de sede. As demais determinações da CLT devem ser atendidas. No levantamento feito junto a EFVM, foi constatado que os maquinistas trabalham escalas de 6 horas e possuem um limite máximo de horas trabalhadas dentro do trem de 10 horas. A escala do maquinista é feita por um empregado designado pela empresa que utiliza sua experiência para elaborar a designação dos maquinistas aos trens, atendendo as restrições descritas anteriormente.

As instâncias para testar o modelo matemático proposto foram elaboradas com base nos dados levantados junto a EFVM. Foram elaboradas quatro instâncias Tabela 1, variando número de maquinistas, número de destacamentos, número de trens e número de escalas (quantidade de vezes que o maquinista se apresenta para trabalhar no período de planejamento). Para todas as instâncias o limite máximo de permanência do maquinista no trem é estabelecido em 10 horas, o tempo de escala é de 6 horas, o tempo de descanso entre escalas é de 10 horas e a folga após o limite de designações é igual a 48 horas.

A Instância 1 é um a instância de teste com dados aleatórios, contando com 4 maquinistas distribuídos por 3 destacamentos e 12 trens irão circular. 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. A Instância 2 possui 20 trens e 6 maquinistas, sendo que 2 trens possuem o tempo de viagem 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 poder apresentar graficamente a solução.

A Instância 3 foi desenvolvida com base no número médio de trens que circulam na EFVM por dia no trecho entre os destacamentos de Intendente Câmara e Costa Lacerda. Ela considera 2 destacamentos, 28 maquinistas, 50 trens (por dia) e que cada maquinista pode cumprir até 2 designações de viagem em um dia. A Instância 4 é similar a Instância 3, porém ela contempla 2 dias de planejamento. Desta forma, ela considera 108 trens e que cada maquinista pode ser designado a até 4 viagens. Ambas foram criadas para 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.

Tabela 1: Dados das instâncias de teste.

Instância	Nº de Maquinistas	Nº de Destacamentos	Nº de Trens	Nº de Escalas
1	4	3	12	4
2	6	2	20	4
3	28	2	50	2
4	28	2	108	4

4. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

Cada maquinista é designado para trabalhar em um trecho específico entre dois destacamentos que ele pode atender. A viagem completa de um trem é dividida em vários trechos. Os trens são caracterizados com seu destacamento de origem e o de destino em cada trecho. Para um maquinista ser alocado a um trem, ambos devem estar no mesmo local de início da viagem, assim como o trem deve estar destinado para viajar no mesmo trecho que o maquinista trabalha. À medida que os maquinistas atendem os trens é atribuído o mesmo destino do trem ao maquinista, possibilitando identificar o novo local que o maquinista se encontra para prosseguir a programação. Foram adotadas como premissas que cada maquinista realiza viagens em apenas um determinado trecho e atende apenas um trem, designação, por escala. Ao final de cada escala os maquinistas possuem um período de descanso obrigatório. Após o descanso, os maquinistas retornam para o destacamento e iniciam a escala seguinte, podendo ou não atender um trem. No modelo matemático proposto, podem existir maquinistas que não são designados para atender nenhum trem na sua escala de trabalho. No entanto, nenhum trem pode deixar de ser atendido, ou seja, ter um maquinista designado para ele.

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 et al., 2016). Para adaptar o PRV-MD-MV ao problema de designação de maquinista a trem, 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 e é limitada ao tempo máximo de permanência do maquinista no trem. Um veículo/maquinista pode ou não atender trens em uma viagem e, caso o maquinista não atenda nenhum trem, é considerado que o tempo de viagem do veículo é igual ao período de uma escala de trabalho do maquinista, isto no modelo é visto como uma designação nula. Ao fim da viagem o veículo/maquinista retorna para seu respectivo depósito virtual e, no caso do problema de designação de maquinistas, o veículo deve ficar parado até o início de outra viagem, representando o descanso obrigatório dos maquinistas entre escalas. Essa definição pode ser vista na Figura 3.

