TRANSPORTES
revistatransportes.org.br
anpet
associação nacional de pesquisa e ensino em transportes
anpet.org.br

Planejamento das rotas dos recursos ferroviários para realização da manutenção ferroviária considerando sincronismo, precedência e prioridade

Railway maintenance resources route planning considering synchronism, precedence and priority

Guilherme de Almeida Eleutério[1], **Rodrigo Alvarenga Rosa**[1]

[1]Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil

Contato: guilhermeae.eng@gmail.com (GAE); rodrigoalvarengarosa@gmail.com, (RAR)

Recebido:
15 de outubro de 2021
Aceito para publicação:
8 de maio de 2023
Publicado:
31 de agosto de 2023

Editor de Área
Renato da Silva Lima
Universidade Federal de Itajubá, Brasil

Palavras-chave:
Recursos ferroviários.
Superestrutura ferroviária.
Problema de roteirização de veículo com restrições sincronizadas.

Keywords:
Railway resource.
Track structure.
Vehicle routing problem with synchronization constraints.

DOI: 10.58922/transportes.v31i2.2644

OPEN ACCESS
CC BY

RESUMO
Com o aumento da utilização das ferrovias houve um aumento na demanda por manutenção da superestrutura ferroviária, a fim de reparar os danos causados pelo transporte. Para executar a manutenção utilizam-se vários recursos ferroviários, que devem ser deslocados de um trecho a outro da ferrovia. Faz-se necessário elaborar a rota que cada recurso precisa realizar para atender as ordens de manutenção (OMs), considerando a sincronização, precedência e prioridade das OMs. Assim, esse artigo propõe um modelo matemático inovador, que considera a integração de oito diferentes modelos matemáticos de roteirização de veículos, para planejar as rotas dos recursos para atendimento às OMs, buscando maximizar o número de OMs atendidas no período de planejamento. Foram usados dados da Estrada de Ferro Vitória Minas para testar o modelo. Os resultados mostraram que o aumento do período máximo para iniciar a OM pode aumentar a capacidade de atendimento às OMs da equipe de manutenção.

ABSTRACT
Due to the increase in the use of the railroads, there was an increase in the demand for maintenance of the track superstructure, to repair the damage caused by transport. To perform track maintenance, several railway resources are used, which must be moved from one section of the railway to another. Planning the route that each resource needs to travel to fulfill maintenance orders (OMs) must consider synchronization, precedence, and priority of OMs. Thus, this article proposes an innovative mathematical model, integrates eight different mathematical models of vehicle routing, to plan the routes of resources to fulfill OMs, aiming to maximize the number of OMs served in the planning period. Data from the Vitória Minas Railway were used to test the model. The results showed that increasing the maximum period to start OM can increase the maintenance team capacity to fulfill OMs.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, diversos investimentos na área ferroviária ocasionaram um aumento da eficiência nas ferrovias. No ano de 2018, o volume de carga transportada atingiu o recorde de 569 milhões de toneladas úteis (TU), um crescimento de 5,7% em relação ao volume transportado em 2017 (ANTF, 2019). Com o aumento da utilização das ferrovias, houve o aumento da demanda por manutenção na malha ferroviária, a fim de reparar os danos ocasionados à superestrutura ferroviária e garantir a continuidade das operações. Uma maneira de realizar essas manutenções é por meio da utilização de recursos ferroviários que executam diversos tipos de serviços necessários para correção das anomalias na superestrutura. Neste artigo, os recursos ferroviários considerados são: 1) Máquinas de via de diversos tipos; 2) Equipes técnicas de profissionais qualificados; e 3) Veículos de apoio à manutenção. Doravante, neste artigo os recursos ferroviários serão denominados simplesmente por recursos.

Para planejar a manutenção da superestrutura ferroviária, a equipe de planejamento da manutenção ferroviária emite ordens de manutenção (OMs). Cada OM é definida pelo trecho onde ocorrerá a manutenção, o serviço a ser realizado nesse trecho, o momento desejado para início da manutenção e o grau de prioridade da manutenção. Com base em todas as OMs emitidas, a equipe de planejamento da manutenção ferroviária elabora de forma empírica a rota que cada recurso deverá realizar a fim de atender ao máximo de OMs possíveis, dentro do período de planejamento. Os recursos devem ser deslocados ao longo dos trechos da ferrovia, no caso das máquinas de via essas se deslocam com a própria força motriz, e no caso das equipes técnicas, essas devem ser deslocadas por meio de veículos de transportes de passageiro. O que se espera realizar são as rotas que esses recursos devem fazer, ou seja, a sequência de atendimento as OMs a fim de atender ao máximo de OMs possíveis. Para atender a cada OM, pode ser necessária a utilização de mais de um recurso. Cada recurso realiza um conjunto específico de serviços de manutenção, sendo que um recurso pode realizar mais de um tipo de serviço. Em algumas OMs pode haver a necessidade de que mais de um recurso esteja disponível para que a OM seja iniciada. Isso é denominado de sincronização de recurso, garantindo que seja igual o momento de chegada ao trecho da OM e a liberação dos recursos após o termino da manutenção.

Outro aspecto importante que deve ser considerado é a prioridade de atendimento a cada OM, definindo qual OM é mais prioritária de ser atendida em relação a outras. Essa prioridade está relacionada ao grau de risco de acidente da anomalia detectada pela equipe de manutenção. Quanto maior o risco da ocorrência do acidente, maior será a prioridade de atendimento à OM. O estabelecimento da prioridade é muito importante, pois no período de planejamento pode ocorrer a situação na qual nem todas as OMs serão atendidas, e a prioridade definirá qual OM deverá ser atendida e qual poderá esperar o próximo período de planejamento. Além da prioridade, também deve ser respeitada a precedência existente entre as OMs solicitadas, ou seja, qual OM deve ser executada antes de outra OM iniciar. Uma abordagem possível para resolver o planejamento dos recursos para atender as OMs é trata-lo como o *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP). Para tanto, cada recurso é visto como um veículo e, este veículo deve atender a vários clientes. Cada OM é considerada como um cliente. Assim, o problema de planejamento de atendimento das OMs passa a ser a elaboração das rotas de cada veículo/recurso atendendo a vários

clientes/OM, sendo que, como citado anteriormente, deve-se considerar: 1) nem todos os clientes serão atendidos; 2) restrições de sincronismo; 3) restrições de precedência; e 4) prioridade de atendimento da OM. Dessa forma, este artigo propõe um modelo matemático baseado no CVRP para planejamento do atendimento das OMs da superestrutura ferroviária, com o objetivo de maximizar o número de OM atendidas no período de planejamento e, ao mesmo tempo, minimizar os custos por utilização de cada recurso e minimizar o atraso entre o momento efetivo de início da OM e o momento solicitado para início.

O modelo matemático proposto neste artigo é inovador, pois considera a integração de oito diferentes modelos matemáticos para roteirização de veículos em um único modelo matemático para solução do problema. Os modelos considerados são: 1) *Capacitated Vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints* (CVRPSC), utilizado para garantir que os recursos cheguem ao mesmo tempo, no mesmo trecho, para atender as OMs que necessitam de mais de um recurso em sua operação; 2) *Capacitated Vehicle Routing Problem with Precedence Constraints* (CVRPPC), aplicado para garantir o atendimento das OMs que dependam de outra OM para iniciar; 3) *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP), usado para assegurar que os recursos sejam alocados em diferentes pátios ferroviários; 4) *Multi-Trip Vehicle Routing Problem* (MTVRP), utilizado para garantir que os recursos possam fazer mais de uma rota/viagem, para atender a OM durante o período planejado; 5) *Team Orienteering Problem* (TOP), aplicado para definir uma sequência prioritária de atendimento as OMs, certificando que as OMs com prioridade mais alta sejam atendidas primeiro; 6) *Site-dependent Vehicle Routing Problem* (SDVRP), aplicado para garantir que cada OM seja atendida pelo recurso capacitado para atender a sua demanda; 7) *Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogenous Fleet* (CVRPHF), permite a utilização de recursos com características diferentes durante o planejamento das rotas para atendimento das OMs; e 8) *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows* (CVRPTW), aplicado para garantir que os recursos atendam as OMs dentro do intervalo de tempo imposto no planejamento, respeitando também a capacidade e o tempo total de rota de cada recurso.

Além disso, é inovador também, pois, propõe a adaptação dos parâmetros e variáveis dos problemas de roteirização descritos anteriormente para a realidade do problema estudado neste artigo.

