

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

GUILHERME DE ALMEIDA ELEUTÉRIO

**PLANEJAMENTO DAS ROTAS DOS RECURSOS FERROVIÁRIOS PARA
ATENDIMENTO ÀS ORDENS DE MANUTENÇÃO DA VIA PERMANENTE
CONSIDERANDO SINCRONISMO, PRECEDÊNCIA E PRIORIDADE.**

VITÓRIA
2021

GUILHERME DE ALMEIDA ELEUTÉRIO

**PLANEJAMENTO DAS ROTAS DOS RECURSOS FERROVIÁRIOS PARA
ATENDIMENTO ÀS ORDENS DE MANUTENÇÃO DA VIA PERMANENTE
CONSIDERANDO SINCRONISMO, PRECEDÊNCIA E PRIORIDADE.**

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.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

VITÓRIA
2021

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

E37p Eleutério, Guilherme de Almeida, 1989-
Planejamento das rotas dos recursos ferroviários para atendimento às ordens de manutenção da via permanente considerando sincronismo, precedência e prioridade. / Guilherme de Almeida Eleutério. - 2021.
96 f. : il.

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

1. Pesquisa Operacional. 2. Modelagem Matemática. 3. Transporte ferroviário de carga. 4. Ferrovias - Manutenções e reparos. 5. Engenharia Ferroviária. 6. Logística. I. Rosa, Rodrigo de Alvarenga. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

**PLANEJAMENTO DAS ROTAS DOS RECURSOS FERROVIÁRIOS PARA
ATENDIMENTO ÀS ORDENS DE MANUTENÇÃO DA VIA PERMANENTE
CONSIDERANDO SINCRONISMO, PRECEDÊNCIA E PRIORIDADE.**

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 Construção Civil.

Aprovada em 23 de março de 2021 por:

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Orientador - UFES

Prof. Dr. Macksuel Soares Azevedo
Examinador Interno - UFES

Prof. Dr. Glaydston Mattos Ribeiro
Examinador Externo – COPPE/UFRJ

AGRADECIMENTOS

Nesses anos de mestrado, de muito estudo, dedicação e aprendizado, gostaria de agradecer algumas pessoas que me acompanharam e foram fundamentais para concretização deste sonho. Agradeço aos meus familiares pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida. Por acreditarem em mim e não medir esforços para realização dos meus sonhos. Aos meus amigos pelo apoio e amizade em todos os momentos. Agradeço aos colegas do Laboratório de Modelagem Matemática e Meta-heurística Aplicada à Engenharia de Produção (LAMMEP) pelos conselhos e ensinamentos. Por fim, ao Professor Doutor Rodrigo de Alvarenga Rosa por sempre ter acreditado e depositado sua confiança em mim ao longo de todos esses anos de estudo. Sem sua orientação, apoio e amizade, não somente no desenvolvimento deste trabalho, mas em todo caminho percorrido até aqui, nada disso seria possível. Muito obrigado pelos ensinamentos e por ter me corrigido quando necessário sem nunca me desmotivar.

RESUMO

No Brasil os transportes ferroviários de carga alcançaram um elevado ganho de produtividade, graças aos investimentos que ocorreram no setor nos últimos anos. 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. Uma maneira de realizar as manutenções na superestrutura ferroviária é através da utilização dos 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), sendo que algumas OMs apresentam restrições de sincronismo, precedência e prioridade para início do atendimento. Neste contexto, esta pesquisa propõe um modelo matemático que considera a integração de oito diferentes modelos matemáticos para roteirização de veículos em um único modelo matemático, para planejar as rotas dos recursos para atendimento às OMs, buscando 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. A revisão da literatura mostra que não foram encontrados estudos sobre o planejamento das rotas dos recursos ferroviários para auxiliar nas manutenções da via permanente. Logo, o estudo contribui para o desenvolvimento e avanço nesse campo de pesquisa. Foram usados dados da Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM) para testar o modelo. Na EFVM atualmente as rotas dos recursos ferroviários são feitas com base na experiência da equipe de planejamento da manutenção ferroviária, logo o modelo matemático proposto entra como uma ferramenta de apoio para o planejador elaborar um plano de manutenção que traga uma melhor utilização dos recursos ferroviários. Os resultados mostraram que o aumento do período máximo para iniciar a OM pode aumentar a capacidade de atendimento às OMs pela equipe de manutenção, mostrando servir como uma ferramenta para apoiar decisões operacionais e estratégicas, tornando o planejamento da manutenção ferroviária mais eficiente.

Palavras-chave: Recurso Ferroviário, Superestrutura, Modelo Matemático e Sincronização.