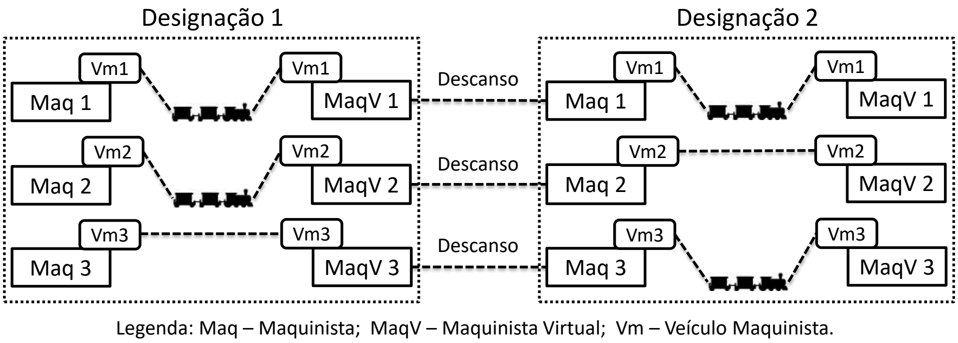


Figura 3: Esquema da abordagem do problema representando um painel de designações de maquinistas.

Sabendo que nm - Número de maquinistas disponíveis; nt - Número de trens a serem atendidos; ne - Número máximo de designações dos maquinistas e nd - Número de destacamentos, pode-se definir os conjuntos do modelo (Figura 4): MR - Conjunto dos maquinistas reais, $MR \in \{1 \ldots nm\}$; NT - Conjunto dos trens, $NT \in \{(nm+1) \ldots (nm+nt)\}$; MV - Conjunto dos maquinistas virtuais, $MV \in \{(1+ nm+nt) \ldots (2nm+nt)\}$; TMR - Conjunto dos maquinistas reais e trens, $TMR \in \{1 \ldots (nm+nt)\}$; TMV - Conjunto dos maquinistas virtuais e trens, $TMV \in \{(nm+1) \ldots (2nm+nt)$; TMT - Conjunto de todos os nós, $TMT \in \{1 \ldots (2nm+nt)\}$; E - Conjunto de designações, $\{1 \ldots ne\}$; EA - Conjunto auxiliar de designação, não considerando a primeira escala, $EA \in \{2 \ldots ne\}$; EB - Conjunto auxiliar de designação, não considerando a última escala, $EB \in \{1 \ldots (ne-1)\}$; D - Conjunto de destacamentos $D \in \{1 \ldots nd\}$; e D^k- conjuntos com os destacamentos que o maquinista k pode trabalhar, $D^k \subset D$.

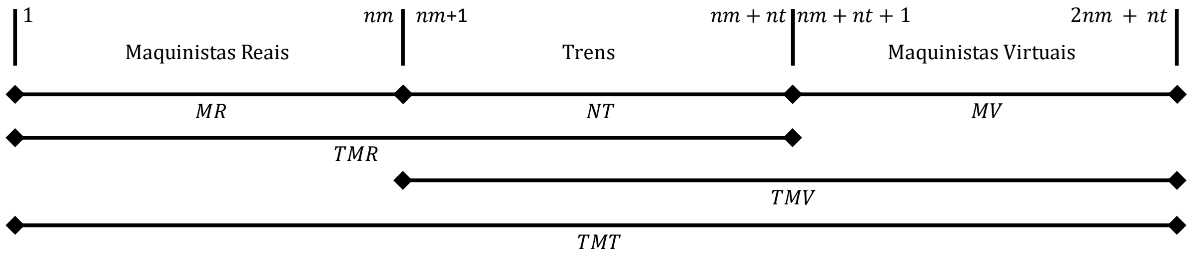


Figura 4: Conjuntos do modelo matemático.

Os parâmetros do modelo são: t_i - Tempo gasto no nó $i \in TMT$. No caso dos nós pertencentes à NT, este parâmetro representa o tempo de viagem do trem. No caso dos nós pertencentes à MR e à MV, esse tempo é igual a 0; s^k - Início da escala do maquinista $k \in MR$ na primeira designação; a_i - Momento de chegada do trem no destacamento, $i \in NT$; tl - Limite de tempo de viagem dos maquinistas no trem; te - Tempo de uma escala do maquinista; td - Tempo de descanso ao término de uma escala; tf - Tempo de folga após atender uma sequência de designações; odt_i - Destacamento de origem do trem $i \in NT$; ddt_i - Destacamento de destino do trem $i \in NT$; $tdm^{k,d}$ - Destacamentos $d \in D^k$ que o maquinista $k \in MR$ atende. Sendo que o destacamento sede será sempre quando $d=1$; mxd^k- Número máximo de designações antes de sair para folga do maquinista $k \in MR$; e M - Valor grande para lógica do modelo.