Para avaliar o modelo proposto, o mesmo foi testado com dados reais da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM). A equipe de planejamento da manutenção da EFVM espera utilizar o modelo matemático proposto como uma ferramenta de apoio ao planejamento das rotas dos recursos para atendimento às OMs da ferrovia. Na literatura científica, após revisão bibliográfica, não foram encontrados, nas principais bases de pesquisas como: Web of Science, Scopus, Portal CAPES, Scielo, E-Journal, e Google Scholar, artigos que propusessem a integração dos modelos citados anteriormente, tampouco que utilizassem o problema de roteirização de veículo para o planejamento das rotas dos recursos para atendimento as OMs da superestrutura ferroviária.

O artigo foi organizado em seis seções. Na Seção 2, têm-se o referencial teórico que apresenta uma revisão do planejamento da manutenção ferroviária e do problema de roteirização e suas variantes. Na Seção 3 apresenta-se o modelo matemático proposto. Na Seção 4, são

apresentados o estudo de caso e as instâncias testadas. Na Seção 5 são apresentados os resultados obtidos. Por fim, na Seção 6, têm-se as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Essa seção apresenta uma revisão bibliográfica sobre o planejamento da manutenção da ferroviária. Higgins, Ferreira e Lake (1999) trataram o problema de planejamento da manutenção ferroviária desenvolvendo um modelo projetado para ajudar a resolver os conflitos existentes entre as operações de trens e o agendamento da atividade de manutenção. Quiroga e Schnieder (2010) propuseram um método de previsão de deterioração da geometria do trilho e uma heurística para os agendamentos das intervenções de manutenção realizada pela socadora, para as atividades de compactação e nivelamento da linha. Lidén e Joborn (2017) trataram do problema integrado de tráfego ferroviário incluindo a manutenção ferroviária. O objetivo é planejar janelas livres de trem, suficientes para um determinado volume de manutenção junto com o tráfego de trens desejado. Su e Schutter (2018) analisaram o problema de agendamento da manutenção ferroviária, que consiste em encontrar o cronograma ideal para as operações de manutenção e as rotas ideais para as equipes de manutenção, visando reduzir os custos de viagem.

A seguir é apresentada uma descrição sobre os tipos de modelos matemáticos utilizados no estudo em tela. O CVRPHF é o problema de roteirização de veículo em que os veículos utilizados apresentam características variadas em relação aos seus equipamentos, capacidades, velocidades, custos operacionais, entre outros aspectos. Outro problema de roteirização utilizado é o CVRPTW em que os veículos devem chegar ao cliente no intervalo de tempo imposto no problema, respeitando também a capacidade e o tempo total de rota (Toth; Vigo, 2014). O MDVRP é o problema de roteirização em que mais de um deposito é utilizado, assumindo que cada veículo está sediado em um dado depósito, previamente conhecido, e o cliente pode ser atendido por qualquer veículo disponível na frota de qualquer depósito (Montoya-torres et al., 2015). O MTVRP que é considerado como uma extensão do CVRP em que cada veículo de uma frota, disponível em um depósito, pode realizar mais de uma rota para atender ao cliente (Cattaruzza, Absi e Feillet, 2018). Outro modelo matemático utilizado é o TOP, em que é definida uma sequência prioritária de atendimento ao cliente, para que os clientes com prioridade mais alta sejam visitados primeiro (Trachanatzi et al., 2019). No SDVRP os veículos de frota heterogênea devem estar preparados para atender um conjunto de clientes que exigem serviços específicos, existindo um relacionamento de compatibilidade entre os clientes e os veículos para que o atendimento seja realizado com sucesso (Zare-Reisabadi e Hamid Mirmohammadi, 2015).

Tendo em vista que os modelos matemáticos principais desse artigo são o CVRPSC e CVRPPC, a seguir, é apresentada uma breve descrição. No CVRPSC, mais de um veículo pode ou deve ser usado para completar uma atividade, apresentando requisitos adicionais de sincronização em relação aos aspectos espaciais, temporais e de carga, ou seja, os veículos devem realizar atividades no mesmo local ou em locais diferentes, ao mesmo tempo ou com precedência (Drexl, 2012). No CVRPPC, a restrição de precedência ocorre quando uma atividade deve ocorrer antes do início de outra atividade, seguindo uma sequência lógica para conclusão desta atividade (Sedighizadeh e Mazaheripour, 2018).

Bredstrom e Ronnqvist (2008) e Rasmussen et al. (2012) trataram do problema de *Home Health Care* (HHC) baseado no VRPTW integrado ao *Synchronization Constraints with Temporal Precedence* (SCSP). Labadie et al. (2014) apresentaram uma definição para o CVRPSC, e uma classificação com dois tipos de sincronização: o *simultaneous synchronization* (SS) e o *precedence synchronization* (PS) e aplicaram ao problema de *Home Health Care* (HHC) com múltiplas viagens. O nosso modelo matemático proposto é baseado no SS, porém incorpora características do PS. López-Aguilar et al. (2018) apresentaram três formulações lineares para o CVRPSC e compararam com outras formulações encontradas na literatura. Ait Haddadene et al. (2016) e Liu et al. (2019) propuseram o CVRPSC com precedência, na qual os veículos partem de um único depósito e passam a atender um conjunto de clientes simultaneamente. Sedighizadeh e Mazaheripour (2018) utilizaram uma meta-heurística *Hybrid Algorithm of Particle Swarm and Artificial Bee Colony* (PSO-ABC) para resolver o CVRPPC no contexto da entrega de mercadorias aos clientes.

Após esta revisão, foi constatado que poucos artigos foram publicados sobre o planejamento da manutenção da superestrutura ferroviária com uso do problema de roteirização de veículo e suas variantes. Logo esta pesquisa visa preencher essa lacuna de forma inovadora, trazendo um novo modelo matemático que integra oito variantes do problema de roteirização de veículo, tornando-se uma oportunidade exclusiva para o desenvolvimento e avanço nesse campo de pesquisa.

3. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O modelo matemático proposto neste trabalho considera a integração e adaptação para o problema tratado dos seguintes modelos matemáticos: 1) CVRPSC; 2) CVRPPC; 3) MDVRP; 4) MTVRP; 5) TOP; 6) SDVRP; 7) CVRPTW; e 8) CVRPHF. O modelo considera que cada pátio ferroviário corresponde a um depósito e existe um depósito virtual correspondente para cada pátio. Em cada depósito existe pelo menos um veículo, tratado neste artigo como recurso, que iniciará uma viagem para atender clientes, que são os atendimentos às OMs para um determinado trecho da ferrovia.

Uma viagem representa a designação dos veículos/recursos a um atendimento à OM e é limitada ao tempo máximo do turno de trabalho. Os recursos podem realizar dois ou mais atendimentos ao mesmo tempo no mesmo trecho, ocorrendo à sincronização do momento de chegada dos recursos no trecho e o momento de liberação dos recursos após o término da manutenção. Ao fim da viagem, o veículo/recurso deve retornar para um depósito/pátio virtual, podendo ser o seu de origem ou outro que o modelo achar pertinente. No caso do problema estudado, o recurso deve ficar estacionado no pátio até o início da próxima viagem, representando o descanso do turno.

O modelo proposto se destaca em relação aos demais modelos matemáticos encontrados na literatura, pois considera as restrições de sincronização, precedência e prioridade entre os atendimentos às OMs para início e término das operações de manutenção nos trechos da ferrovia. Além disso, o modelo considera o uso de janela de tempo, uma frota heterogênea de veículos/recursos, múltiplos depósitos/pátios e múltiplas viagens/rotas para atendimento às OMs nos trechos da ferrovia. O modelo

proposto permite que o veículo/recursos inicie uma viagem/rota em um depósito/pátio e termine no próprio depósito/pátio ou em outro depósito/pátio. O modelo visa maximizar o número de OMs atendidas no período de planejamento e, ao mesmo tempo, minimizar os custos por quilometro rodado de cada recurso e minimizar o atraso entre o momento efetivo de início do atendimento à OM e o momento solicitado para início.

O modelo matemático ainda considera o tempo do turno de trabalho, o tempo do turno de descanso, o tempo de liberação e o local de partida (pátio) em que cada recurso encontra-se estacionado para dar início à operação de manutenção O modelo também considera o tipo de serviço que cada veiculo/recurso pode executar, o tipo de serviço solicitado para cada OM, a sincronização entre os duas ou mais OMs, a prioridade de atendimento à OM e a precedência de atendimento entre as OMs.