ABSTRACT

In Brazil, rail freight transport has achieved a high productivity gain, thanks to the investments that have been placed in the sector in recent years. Due to the increase in the use of railroads, there was an increase in the demand for maintenance of the railway track structure, in order to repair the damage caused by transport. One way to carry out maintenance on the railway track structure is through the use of railway resources, which must be moved from one section of the railway to another. It is necessary to elaborate the route that each resource needs to accomplish in order to meet maintenance orders (OMs), with some OMs having restrictions of synchronism, precedence and priority to start the service. In this context, this research proposes a mathematical model that considers the integration of eight different mathematical models for vehicle routing in a single mathematical model, to plan the routes of the resources to attend OMs, seeking to maximize the number of OMs attended in the planning period and, at the same time, minimizing the costs per kilometer traveled for each resource and minimizing the delay between the effective moment when OM service starts and the time requested to start. The literature review shows that no studies were found on the planning of the railroad resources routes to assist in the maintenance of the track. Therefore, the study contributes to the development and advancement in this field of research. Data from the Vitória Minas Railway (EFVM) were used to test the model. At EFVM, currently, rail resources routes are based on the experience of the railway maintenance planning team, so the proposed mathematical model comes in as a support tool for the planner to develop a maintenance plan that brings a better use of rail resources. The results showed that the increase in the maximum period to start OM can increase the capacity of attendance to the OMs by the maintenance team, showing to serve as a tool to support operational and strategic decisions, making railway maintenance planning more efficient.

Key-words: Railway Resource, Track structure, Mathematical Model and Synchronization.

LISTA DE SIGLAS

AMV - Aparelho de Mudança de Via

ANTT - Agencia Nacional de Transportes Terrestres

ANTF - Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários

AFRSP - *Aircraft Fleet Routing and Scheduling Problem*

ALNS - *Adaptive Large Neighborhood Search*

CARP - *Capacitated Arc Routing Problem*

CARP-RP - *Capacitated Arc Routing Problem with Refill Points*

CARP-RP-ML - *Capacitated Arc Routing Problem with Refill Points and Multile Loads*

CMVRP - *Combined Manpower Vehicle Routing Problem with Multi-Staged Services*

CPP - *Curfew Planning Problem*

CVRP - *Capacitated Vehicle Routing Problem*

CVRPSC - *Capacitated Vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints*

EFVM - Estrada de Ferro Vitória Minas

HF - *Heterogeneous Fleet*

HHC - *Home Health Care*

MAPTWTC - *Manpower Allocation Problem with Time Windows and Job-teaming Constraints*