As variáveis de decisão do modelo 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 nós $i,j \in TMT$ e, 0 caso contrário; $T_i^{k,e}$ - Momento que o maquinista $k \in MR$, na designação $e \in E$, inicia a viagem, em um nó $i \in TMT$; $ldm^{k,e}$ - Destacamento onde o maquinista $k \in MR$ está na designação $e \in E$; $et^{k,e}$ - Variável binária que assume o valor igual a 1 se o maquinista $k \in MR$, na designação $e \in E$, atender algum trem e 0 caso contrário; e $dm^{k,e}$ - Número de designações realizadas pelo maquinista $k \in MR$ até a designação $e \in E$. Antes de definir as restrições, é necessária explicar que foi utilizado nas Restrições (16)-(22) a notação "$=>$" que é própria do *solver* CPLEX Versão 12.7 para representar no modelo matemático proposto uma restrição lógica com a função de implicação (IBM, 2017). 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. A partir das descrições anteriores, são apresentadas a seguir a função objetivo e as restrições do modelo matemático proposto.

Função Objetivo:

$$Minimizar \sum_{k \in MR} \sum_{e \in E} T_{k+nt+nm}^{k,e} - (s^k + te) \sum_{j \in NT} x_{k,j}^{k,e} \quad (1)$$

Sujeito a:

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

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

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

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

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

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

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

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

$$T_j^{k,e} \geq T_i^{k,e} + t_i\, x_{i,j}^{k,e} - \left(1 - x_{i,j}^{k,e}\right)M \qquad \forall i \in TMR, j \in TMV,\ k \in MR,\ e \in E \quad (10)$$

$$T_i^{k,e} = a_i \left(x_{i,k+nt+nm}^{k,e} + \sum_{j \in NT} x_{i,j}^{k,e} \right) \qquad \forall i \in NT,\ k \in MR,\ e \in E \quad (11)$$

$$T_{k+nt+nm}^{k,e} - T_k^{k,e} \leq tl \sum_{j \in NT} x_{k,j}^{k,e} \qquad \forall k \in MR, e \in E \quad (12)$$

$$T_k^{k,1} \geq s^k \qquad \forall k \in MR \quad (13)$$

$$x_{i,i}^{k,e} = 0 \qquad \forall i \in TMT, k \in MR,\ e \in E \quad (14)$$

$$dm^{k,e} = \sum_{j \in NT} \sum_{ex \in E | ex \leq e} x_{k,j}^{k,e} \qquad \forall k \in MR, e \in E \qquad (15)$$

$$(dm^{k,e-1} \geq mxd^k) \; and \; (et^{k,e-1} = 0) \Rightarrow T_k^{k,e} \geq T_{k+nt+nm}^{k,e-1} + te + tf \qquad \forall k \in MR, e \in EA \qquad (16)$$

$$(dm^{k,e-1} \geq mxd^k) \; and \; (et^{k,e-1} \geq 1) \Rightarrow T_k^{k,e} \geq T_{k+nt+nm}^{k,e-1} + tf \qquad \forall k \in MR, e \in EA \qquad (17)$$

$$(dm^{k,e-1} \leq mxd^k - 1) \; and \; (et^{k,e-1} = 0) \Rightarrow T_k^{k,e} \geq T_{k+nt+nm}^{k,e-1} + te + td \qquad \forall k \in MR, e \in EA \qquad (18)$$

$$(dm^{k,e-1} \leq mxd^k - 1) \; and \; (et^{k,e-1} \geq 0) \Rightarrow T_k^{k,e} \geq T_{k+nt+nm}^{k,e-1} + td \qquad \forall k \in MR, e \in EA \qquad (19)$$

$$(ldm^{k,e} = odt_i) \; and \left(\sum_{j \in MV} x_{i,j}^{k,e} = 1 \right) and \; (et^{k,e} = 1) \Rightarrow (ldm^{k,e+1} = ddt_i) \qquad \forall i \in NT, k \in MR, \; e \in EB \qquad (20)$$