Considerando n_a o numero total de OMS, n_v como o número de veículos ou recursos disponíveis, n_r o número de rotas ou turnos possíveis, n_p o número de depósitos ou pátios disponíveis e n_s o número de serviços realizados pelos recursos. Existe uma frota heterogênea disponível nos pátios ferroviários n_p para realizar os atendimentos às OMs n_a. Para cada recurso é associado um tipo de serviço que o recurso pode executar, um tempo de operação relacionado a cada tipo de serviço solicitado na OM, e um custo variável em reais por quilômetro rodado (R$/Km).

A seguir o modelo matemático proposto é apresentado em cinco partes: conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, função objetivo e restrições.

Conjuntos:

PR Pátios reais, $PR = \{1, .., n_p\}$;

PV Pátios virtuais, $PV = \{(n_p + n_a + 1), .., (2 * n_p + n_a)\}$;

NT OMs, $NT = \{(n_p + 1), .., (n_p + n_a)\}$;

PRT Pátios reais mais as OMs, $PRT = \{1, .., (n_p + n_a)\}$;

PVT Pátios virtuais mais as OMs, $PVT = \{(n_p + 1), .., (2 * n_p + n_a)\}$;

PTP Pátios reais, OMs e pátios virtuais, $PTP = \{1, .., (2 * n_p + n_a)\}$;

MD Recursos, $MD = \{1, .., n_v\}$;

R Rotas, $R = \{1, .., n_r\}$;

S Serviços, $S = \{1, \dots, n_s\}$.

Assim, o modelo matemático é definido como um grafo orientando $G = (V, A)$ em que o conjunto de nós $V = PR \cup NT \cup PV$. O conjunto $A = \{(i, j) | i, j \in V, i \neq j, i \notin PV, j \notin PR\}$ corresponde aos arcos que ligam um nó i a um nó j. Todas as rotas iniciam nos nós $i \in PR$ e terminam nos nós $j \in PV$.

Parâmetros:

$tv_{i,j}$ Tempo de viagem que um recurso leva para percorrer a distância entre os nós $i \in PTP$ e os nós $j \in PTP$;

ms_i Momento solicitado para chegada do recurso no nó $i \in PTP$;

ml_i Momento limite para a chegada do recurso no nó $i \in PTP$;

tt Tempo do turno de trabalho dos recursos;

td Tempo do turno de trabalho mais o turno de descanso dos recursos;

tl Tempo de liberação do recurso após a execução da manutenção;

lp_v Pátio em que o recurso $v \in MD$ está estacionado e deverá iniciar seu turno de trabalho;

ot_i Tempo da operação de manutenção no atendimento à OM $i \in NT$;

$d_{i,j}$ Distância entre os nós $i \in PTP$ e $j \in PTP$;

ck_v Custo do quilometro percorrido pelo recurso $v \in MD$;

$vs_{v,s}$ Tipo de serviço $s \in S$ que o recurso $v \in MD$ pode executar;

ss_i Tipo de serviço solicitado para cada OM $i \in NT$;

$sa_{i,j}$ Parâmetro que tem o valor igual a 1 para garantir que os atendimentos às OMs $i \in NT$ e $j \in NT$ tenham seus horários de início iguais, ou seja, elas são OMs sincronizadas, e zero caso contrário;

P_i Prioridade de atendimento das OM $i \in NT$;

$Pd_{i,j}$ Parâmetro que tem o valor igual a 1 se a OM $i \in NT$ tenha que ser executada antes da OM $j \in NT$, e zero caso contrário;

M Número grande para a lógica do modelo, $M = 9999{,}9$;

m Número pequeno para a lógica do modelo, $m = 0{,}0001$;

α Parâmetro multiplicado à primeira parcela da função objetivo que visa dar maior peso ao atendimento às OM $\alpha = 100.000$;

β Parâmetro multiplicado à segunda parcela da função objetivo que visa dar maior peso aos custos por quilômetro rodado de cada recurso $\beta = 10$;

Variáveis de decisão:

$x_{i,j,v,r}$ Variável binária que assume o valor 1 caso o recurso $v \in MD$ na rota $r \in R$ percorre o arco $(i,j) \in PTP$; e zero caso contrário;

$tm_{i,v,r}$ Momento que o recurso $v \in MD$ chega no nó $i \in PTP$ na rota $r \in R$;

vu_v Variável binária que assume o valor 1 caso o recurso $v \in MD$ seja utilizado, e zero

caso contrário;

A seguir são apresentadas a função objetivo e as restrições do modelo matemático proposto.
Função objetivo:
Maximizar

$$\alpha \sum_{i\in NT} P_i \sum_{j\in PVT} \sum_{v\in MD} \sum_{r\in R} x_{i,j,v,r} \quad (1a)$$

$$-\beta \sum_{i\in PTP} \sum_{j\in PTP} \sum_{v\in MD} \sum_{r\in R} ck_v \; d_{i,j} \; x_{i,j,v,r} \quad (1b)$$

$$- \sum_{i\in NT} \sum_{v\in MD} \sum_{r\in R} (tm_{i,v,r} - ms_i \sum_{j\in PVT} x_{i,j,v,r}) \quad (1c)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j\in PVT} \sum_{v\in MD} \sum_{r\in R} x_{i,j,v,r} \leq 1 \; \forall \; i \in NT \quad (2)$$

$$\sum_{i\in PR} \sum_{j\in PVT} x_{i,j,v,r} = 1 \; \forall \; v \in MD, r \in R \quad (3)$$

$$\sum_{i\in PRT} \sum_{j\in PV} x_{i,j,v,r} = 1 \; \forall \; v \in MD, r \in R | r = 1 \quad (4)$$

$$\left(\sum_{i\in PR} \sum_{j\in PV} x_{i,j,v,r} \; \sum_{h\in PRT} x_{h,(i+np+na),v,(r-1)}\right) + \left(\sum_{i\in NT} \sum_{j\in PV} x_{i,j,v,r}\right) = 1$$
$$\forall \; v \; \in MD, r \in R | r \geq 2 \quad (5)$$

$$\sum_{i\in PR|\; i=lp_v} \sum_{j\in PVT} \; x_{i,j,v,1} = 1 \; \forall \; v \in MD \quad (6)$$

$$\sum_{i\in PV} \sum_{j\in PTP} \sum_{r\in R} x_{i,j,v,r} = 0 \; \forall \; v \in MD \quad (7)$$

$$\sum_{i\in PTP} \sum_{j\in PR} \sum_{r\in R} x_{i,j,v,r} = 0 \; \forall \; v \in MD \quad (8)$$

$$\sum_{j\in PVT} x_{h,j,v,r} - \sum_{i\in PRT} x_{i,h,v,r} = 0 \; \forall \; h \in NT, v \in MD, r \in R \quad (9)$$

$$x_{i,j,v,r} = 0 \; \forall \; i \in PTP, j \in PTP, v \in MD, r \in R | i = j \quad (10)$$

$$tm_{j,v,r} \; \geq tm_{i,v,r} + x_{i,j,v,r}\left(tv_{i,j} + \; ot_i\right) - M\left(1 - \; x_{i,j,v,r}\right) \forall \; i \in PRT, j \in PVT, v \in MD, r \; \in R \quad (11)$$

$$tm_{i,v,r} \geq tm_{(i+np+na),v,(r-1)} \; + \; ot_i \; \sum_{h\in PRT} x_{h,(i+np+na),v,(r-1)} - M\left(1 - \sum_{h\in PRT} x_{h,(i+np+na),v,(r-1)}\right)$$
$$\forall \; i \in PR, v \in MD, r \in R | r \geq 2 \quad (12)$$

$$tm_{i,v,r} \leq M \sum_{h\in PRT} x_{h,(i+np+na),v,(r-1)} \; \forall \; i \in PR, v \in MD, \; r \in R | r \geq 2 \quad (13)$$

$$tm_{(i+n_p+n_a),v,r} \leq M \sum_{h\in PRT} x_{h,(i+np+na),v,r} \; \forall \; i \in PR, v \in MD, r \in R \quad (14)$$

$$tm_{i,v,r} \leq M \sum_{h \in PVT} x_{i,h,v,r} \; \forall \; i \in PR, v \in MD, r \in R \quad (15)$$