MDVRP – *Mult-depot Vehicle Routing Problem*

MTVRP – *Mult-trip Vehicle Routing Problem*

MIP - Programação Inteira Mista

MILP – Programação Linear Inteira Mista

OMs – Ordens de manutenção

PS - *Precedence Synchronization*

PPGEC - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

RH's - *Housings, Locações*

SANRP - Synchronized Arc Routing and Node Routing Problem

SCSP - Synchronization Constraints with Temporal Precedence

SDVRP - Site-dependent Vehicle Routing Problem

SS - Simultaneous Synchronization

SVRP - Vehicle Routing Problem with Exact Synchronization

SyARP - Synchronized Arc Routing Problem

TISP – Track Inspection Scheduling Problem

TKU - Tonelada por Quilômetro Útil

TOP - Team Orienteering Problem

TU - Tonelada Útil

TW - Time Windows

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo

VP - Via Permanente

VRP - Vehicle Routing Problem

VRPHF – Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet

VRPS - Vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints

VRPSS - Vehicle Routing Problem with Simultaneous Synchronization Constraints

VRPSP-TW - Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Windows

VRPTW - Vehicle Routing Problem with Time Windows

VRPTWSyn - Vehicle Routing Problem with Time Windows and Synchronized Visits

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| <i>Figura 1: Fluxo de atendimento às OMs.</i> | 17 |
| <i>Figura 2: Componentes da superestrutura ferroviária.</i> | 23 |
| <i>Figura 03: Esquematização do Mult-depot vehicle routing problem (MDVRP).</i> | 28 |
| <i>Figura 04: Esquematização do Mult-trip Vehicle Routing Problem (MTVRP).</i> | 29 |
| <i>Figura 05: Fluxograma (CVRPSC).</i> | 33 |
| <i>Figura 06: Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM).</i> | 39 |
| <i>Figura 07: Esquematização dos trechos da ferrovia.</i> | 40 |
| <i>Figura 08: Representação do turno completo de trabalho.</i> | 41 |
| <i>Figura 09: Conjuntos do modelo matemático.</i> | 45 |
| <i>Figura 10: Detalhamento da sincronização ocorrida na instância 1.</i> | 67 |
| <i>Figura 11: Capacidade de atendimento às OMs.</i> | 69 |
| <i>Figura 12: Comparação entre OMs atendidas dos Grupos 4 e 3.</i> | 73 |
| <i>Figura 13: Comparação entre OMs atendidas dos Grupos 5 e 3.</i> | 75 |
| <i>Figura 14: Comparação entre OMs atendidas dos Grupos 6 e 3.</i> | 76 |
| <i>Figura 15: Comparação entre OMs atendidas dos Grupos 3, 5 e 6.</i> | 77 |
| <i>Figura 16: Comparação entre OMs atendidas das Instâncias 5, 17 e 21.</i> | 78 |
| <i>Figura 17: Carro ultrassom.</i> | 89 |
| <i>Figura 18: Carro controle.</i> | 90 |
| <i>Figura 19: Máquina esmerilhadora de trilho.</i> | 90 |
| <i>Figura 20: Máquina reguladora de lastro.</i> | 91 |
| <i>Figura 21: Máquina socadora de lastro.</i> | 92 |
| <i>Figura 22: Máquina socadora de chave.</i> | 92 |
| <i>Figura 23: Máquina desguarnecedora de lastro.</i> | 93 |
| <i>Figura 24: Máquina multifunção (socadora e desguarnecedora).</i> | 94 |
| <i>Figura 25: Máquina reperfiladora de trilhos.</i> | 94 |
| <i>Figura 26: Equipe de apoio a máquina via.</i> | 95 |
| <i>Figura 27: Equipe de manutenção manual da superestrutura.</i> | 96 |
| <i>Figura 28: Caminhão rodoferroviário.</i> | 96 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabela 1: Resumo dos artigos levantados</i> | <i>38</i> |
| <i>Tabela 2: Tipos de recursos</i> | <i>53</i> |
| <i>Tabela 3: Tipos de serviços realizados pelos recursos.</i> | <i>54</i> |
| <i>Tabela 4: Relação do recurso com o tipo de serviço.....</i> | <i>54</i> |
| <i>Tabela 5: Produtividade de cada recurso.....</i> | <i>55</i> |
| <i>Tabela 6: Acréscimo na quantidade de recursos</i> | <i>57</i> |
| <i>Tabela 7: Produtividade dos recursos.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Tabela 8: Dados das instâncias de testes.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Tabela 9: Análise de sensibilidade dos parâmetros da Função Objetivo.</i> | <i>61</i> |
| <i>Tabela 10: Resultados encontrados pelo CPLEX</i> | <i>62</i> |
| <i>Tabela 11: Análise dos resultados operacionais</i> | <i>63</i> |
| <i>Tabela 12: Resumo dos resultados da Instância 1.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Tabela 13: Resumo do resultados da Instância 11</i> | <i>71</i> |
| <i>Tabela 14: Resumo do resultados da Instância 12.</i> | <i>72</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | OBJETIVOS..... | 19 |
| 1.1.1 | Objetivo Geral | 19 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 19 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA..... | 19 |
| 1.3 | ESTRUTURA DO PROJETO DE PESQUISA..... | 20 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 22 |
| 2.1 | MÁQUINAS DE VIA | 22 |
| 2.2 | PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO FERROVIÁRIA..... | 23 |
| 2.3 | CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM E SUAS VARIANTES..... | 26 |
| 2.4 | CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH SYNCHRONIZATION CONSTRAINTS (CVRPSC) | 30 |
| 2.4.1 | <i>Task Synchronization</i> | 31 |
| 2.4.2 | <i>Operation Synchronization</i> | 31 |
| 2.4.3 | <i>Movement Synchronization</i> | 32 |
| 2.4.4 | <i>Load Synchronization</i> | 32 |
| 2.4.5 | <i>Resource Synchronization</i> | 33 |
| 3 | PROBLEMA ESTUDADO | 39 |
| 4 | MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO | 43 |
| 5 | GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS | 53 |
| 5.1 | GERAÇÃO DAS INSTÂNCIAS DE TESTE | 53 |
| 6 | RESULTADOS E ANÁLISES | 60 |

| | |
|--|-----------|
| 6.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DA F.O | 60 |
| 6.2 RESULTADOS DO CPLEX E ANÁLISES | 62 |
| 7 CONCLUSÕES..... | 79 |
| REFERÊNCIAS..... | 82 |
| APÊNDICE A..... | 89 |

1 INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário apresenta um papel fundamental para o setor logístico, sendo capaz de transportar cargas e pessoas para lugares distantes com elevada eficiência energética, um baixo custo de transporte e maior segurança quando comparado a outros modos do sistema de transporte (ANTT, 2019a).