$$(et^{k,e-1} = 0) \Rightarrow (ldm^{k,e} = ldm^{k,e-1}) \qquad \forall k \in MR, e \in EA \qquad (21)$$

$$(ldm^{k,e} \neq odt_i) \Rightarrow \sum_{j \in TMV} x_{i,j}^{k,e} = 0 \qquad \forall i \in NT, k \in MR, e \in E \qquad (22)$$

$$\sum_{\substack{d \in D^k | \\ tdm^{k,d} \neq odt_i}} (ddt_i - tdm^{k,d}) \sum_{j \in TMV} x_{i,j}^{k,e} = 0 \qquad \forall i \in NT, k \in MR, e \in E \qquad (23)$$

$$ldm^{k,1} = tdm^{k,1} \qquad \forall k \in MR \qquad (24)$$

$$et^{k,e} = \sum_{i \in NT} \sum_{j \in MV} x_{i,j}^{k,e} \qquad \forall k \in MR, e \in E \qquad (25)$$

$$et^{k,e} \in \{0, 1\} \qquad \forall k \in MR, e \in E \qquad (26)$$

$$x_{i,j}^{k,e} \in \{0, 1\} \qquad \forall i \in TMT, j \in TMT, \; k \in MR, \; e \in E \qquad (27)$$

$$T_i^{k,e} \in \mathbb{R}^+ \qquad \forall i \in TMT, k \in MR, \; e \in E \qquad (28)$$

$$dm^{k,e} \in \{1, mxd^k\} \qquad \forall k \in MR, e \in E \qquad (29)$$

$$ldm^{k,e} \in D^k \qquad \forall k \in MR, e \in E \qquad (30)$$

A função objetivo, Equação (1), representa a soma das horas extras trabalhadas por todos os maquinistas. A hora extra é calculada como o tempo que o maquinista chega no destacamento de destino menos o momento de início da escala do maquinista menos o tempo de escala determinado para todos os maquinistas. Ela deve ser minimizada. 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 deposito virtual correspondente. As Restrições (5), para cada veículo virtual $k \in MR$ 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 virtual. 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 caso o nó $j \in TMV$ seja atendido após o nó $i \in TMR$ com o veículo $k \in MR$ na designação $e \in E$ que 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 (11) 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 (12) asseguram que o tempo de chegada ao depósito virtual menos o tempo de partida do veículo virtual $k \in MR$, seja menor que o limite de tempo de permanência do maquinista no trem. As Restrições (13) assumem que o tempo de partida do veículo/maquinista $k \in MR$ na sua primeira designação deve ser maior ou igual ao início do momento de início da sequência de escalas que ele irá cumprir até a próxima folga. As Restrições (14) garantem que não ocorra um arco ligando o nó $i \in TMT$ para ele mesmo.

As Restrições (15) definem quantas designações o maquinista cumpriu até uma determinada escala. As Restrições (16) e (17) definem se o maquinista irá cumprir folga e as Restrições (18) a (19) definem se o maquinista irá cumprir o descanso obrigatório. Nas Restrições (16) e (17) ocorrem caso o maquinista tenha realizado mais designações que o limite estabelecido para o período de planejamento. Nas Restrições (16), o maquinista não foi designado a trem, e, então, é computado o tempo de escala te mais o tempo de folga tf. Nas Restrições (17), ele foi designado a trem, e, então, é computado somente o tempo de folga tf. Nas Restrições (18) e (19) ocorrem caso o maquinista tenha realizado menos designações que o limite estabelecido para o período de planejamento. Nas Restrições (18), o maquinista não foi designado a trem, e, então, é computado o tempo de escala te mais o tempo de descanso obrigatório td. Nas Restrições (19), ele foi designado a trem, e, então, é computado somente o tempo de descanso obrigatório td.