$$tm_{i,v,r} \; \geq ms_i \sum_{j\in PVT} x_{i,j,v,r} \; \forall \; i \in NT, v \in MD, r \in R \quad (16)$$

$$tm_{i,v,r} \; \leq ml_i \sum_{j\in PVT} x_{i,j,v,r} \; \forall \; i \in NT, v \in MD, r \in R \quad (17)$$

$$tm_{i,v,r} \geq (r-1)\, td \sum_{h \in PVT} x_{i,h,v,r} \;\forall\, i \in PR, v \in MD, r \in R \quad (18)$$

$$tm_{(i+n_p+n_a),v,r} \leq \big((r-1)\, td + tt\big) \sum_{h \in PRT} x_{h,(i+np+na),v,r} \;\forall\, i \in PR, v \in MD, r \in R \quad (19)$$

$$\sum_{j \in NT} \sum_{i \in PR} \sum_{r \in R} x_{i,j,v,r} \geq m\, vu_v \;\forall\, v \in MD \quad (20)$$

$$\sum_{j \in NT} \sum_{i \in PR} \sum_{r \in R} x_{i,j,v,r} \leq M\, vu_v \;\forall\, v \in MD \quad (21)$$

$$\sum_{v \in MD} vu_v \leq n_v \;\forall\, v \in MD \quad (22)$$

$$\sum_{v \in MD} vu_v \geq 1 \;\forall\, v \in MD \quad (23)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in PTP} x_{i,j,v,r} = 0 \;\forall\, i \in PRT, v \in MD, s \in S \,|\big(i \geq (np+1)\big) \wedge \big(vs_{v,ss_i}\big) = 0) \quad (24)$$
$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in PTP} x_{i,j,v,r} + \sum_{r \in R} \sum_{j \in PTP} x_{h,j,v,r} \leq 1$$

$$\forall\, i \in PRT, h \in PRT, v \in MD | ((i \geq n+1) \wedge (h \geq np+1)) \wedge (sa_{i,h} = 1) \quad (25)$$

$$tm_{i,v,r} \geq tm_{j,k,c} - M\big(2 - \sum_{g \in PTP} x_{i,g,v,r} - \sum_{h \in PTP} x_{j,h,k,c}\big)$$
$$\forall\, i \in PRT, j \in PRT, v \in MD, k \in MD, r \in R, c \in R | ((i \geq np+1) \wedge (j \geq np+1) \wedge (v \neq k) \wedge \big(sa_{i,j} = 1\big) \wedge (v \neq k) \wedge (sa_{i,j} = 1) \quad (26)$$

$$tm_{i,v,r} \leq tm_{j,k,c} + M\big(2 - \sum_{g \in PTP} x_{i,g,v,r} - \sum_{h \in PTP} x_{j,h,k,c}\big)$$
$$\forall\, i \in PRT, j \in PRT, v \in MD, k \in MD, r \in R, c \in R | ((i \geq np+1) \wedge (j \geq np+1) \wedge (\neq k)) \wedge (sa_{i,j} = 1) \quad (27)$$

$$tm_{j,v1,r1} \geq tm_{i,v,r} + ot_i + tl - M\big(2 - \sum_{h \in PTP} x_{i,h,v,r} - \sum_{h \in PTP} x_{i,h,v1,r1}\big)$$
$$\forall\, i \in NT, j \in NT, v \in MD, r \in R, v1 \in MD, r1 \in R \,|(Pd_{i,j} = 1) \quad (28)$$

$$tm_{i,v,r} \in \mathbb{R}^+ \;\forall\, i \in PTP, v \in MD, r \in R \quad (29)$$

$$vu_v \in \{0,1\} \;\forall\, v \in MD \quad (30)$$

$$x_{i,j,v,r} \in \{0,1\} \;\forall\, i \in PTP, j \in PTP,\; v \in MD, r \in R \quad (31)$$

A Função Objetivo (F.O), Equação 1, é composta em três parcelas 1(a),1 (b) e 1(c). A primeira parcela (a) representa a soma de cada prioridade de atendimento à OM. A segunda parcela (b) representa a redução de todos os custos por quilometro rodado de cada recurso e última parcela (c) representa a diferença entre o momento efetivo de início da OM e o momento em que realmente inicia-se a OM no trecho.

As restrições (2) garantem que cada OM $i \in NT$ seja atendida por um recurso. As restrições (3) definem que quando numa rota $r \in R$, o recurso só pode sair de um pátio real para atender uma OM ou para ir a um pátio virtual. As restrições (4) referem-se a rota igual 1 e garantem que após atender uma OM o recurso deve ir para um pátio virtual,

podendo ser o seu de origem ou outro pátio virtual que achar pertinente. As restrições (5) referem-se a rota maior ou igual a 2 e garantem que após atender uma OM o recurso deve ir para um pátio virtual, podendo ser o seu de origem ou outro pátio virtual que achar melhor. As restrições (6) definem que os recursos iniciem suas rotas em um local de partida pré-determinado, sendo esse local um pátio real. As restrições (7) e (8) garantem que nenhum recurso pode sair do pátio virtual ou chegar ao pátio real. As restrições (9) referem-se à conservação do fluxo. Antes de atender uma OM o recurso sempre terá atendido outra OM anterior ou terá saído do pátio real. E após atender um OM, o recurso irá atender outra OM ou irá para um pátio virtual. As restrições (10) garantem que o fluxo não ocorra de uma OM para ela mesma.

As restrições (11), (12), (13), (14) e (15), definem que a operação de atendimento da OM j inicie após a saída do recurso da OM i mais o tempo de duração da operação de atendimento da OM j. As restrições (16) e (17) garantem que o recurso deve atender a OM dentro do limite do horário estabelecido pela equipe de planejamento. As restrições (18) e (19) garantem que o horário de saída do primeiro recurso no pátio tem que ser igual ao início do turno de trabalho. As restrições (20) e (21) definem que se o recurso atender uma OM em determinada rota este deve ser igual recurso utilizado vu_v. As restrições (22) e (23) garantem que se o recurso sair do pátio real e se deslocar para uma OM, em qualquer rota, o recurso utilizado vai ser igual a um $vu_v = 1$, caso contrário será igual a zero. As restrições (24) garantem que o tipo de serviço solicitado na OM seja atendido pelo recurso que executa aquele tipo de serviço. Caso o recurso não seja compatível com o serviço solicitado esta OM não deve ser atendida. As restrições (25) garantem que duas ou mais OMs possam ser atendidas juntas no mesmo trecho, ocorrendo à sincronização entre elas. As restrições (26) e (27) garantem que caso ocorra à sincronização entre duas OMs, dois ou mais recursos cheguem ao mesmo tempo no trecho para atender as respectivas OMs. As restrições (28) garantem a precedência de atendimento entre as OMs. As restrições (29), (30) e (31) definem o domínio das variáveis.

As restrições (5) não são lineares por conta do termo $\sum_{i\in PR}\sum_{j\in PV} x_{i,j,v,r}\sum_{h\in PRT} x_{h,(i+np+na),v,(r-1)}$.

Dessa forma, as restrições foram linearizadas incluindo as variáveis binárias de decisão $y_{i,j,v,r}$. Também foram introduzidas as restrições (32), (33), (34) e (35) para a linearização do modelo matemático.

$$y_{i,j,v,r} \leq x_{i,j,v,r} \; \forall \; i \in PR, j \in PV, v \; \in MD, r \in R | r \geq 2 \tag{32}$$

$$y_{i,j,v,r} \leq \sum_{h\in PRT} x_{h,(i+np+na),v,(r-1)} \; \forall \; i \in PR, j \in PV, v \; \in MD, r \in R | r \geq 2 \tag{33}$$

$$y_{i,j,v,r} \geq x_{i,j,v,r} + \left(\sum_{h\in PRT} x_{h,(i+np+na),v,(r-1)}\right) - 1 \; \forall \; i \in PR, j \in PV, v \; \in MD, r \in R | r \geq 2 \tag{34}$$

$$y_{i,j,v,r} \in \{0,1\} \; \forall \; i \in PR, j \in PV, v \; \in MD, r \in R | r \geq 2 \tag{35}$$

Assim, o modelo matemático proposto é linearizado incluindo-se as variáveis binárias $y_{i,j,v,r}$ e as restrições (32) a (35). Por fim, devem ser substituídas as restrições (5) pelas restrições (36).

$$\left(\sum_{i\in PR}\sum_{j\in PV} y_{i,j,v,r}\right) + \left(\sum_{i\in NT}\sum_{j\in PV} x_{i,j,v,r}\right) = 1 \;\forall\; i \in PR, j \in PV, v \in MD, r \in R | r \geq 2 \quad (36)$$

O modelo matemático possui $2\ |PTP|^2\ |MD|\ |R| + |MD|$ variáveis inteiras e $|PTP|\ |MD|\ |R|$ variáveis contínuas.

4. ESTUDO DE CASO E GERAÇÃO DAS INSTÂNCIAS

Os procedimentos operacionais e os cenários de aplicações para elaboração das rotas dos recursos foram obtidos com base nos procedimentos realizados na EFVM. Para geração das instâncias deste artigo foram considerados 895 km da EFVM, com um total de 178 trechos e 10 pátios ferroviários. Cada trecho tem aproximadamente 7 km de extensão (Vale, 2009).

A equipe de manutenção é responsável pela identificação dos trechos que apresentam algum tipo de anomalia e que devem passar por manutenção. Para cada trecho, ela emite uma OM, e com base em todas as OMs solicitadas, é elaborado o planejamento da sequência de atendimento das OMs. O turno de trabalho da equipe de manutenção é de 8 horas com descanso de 11 horas, perfazendo, assim, um ciclo completo de trabalho de 19 horas. Ao fim do turno de trabalho, cada recurso deve retornar para um pátio ferroviário qualquer, de onde sairá para um novo turno de trabalho após o descanso.

Cada OM em um trecho da ferrovia exige atividades específicas para o tipo de anomalia detectada, sendo que cada atividade é atendida por recursos especializados para tal. Para cada OM solicitada é necessário considerar a ordem prioritária de atendimento que está relacionado a grau de risco de acidente da anomalia detectada. A prioridade é informada pela equipe de manutenção, assim como a precedência existente entre as OMs, tudo isso para que o serviço seja finalizado por completo. Na Figura 1, é possível verificar a presença de OMs sincronizadas como no caso das OM3 e OM4, em que são solicitados dois tipos de serviços para execução dos reparos das anomalias identificadas no trecho T4: o serviço S2, realizado pelo recurso Rec. M2 e o serviço S3 realizado pelo recurso Rec. M4. Também foram sincronizadas as OM5 e OM6 para o trecho T5 que solicitou o serviço S1 realizado pelo recurso Rec. M1 e o serviço S2 realizado pelo recurso Rec. M2.

As instâncias para testar o modelo matemático proposto foram elaboradas com base nos dados levantados junto à empresa responsável pela operação da EFVM. Foi considerado que os recursos viajam com velocidade média de 40km/h. Para elaboração das instâncias foram determinados 7 tipos diferentes de recursos: Socadora de linha; Socadora de chave; Desguarnecedora de lastro; Esmerilhadeira de trilho; Equipe de manutenção manual; Equipe de apoio às máquinas de via; e Caminhão rodoferroviário. Cada tipo de recurso exerce diferentes tipos de serviços: S1, Socaria mecanizada da linha; S2, Socaria mecanizado do AMV; S3, Desguarnecimento mecanizado a vácuo do lastro; S4, Esmerilhamento mecanizado do trilho; S5, Apoio à máquina de via por equipe técnica; S6, Regularização do lastro; S7, Substituição de trilho; S8, Substituição de dormentes; S9, Carregamento de dormentes; e S10, Carregamento de trilhos. Os recursos apresentam diferentes tempos de manutenção por trecho, variando de acordo com a anomalia detectada. O tempo de operação para cada trecho é fornecido pela equipe de planejamento da manutenção.

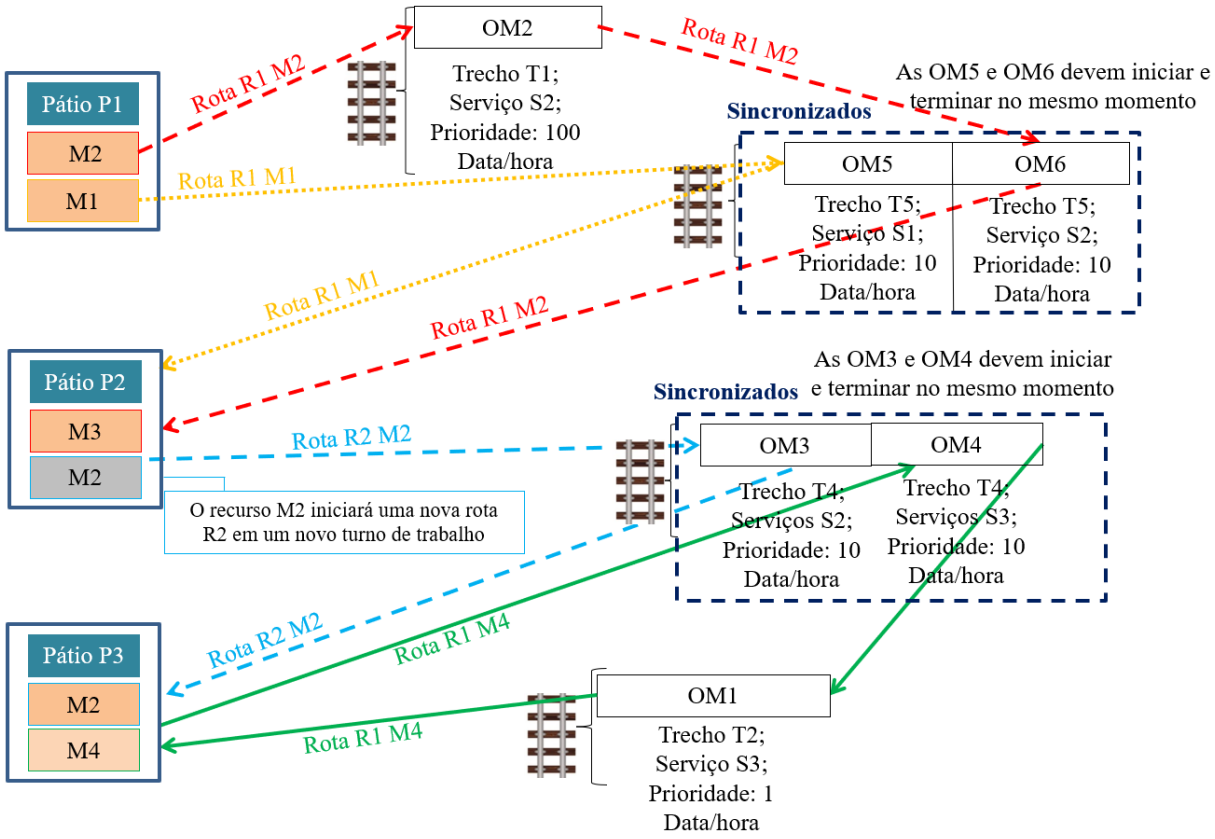


Figura 1. Desenho esquemático das rotas dos recursos.

Foram elaborados 6 grupos com um total de 24 instâncias. A Tabela 1 mostra as características das instâncias. As colunas (1) e (2) informam a quantidade de grupos e instâncias testadas. A coluna (3) refere-se à quantidade de recursos ferroviários disponível. A coluna (4) refere-se ao número de recursos que pode exercer determinados serviços, variando de S1 a S10. A coluna (5) apresenta a quantidade de OMs criadas para cada instância. A coluna (6) apresenta a quantidade de sincronização que deverá ocorrer entre as OMs. e A coluna (7) refere-se ao tempo máximo que cada OM pode levar para ser atendida.

Todas as instâncias cotam com um horizonte de planejamento de 6 ciclos completos de trabalho. O Grupo 1 foi criado para analisar a lógica e coerência dos resultados quanto ao atendimento às OMs. As instâncias desse grupo foram criadas considerando um segmento reduzido da EFVM e apresentando um período máximo para iniciar a OM de até 48 horas. O Grupo 2 representa o comportamento do modelo mediante as mudanças realizadas no período máximo para iniciar a OM. Todas as instâncias foram testadas com um total de 36 OMs, que representa a média histórica registrada de OMs por semana nos trechos da EFVM estudado nesse artigo. O Grupo 3 apresenta um aumento na quantidade de OMs, representando a possibilidade de aumentar o número de OMs atendidas dentro do período de planejamento estimado. E conta com períodos máximos para iniciar as OMs de 48 horas e 24 horas. Esses períodos foram escolhidos, por serem considerados, pela equipe de planejamento da manutenção da EFVM, como o período ideal para realização da manutenção.