Caso o destacamento atual do maquinista for igual à origem do trem e o maquinista esteja designado para conduzir esse trem, as Restrições (20) garantem que o destacamento que o maquinista estará na próxima designação será o mesmo que o destacamento do destino do trem. As Restrições (21) garantem que caso o maquinista não seja alocado a nenhum trem na designação, o destacamento da próxima designação será o mesmo do destacamento da designação atual. As Restrições (22) 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. Caso o maquinista venha a conduzir um trem, as Restrições (23) garantem que o destino do trem tenha que ser igual a um dos possíveis destacamentos de trabalho do maquinista. As Restrições (24) asseguram que a primeira designação do maquinista $k \in MR$ ocorra no seu destacamento sede. As Restrições (25) definem se um maquinista é designado a um trem numa designação ou não, gerando uma designação nula, ou seja, o maquinista não atende nenhum trem dentro de sua escala. As Restrições (26)-(30) definem o domínio das variáveis.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Para resolver o modelo matemático proposto, foi utilizado o *solver* IBM CPLEX Versão 12.7 em um computador com processador Intel i7 com 16 GB de memória RAM. Os resultados alcançados pelo CPLEX para as quatro instâncias testadas são apresentados na Tabela 2. Para todas as instâncias o CPLEX alcançou a solução ótima.

Tabela 2: Resultados do CPLEX.

Instância	Tempo de Execução (s)	Função Objetivo (h)
1	016	364,0
2	0,87	560,0
3	5,17	388,0
4	2.479,88	2.292,0

A Instância 1 conta com 4 maquinistas distribuídos por 3 destacamentos e 12 trens. A Figura 5 apresenta a designação dos 4 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). Tais destacamentos correspondem ao trecho que o maquinista pode atuar. Em seguida o maquinista cumpre o tempo de descanso no destacamento onde terminou a escala anterior para cumprir a segunda escala partindo deste destacamento.

Na segunda escala o maquinista é designado para atender outro trem, que tem origem em Dt 2 e destino Dt 1. Maq 1 tem um limite de designações estabelecido em 2 designações, sendo que ao termino da segunda ele deve ir para folga de 48 h. Já no caso do maquinista 2 (Maq 2) o limite de designações é 4, sendo assim, ao contrário de Maq 1, após a segunda designação o Maq 2 retorna e realiza subsequentemente mais duas designações respeitando o seu horário de descanso entre as mesmas. A Figura 5 ilustra como o modelo matemático trata o problema, assim, ocorre o deslocamento do veículo maquinista, saindo 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.

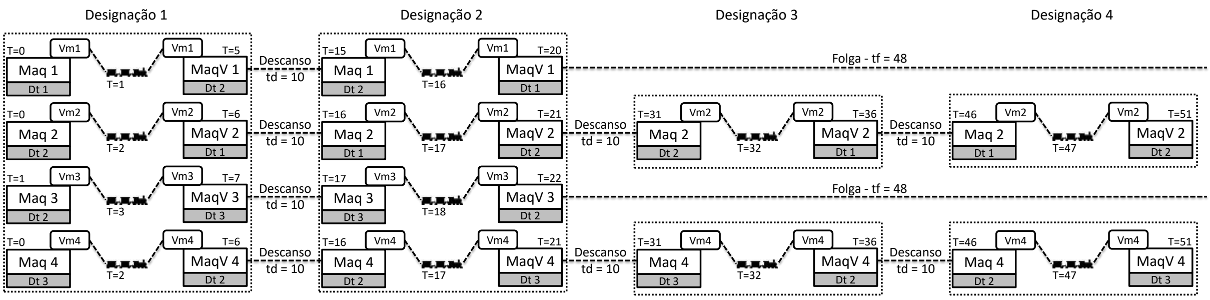


Figura 5: Esquema de solução da Instância 1.

A Instância 2 possui 20 trens e 6 maquinistas, sendo que 2 trens possuem o tempo de viagem igual ao tempo máximo que o maquinista pode trabalhar em uma escala (10 horas). A Figura 6 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 segunda 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, Maq 5 e Maq 6, com seus respectivos tempos de viagem e destacamentos de origem e destino. Os maquinistas 3 e 4, possuem um limite de designações estabelecido em 2 designações, logo, ambos cumprem duas escalas atendendo trens e posteriormente cumprem o período de folga de 48 h.