O Grupo 4 conta com um aumento no número de recursos disponíveis para atendimento as OMs, passando de 14 para 23 recursos disponíveis, representando a possibilidade de aquisição de novos equipamentos e pessoal. O Grupo 5 e 6 foi criado para verificar se o aumento na produtividade (m/h) de manutenção dos recursos, aumenta a quantidade de OMs atendidas no horizonte de planejamento estimado. As instâncias dos dois grupos foram elaboradas com os mesmo dados das instâncias do Grupo 3 porém tiveram a produtividade de manutenção aumentada em 10% e 20% respectivamente.

Tabela 1: Dados das instâncias de teste

			Número de recursos que pode realizar o tipo de serviço												
Grupo	Instância	Quantidade de Recursos	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	Total de OMs solicitadas	Quantidade de OMs Sincronizadas	Período máximo para OM iniciar (h)
	1	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	10	4	48
	2	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	14	6	48
	3	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	24	10	48
1	4	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	36	14	48
	5	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	36	14	72
	6	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	36	14	48
	7	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	36	14	24
2	8	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	36	14	0
	9	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	36	14	48
	10	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	36	14	24
	11	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	48	20	48
3	12	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	48	20	24
	13	23	5	2	2	2	5	1	5	5	2	2	36	14	48
	14	23	5	2	2	2	5	1	5	5	2	2	36	14	24
	15	23	5	2	2	2	5	1	5	5	2	2	48	20	48
4	16	23	5	2	2	2	5	1	5	5	2	2	48	20	24
	17	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	36	14	48
	18	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	36	14	24
	19	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	48	20	48
5	20	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	48	20	24
	21	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	36	14	48
	22	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	36	14	24
	23	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	48	20	48
6	24	14	4	1	1	1	3	1	3	3	1	1	48	20	24

Por questão de confiabilidade a EFVM não informou os custos para deslocar um recurso de um trecho para outro trecho (este custo para as maquinas de via e para o caminhão rodoferroviário é calculado por meio do consumo de combustível necessário para seu deslocamento e os operadores da máquina; para as equipes de manutenção, este custo representa o consumo de combustível do veículo que transporta a própria equipe). Desta forma, segundo informações da EFVM, uma máquina de via consome aproximadamente o mesmo combustível de uma locomotiva BB40WM. Tomando como base o artigo Carvalhaes et al. (2017), sabe-se que o consumo de combustível de uma locomotiva BB40WM é em média de 272,91 litros por hora, considerando, a velocidade de deslocamento entre trechos das máquinas de via de 40 km/h, tem-se o consumo de 6,82 litros por quilômetro. No Brasil o preço médio do óleo diesel B10 é de R$ 3,20 (PETROBRÁS, 2020). Multiplicando o valor do diesel com o consumo por quilômetro da máquina de via, temos um custo total de R$ 22 por quilômetro. Para o veículo de transporte da equipe e o caminhão rodoferroviário foi considerado o consumo médio de 36,75 litros de diesel por hora, obtidos

através do Manual de Custo Ferroviários da ANTT (ANTT, 2019a). Considerando a velocidade de deslocamento entre trechos de 40 km/h e o valor do diesel B5 de R$ 3,20 (PETROBRÁS, 2020) tem-se um custo total de R$ 2,94 reais por quilômetro percorrido.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Para executar o modelo proposto foi utilizado o *solver* CPLEX, versão 12.8 (IBM,2020). Utilizou-se um computador Intel Xeon Silver 4116, com 2 processadores de 2.10 GHz com 16 núcleos e 128 GB de memória RAM. As instâncias foram executadas por no máximo 24 horas, 86.400 segundos. Na Tabela 2 são apresentados os resultados obtidos pelo CPLEX. As colunas (1) e (2) representam, respectivamente, os grupos e as instâncias testadas. A coluna (3) representa o valor obtido na Função Objetivo (FO). As colunas (4), (5) e (6) apresentam o *Upper Bound* (UB), o *Lower Bound* (LB) e o *gap* ($gap = (LB - UB)/LB$) obtido pelo CPLEX. A coluna (7) representa o tempo de execução do CPLEX. As colunas (8) e (9) apresentam a quantidade de OMs atendidas e não atendidas respectivamente.

Tabela 2: Resultados obtidos pelo CPLEX

Grupo	Instância	Função Objetivo	UB	LB	GAP (%)	Tempo de Execução (s)	OMs atendidas	OMs não atendidas
	1	22.406.494,90	22.406.494,90	22.406.494,90	0	20,95	10	0
	2	24.525.369,80	24.525.369,80	24.525.369,80	0	48,45	14	0
	3	48.753.067,30	48.753.067,30	48.753.067,30	0	7064,94	24	0
1	4	72.647.258,30	75.787.508,51	72.647.258,30	4,32	86.400,00	26	10
	5	72.698.747,55	76.584.229,23	72.698.747,55	5,34	86.400,00	27	9
	6	70.720.686,30	75.252.551,36	70.720.686,30	6,41	86.400,00	24	12
	7	61.493.096,85	63.248.259,38	61.493.096,85	2,85	86.400,00	21	15
2	8	34.734.271,00	34.734.271,00	34.734.271,00	0	184	10	26
	9	70.720.686,30	75.252.551,36	70.720.686,30	6,41	86.400,00	24	12
	10	61.493.096,85	63.248.259,38	61.493.096,85	2,85	86.400,00	21	15
	11	102.844.792,60	106.736.144,70	102.844.792,60	3,78	86.400,00	34	14
3	12	92.814.388,40	97.087.620,80	92.814.388,40	4,6	86.400,00	31	17
	13	71.357.115,85	77.437.858,38	71.357.115,85	8,52	86.400,00	27	9
	14	62.194.294,30	72.999.919,78	62.194.294,30	9,01	86.400,00	24	12
	15	103.734.785,00	109.936.723,00	103.734.785,00	6,15	86.400,00	36	12
4	16	102.734.450,00	105.058.526,12	102.734.450,00	6,14	86.400,00	33	15
	17	71.663.758,65	74.281.255,10	71.663.758,65	3,65	86.400,00	25	11
	18	62.471.157,55	64.031.950,09	62.471.157,55	2,5	86.400,00	22	14
	19	103.982.833,90	106.681.175,37	103.982.833,90	2,59	86.400,00	35	13
5	20	93.007.384,75	98.691.422,53	93.007.384,75	6,11	86.400,00	32	16
	21	71.798.051,85	74.265.897,67	71.798.051,85	3,44	86.400,00	26	10
	22	62.610.682,30	64.042.918,09	62.610.682,30	2,29	86.400,00	23	13
	23	104.050.562,55	110.784.444,00	104.050.562,55	6,47	86.400,00	37	11
6	25	93.922.206,45	107.661.191,02	93.922.206,45	8,18	86.400,00	34	14

Analisando os resultados obtidos no Grupo 1 conclui-se que as instâncias obedeceram todas as restrições impostas no modelo matemático. O CPLEX rodando o modelo matemático proposto, mostrou ser capaz de resolver o problema de planejamento das rotas dos recursos para atendimento às OMs, alcançando soluções para as instâncias testadas. Na Figura 2 é apresenta o detalhamento das rotas dos recursos utilizados na Instância 1.

Nota-se que o recurso M3, inicia sua rota R2 a partir do pátio P2 e desloca-se até o trecho T21 para atender a OM2. Após atender a OM2 o recurso M3 dirige-se para o pátio virtual P2, finalizando o turno de trabalho da rota R2. Nas demais rotas o recurso M3 não realizou

atendimentos. A mesma analise foi feita para os outros recursos utilizados na roteirização. Cabe ressaltar, que o recurso M5, na rota R1, deslocou-se do pátio P3 para o pátio virtual P2. Isso ocorreu porque o CPLEX entendeu que é melhor começar a rota R2 no pátio P2 por estar mais próximo a OM7 que será atendida pelo recurso M5 na rota R2. Assim, conclui-se que todas as OMs foram atendidas com sucesso, obedecendo às restrições impostas no problema.

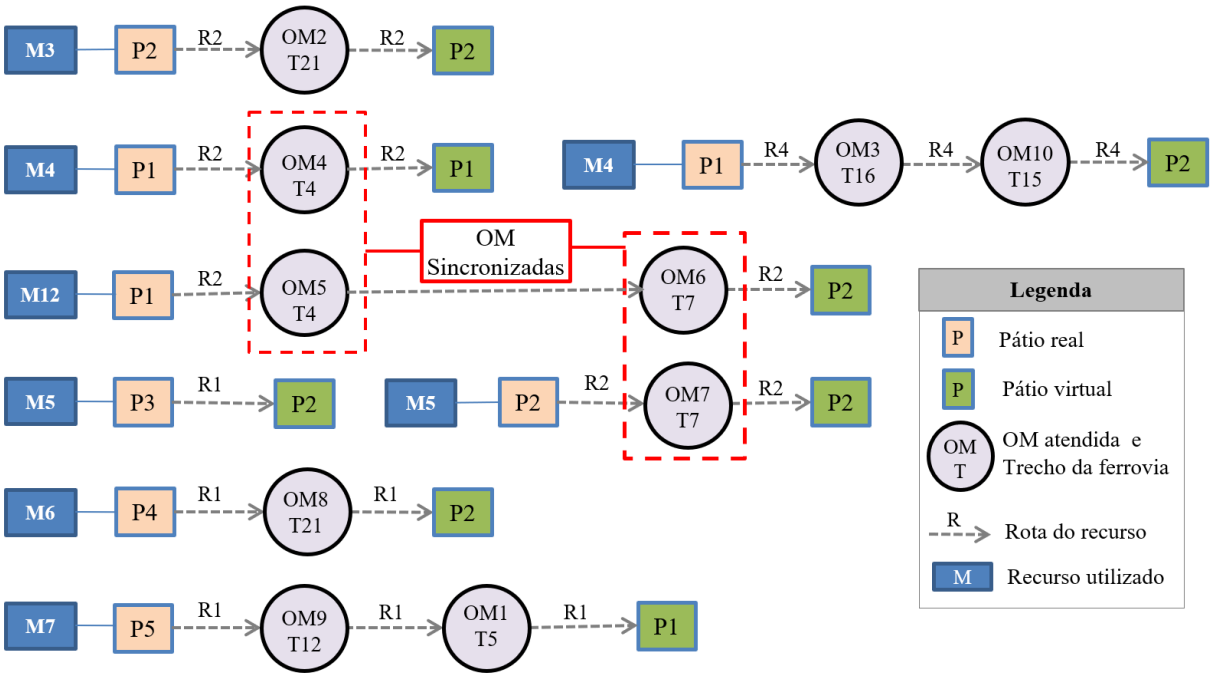


Figura 2. Detalhamento das rotas dos recursos utilizados na Instância 1.

No Grupo 2, foi analisado a influência do período máximo para iniciar a OM. No Gráfico 1, nota-se que a Instâncias 5 conseguiu atender 27 das 36 OMs solicitadas, isso ocorreu porque o período máximo para iniciar uma OM é amplo com 72 horas, deixando uma margem maior para o CPLEX decidir qual horário iniciar as OMs. Portanto, nas demais instâncias do Grupo 2, a quantidade de OMs atendidas foram diminuindo, já que o período máximo para iniciar a OM foi reduzido até o total de zero hora, ou seja, o atendimento deve ser iniciado exatamente no momento solicitado. Por conta disso, o CPLEX optou por atender, primeiramente, as OMs com maior prioridade, e deixou de atender algumas com menor prioridade. Assim, percebe-se que o aumento do período máximo para iniciar a OM pode aumentar a capacidade de atendimento às OMs.

No Grupo 3 o CPLEX rodando o modelo matemático encontrou solução para todas as instâncias testadas, mostrando ser capaz de atender um número considerado de OMs dentro do período de planejamento estimado. O Grupo 4 representa a possibilidade de aquisição de novos equipamentos e pessoal a partir da inserção de um maior número de recursos disponíveis. Como resultado desse conjunto de instâncias percebe-se um ganho muito modesto no atendimento às OMs solicitadas, principalmente se comparado ao resultado do Grupo 3, que possui um número menor de recursos disponíveis na frota. O aumento na quantidade de recursos consequentemente gera um aumento dos custos da ferrovia, principalmente se considerar aquisição de novas máquinas de via. Segundo dados

do Caderno de Engenharia da ANTT (ANTT, 2019b), o custo de aquisição de uma máquina desguarnecedora de lastro, pode chegar ao valor R$ 19.345.969,72 milhões de reais. Assim, os resultados obtidos com no Grupo 4 mostram que a aquisição de novos recursos pode não ser a melhor opção para aumentar o atendimento às OMs, principalmente se forem considerados os elevados custos de aquisição das máquinas de via.

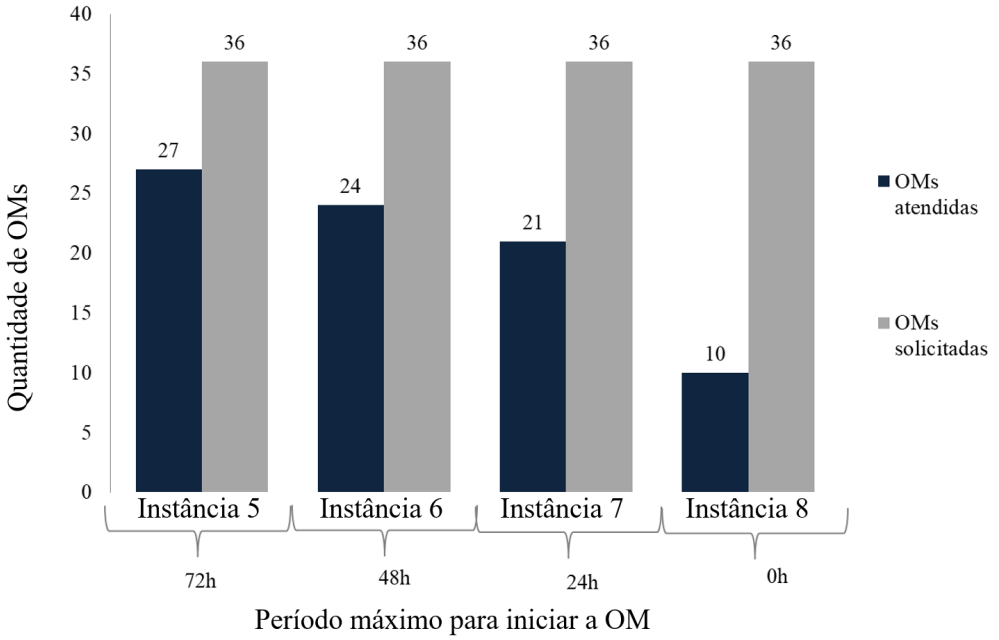


Gráfico 1. Capacidade de atendimento às OMs variando o período máximo para iniciar a OM.

Os Grupos 5 e 6 foram criados para verificar se o aumento na produtividade (m/h) dos recursos aumenta a quantidade de OMs atendidas, dentro do horizonte de planejamento estimado. Em ambos os grupos percebe-se um aumento modesto na quantidade de OMs atendidas, principalmente se comparar com o resultado obtido no Grupo 3 que apresenta instâncias semelhantes porém com a capacidade de produtividade normal. Logo percebe-se que o aumento da produtividade dos recursos, seja em 10% ou em 20%, pode não ser a melhor solução, quando se busca aumentar o número de OMs atendidas dentro do horizonte de planejamento considerado. Uma melhor solução para aumentar o número de OMs atendidas pode ser alcançada através da flexibilização do período máximo para atendimento à OM, testado no Grupo 2. Assim, uma maneira de otimizar o número de OMs atendidas dentro do horizonte de planejamento estimado, pode ser feita através da união de períodos mais flexíveis para iniciar a OM com o aumento da produtividade dos recursos, quando possível. Após as análises realizadas, conclui-se que o modelo matemático proposto é uma ferramenta aplicável ao problema real da EFVM de planejamento das rotas dos recursos para atendimento às OMs da superestrutura ferroviária, respeitando todas as restrições da ferrovia.

6. CONCLUSÕES

Este artigo estudou o problema do planejamento do atendimento às OMs da superestrutura ferroviária. Este problema é complexo e possui algumas limitações que consideram a

possibilidade de não atender todas OMs no período de planejamento estimado, tanto pela limitação imposta pelo período máximo para atendimento da OM (janela de tempo), como pela necessidade de atender OMs prioritárias. Além disso, para atender determinadas OMs pode ser necessário a ocorrência da sincronização de recursos e da precedência entre as OMs, ou seja, qual OM deve ser executada antes de outra OM iniciar.