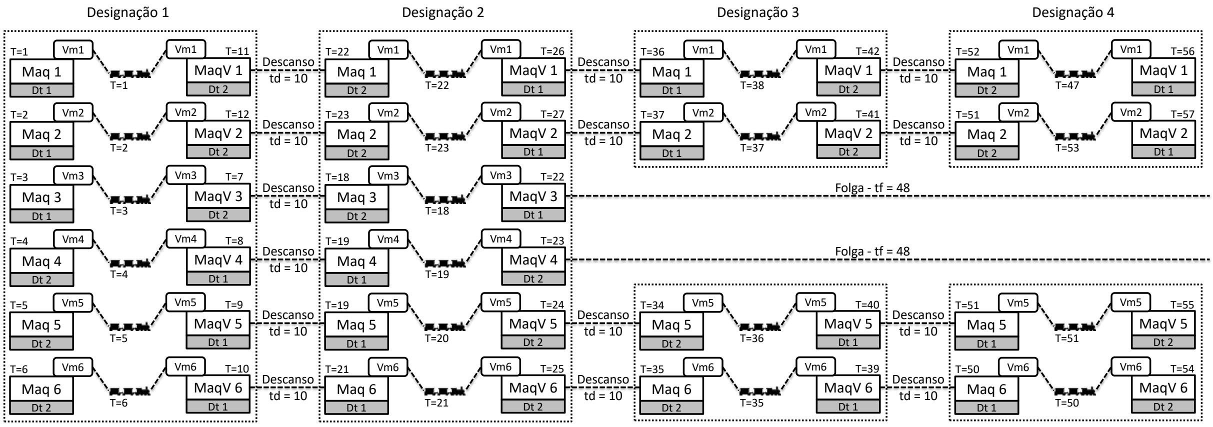


Figura 6: Esquema de solução da Instância 2.

Conforme visto anteriormente, as Instâncias 3 e 4 foram desenvolvidas com base no número médio de trens que circulam na EFVM por dia no trecho entre os destacamentos de Intendente Câmara e Costa Lacerda. A Instância 3 considera 2 destacamentos, 28 maquinistas, 50 trens (em um dia) e que cada maquinista pode cumprir no máximo 2 designações de viagem em trem em um dia em função da escala de 6 horas que eles cumprem. A Instância 4 é similar a Instância 3, porém considera 2 dias de planejamento. Desta forma, ela considera 108 trens e tem como premissa que cada maquinista pode ser designado a no máximo 4 viagens em trem. A Instância 3 obteve uma solução ótima com um tempo de processamento inferior a 6 s, 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. A Instância 4 obteve uma solução ótima com um tempo de processamento superior a 40 min, o que é relativamente aceitável uma vez que a Instância 4 refere-se a 2 dias de planejamento.

Por fim, pode-se concluir que o modelo matemático proposto é uma ferramenta aplicável ao problema real da EFVM de planejamento da designação de maquinistas a trem, dando resposta em curto espaço de tempo, respeitando todas as imposições legais e todas as normas internas da ferrovia. Vale ressaltar que o modelo matemático proposto pode ser usado por qualquer ferrovia nacional ou internacional e pode também ser facilmente adaptável a qualquer outra restrição que porventura venha existir.

6. CONCLUSÃO

Este artigo propôs um modelo matemático aplicado ao planejamento de designações de maquinistas para atender trens que irão circular em uma ferrovia, atendendo princípios legais e práticas adotadas pela ferrovia.

As instâncias analisadas mostraram que o CPLEX consegue resolver as instâncias que representam um dia de operação em um trecho da ferrovia, levando menos de 6 segundos de execução para alcançar uma solução ótima. O modelo matemático proposto, por buscar a minimização do pagamento de horas extras, pode vir a trazer ganhos financeiros para a ferrovia.

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 da operação das ferrovias. Propõe-se como possível continuação da pesquisa a elaboração de uma meta-heurística para resolver o modelo matemático proposto.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPES (75528452/2016), ao CNPq (307439/2016-0) e CAPES pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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 República 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.

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.

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.

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. 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.

Franco Collodetti Mazioli (francomazioli @gmail.com); Rodrigo de Alvarenga Rosa (rodrigo.a.rosa@ufes.br); Matheus da Silva Gravel (matheus.gravel@vale.com); Vivian Parreira (vivian.parreira@vale.com)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo - Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras – Vitória, ES, Brasil.