O objetivo é atender ao máximo de OMs possíveis dentro do período de planejamento e, ao mesmo tempo, minimizar os custos por quilometro rodado de cada recurso e minimizar o atraso entre o momento efetivo de início do atendimento à OM e o momento solicitado para início. Para tanto, foi proposto um modelo matemático que integrou oito modelos de roteirização de veículos. Na literatura, após a revisão bibliográfica, não foi encontrado nenhum artigo publicado que integrasse os oito modelos matemáticos. No mais, também não foram encontrados artigos que tratassem do problema de planejamento dos recursos ferroviários da forma como foram tratados nesse artigo. Assim, entende-se que esta nova abordagem contribui para futuros estudos no meio científico sobre manutenção da superestrutura ferroviária.

O modelo foi aplicado a EFVM e foram testadas 24 instâncias com dados reais da ferrovia e o CPLEX rodando o modelo matemático proposto encontrou soluções para todas as instâncias testadas. Com os resultados obtidos, três análises principais foram realizadas para verificar o impacto gerado no atendimento às OMs da superestrutura ferroviária. A primeira análise foi com a variação do período máximo para iniciar a OM, a segunda análise foi feita com a inserção de um maior número de recursos disponíveis para atendimento às OMs e a terceira análise foi realizada com o aumento da produtividade (m/h) dos recursos durante a manutenção.

Os resultados mostraram que períodos mais flexíveis para iniciar as OMs, podem aumentar o número de OMs atendidas, dentro do horizonte de planejamento estimado. Indicando que o gestor de planejamento da manutenção deve ter uma atenção especial, na identificação antecipada das anomalias causadas na superestrutura ferroviária, a fim de emitir OMs com períodos mais flexíveis para inicio da manutenção. Além disso, verificou-se também que a inserção de um maior número de recursos, pode não ser a solução ideal para maximizar o número de OMs atendidas, principalmente se considerarmos os elevados custos para aquisição de novas máquinas de via. Por último, constatou-se que o aumento na produtividade dos recursos trouxe ganhos muito pequenos no número de OMs atendidas, logo, o esforço para aumentar a produção pode não ser a melhor solução quando se busca maximizar o número de OMs atendidas, no período de planejamento estimado.

Assim sendo, o modelo proposto se mostra aplicável ao planejamento das rotas dos recursos para atendimento às OMs da superestrutura ferroviária, como também, uma ferramenta para apoiar decisões estratégicas, como estudo de melhorias operacionais e priorização de investimentos, tornando o planejamento da manutenção ferroviária mais eficiente. 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. Importante destacar que o problema proposto pela ferrovia também pode ser utilizado pelas equipes de manutenção de

estradas de rodagem, portos e aeroportos. Propõe-se como trabalho futuro a elaboração de uma meta-heurística, por exemplo, Ant Colony Optimization (ACO) ou Simulated Annealing (SA), para resolver o modelo matemático proposto.

REFERÊNCIAS

Ait Haddadene, S.R.; N. Labadie e C. Prodhon (2016) A GRASP × ILS for the vehicle routing problem with time windows, synchronization and precedence constraints. *Expert Systems with Applications*, v. 66, p. 1339-51. DOI: 10.1016/j.eswa.2016.09.002.

ANTF (2019) *Associação Nacional do Transportes Ferroviários: Informações Gerais.* Disponível em: <http://www.antf.org.br/informacoes-gerais/> (acesso em 08/05/2023).

ANTT (2019a) *Caderno de Engenharia*. Brasília, DF: Agência Nacional de Transportes Terrestres.

ANTT (2019b). *Manual de Custos Referências Ferroviários: Metodologia e Conceitos.* Brasília, DF: Agência Nacional de Transportes Terrestres.

Bredström, D. e M. Rönnqvist (2008) Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints. *European Journal of Operational Research*, v. 191, n. 1, p. 19-31. DOI: 10.1016/j.ejor.2007.07.033.

Carvalhaes, B.B.; R. de Alvarenga Rosa; M.A. D'Agosto et al. (2017). A method to measure the eco-efficiency of diesel locomotive. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 51, pp. 29-42. DOI: 10.1016/j.trd.2016.11.031.

Cattaruzza, D.; N. Absi e D. Feillet (2018) Vehicle routing problems with multiple trips. *Annals of Operations Research*, v. 271, n. 1, p. 127-59. DOI: 10.1007/s10479-018-2988-7.

Drexl, M. (2012) Synchronization in vehicle routing: a survey of VRPs with multiple synchronization constraints. *Transportation Science*, v. 46, n. 3, p. 297-316. DOI: 10.1287/trsc.1110.0400.

Higgins, A.; L. Ferreira e M. Lake (1999). Scheduling rail track maintenance to minimise overall delays. In *International Symposium on Transportation and Traffic Theory.* Oxford: Elsevier Science, p. 779-796. Disponível em: <http://eprints.qut.edu.au/2417> (acesso em 08/05/2023).

IBM (2020) IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.10: *using logical constraints*. Disponível em: <https://www.ibm.com/support/pages/downloading-ibm-ilog-cplex-optimization-studio-v12100 > (acesso em 08/05/2023).

Labadie, N.; C. Prins e Y. Yang (2014). Iterated local search for a vehicle routing problem with synchronization constraints. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Operations Research and Enterprise Systems.* Angers, France: Science and Technology Publications, p. 257-263. DOI: 10.5220/0004837502570263

Lidén, T. e M. Joborn (2017) An optimization model for integrated planning of railway traffic and network maintenance. *Transportation Research Part C, Emerging Technologies*, v. 74, p. 327-47. DOI: 10.1016/j.trc.2016.11.016.

Liu, R.; Y. Tao e X. Xie (2019) An adaptive large neighborhood search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and synchronized visits. *Computers & Operations Research*, v. 101, p. 250-62. DOI: 10.1016/j.cor.2018.08.002.

López-Aguilar, E.; V. Boyer; M.A. Salazar-Aguilar et al. (2018) Linear formulations for the vehicle routing problem with synchronization constraints. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, v. 57, n. 3, p. 453-62. DOI: 10.1134/S106423071803005X.

Montoya-Torres, J.; J. López Franco; S. Nieto Isaza et al. (2015) A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. *Computers & Industrial Engineering*, v. 79, p. 115-29. DOI: 10.1016/j.cie.2014.10.029.

PETROBRAS. Fórmulas de Conversão (2020). Disponível em: <http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/destaques-operacionais/formulas-de-conversao>. (acesso em: 30/01/2020).

Quiroga, L.M. e E. Schnieder (2010) A heuristic approach to railway track maintenance scheduling. *WIT Transactions on the Built Environment*, v. 114, p. 687-99. DOI: 10.2495/CR100631.

Rasmussen, M.S.; T. Justesen; A. Dohn et al. (2012) The home care crew scheduling problem: preference-based visit clustering and temporal dependencies, *European Journal of Operational Research*. v. 219, n. 3, p. 598-610. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.10.048.

Sedighizadeh, D. e H. Mazaheripour (2018) Optimization of multi objective vehicle routing problem using a new hybrid algorithm based on particle swarm optimization and artificial bee colony algorithm considering precedence constraints. *Alexandria Engineering Journal*, v. 57, n. 4, p. 2225-39. DOI: 10.1016/j.aej.2017.09.006.

Su, Z. e B. Schutter (2018) Optimal scheduling of track maintenance activities for railway networks. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 9, p. 386-91. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.07.063.

Toth, P. e D. Vigo (2014). Vehicle routing problems, methods and applications. In Toth, P. e Vigo, D. (eds.) *Monographs on Discrete Mathematics and Applications.* Philadelphia: SIAM.

Trachanatzi, D.; E. Tsakirakis; M. Marinaki et al. (2019) A memetic algorithm for the team orienteering problem. In Moscato, P. e Vries, N. (eds.) *Business and Consumer Analytics: New Ideas*. Cham: Springer, p. 609-635. DOI: 10.1007/978-3-030-06222-4_14

Vale (2009) *Manual técnico da via permanente*. Disponível em: <https://www.academia.edu/35196754/MANUAL_T%C3%89CNICO_DA_VIA_PERMANENTE/> (acesso em 08/05/2023).

Zare-Reisabadi, E. e S. Hamid Mirmohammadi (2015) Site dependent vehicle routing problem with soft time window: Modeling and solution approach. *Computers & Industrial Engineering*, v. 90, p. 177-85. DOI: 10.1016/j.cie.2015.09.002.