No mundo todo, as ferrovias bem-sucedidas investem em infraestrutura e soluções logísticas inovadoras, possibilitando o intercâmbio entre os diferentes modos de transportes, tornando o transporte ferroviário de carga altamente competitivo. Além disso, ferrovias de carga também oferecem benefícios que são cada vez mais valorizados para as tomadas de decisões políticas, particularmente, nas áreas de transporte, segurança e meio ambiente (ARITURA, 2015).

No Brasil, apesar da malha ferroviária ser considerada pequena, quando comparada com os países desenvolvidos, o transporte de cargas alcançou um elevado ganho de produtividade, graças aos investimentos que ocorreram no setor nos últimos anos. As aplicações desses recursos ocasionaram em um aumento da eficiência das ferrovias, no ano de 2018 a produção ferroviária teve um aumento de 195% atingindo cerca de 407 bilhões de TKU (toneladas por quilômetro útil). Houve também um aumento na frota de material rodante que passou de 1.154 mil locomotivas, no ano de 1997, para 3.515 mil unidades no ano de 2018, uma elevação de 204 %. No mesmo período o número vagões também sofreu um aumento passando de 43.816 mil unidades para 113.680 mil unidades, um aumento equivalente de 159%. Conseqüentemente o volume de carga transportada nas ferrovias atingiu o recorde de 569 milhões de toneladas úteis (TU) em 2018, um crescimento de 5,7% em relação ao volume transportado em 2017, cerca de 539 milhões de toneladas (ANTF, 2019a).

Com o aumento da utilização das ferrovias, as ocorrências de manutenção na malha ferroviária são frequentes, a fim de reparar os danos ocasionados à via permanente, garantir a continuidade das operações e evitar a ocorrência de acidentes, tornando a matriz de transporte ferroviário mais eficiente, segura e competitiva (ANTT, 2019a).

Uma ferrovia pode ser dividida em quatro partes denominadas de: via permanente, material rodante, sinalização e operação. Dentre essas quatro partes, pode-se destacar a via permanente, que é em essência o caminho por onde o trem circulará.

Ela é dividida em: infraestrutura e superestrutura. A infraestrutura pode ser definida como a base da ferrovia, ou seja, o conjunto de obras e técnicas destinado a formar o alicerce da estrada e suportar a superestrutura. A superestrutura ferroviária é o segmento da via permanente que recebe os impactos da composição ferroviária, sendo seus elementos (trilho, dormente, lastro, sublastro e aparelho de mudança de via) sujeitos a anomalias como, desgastes, desnivelamento, empeno, colmatação de lastro entre outros, que podem inviabilizar a utilização da ferrovia, sendo necessária a realização da manutenção para correção dessas anomalias (ROSA; RIBEIRO, 2016). Dentre as duas partes da via permanente, esta pesquisa irá tratar da manutenção da superestrutura.

Uma maneira de realizar essas manutenções é por meio da utilização de recursos ferroviários, que podem executar diferentes tipos de serviços, tais como: nivelamento da linha, reposição de lastro, desguarnecimento de lastro, troca de dormente, dentre outros (ROSA; RIBEIRO, 2016). Neste trabalho os recursos ferroviários considerados foram: 1) Máquinas de via de diversos tipos; 2) Equipe técnica de profissionais qualificados; e 3) Veículos de apoio à manutenção. Doravante neste trabalho os recursos ferroviários serão denominados simplesmente por recursos.

Neste contexto, esta pesquisa analisa e propõe soluções para o planejamento da alocação dos recursos para atendimento às demandas de manutenção da superestrutura. Para planejar a manutenção da superestrutura ferroviária, a equipe de planejamento da manutenção emite ordens de manutenção (OMs). Cada OM é definida com base nos seguintes dados: o trecho onde ocorrerá a manutenção, os serviços a serem realizados 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 elabora de forma empírica as rotas 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 transporte de passageiros. O que se espera realizar são as rotas que esses recursos devem fazer, ou seja, a sequência de atendimento às OMs a fim de atender ao máximo de OMs possíveis.

Cada OM exige serviços específicos para o tipo de anomalia detectada no trecho da ferrovia, sendo que cada serviço é atendido por recursos especializados para tal. Para cada manutenção solicitada, um ou mais recursos devem ser alocados para atender a solicitação. Esta alocação é realizada em função dos serviços que cada recurso pode realizar, 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. Quando isso ocorre 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 término da manutenção. Essa situação ocorre, sobretudo, com a equipe técnica de profissionais qualificados que deve trabalhar em conjunto com a máquina de via durante todo o período 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. Cabe ressaltar que os aspectos descritos anteriormente, sincronismo, prioridade e precedência, são informados pela equipe de manutenção no momento da emissão da OM.

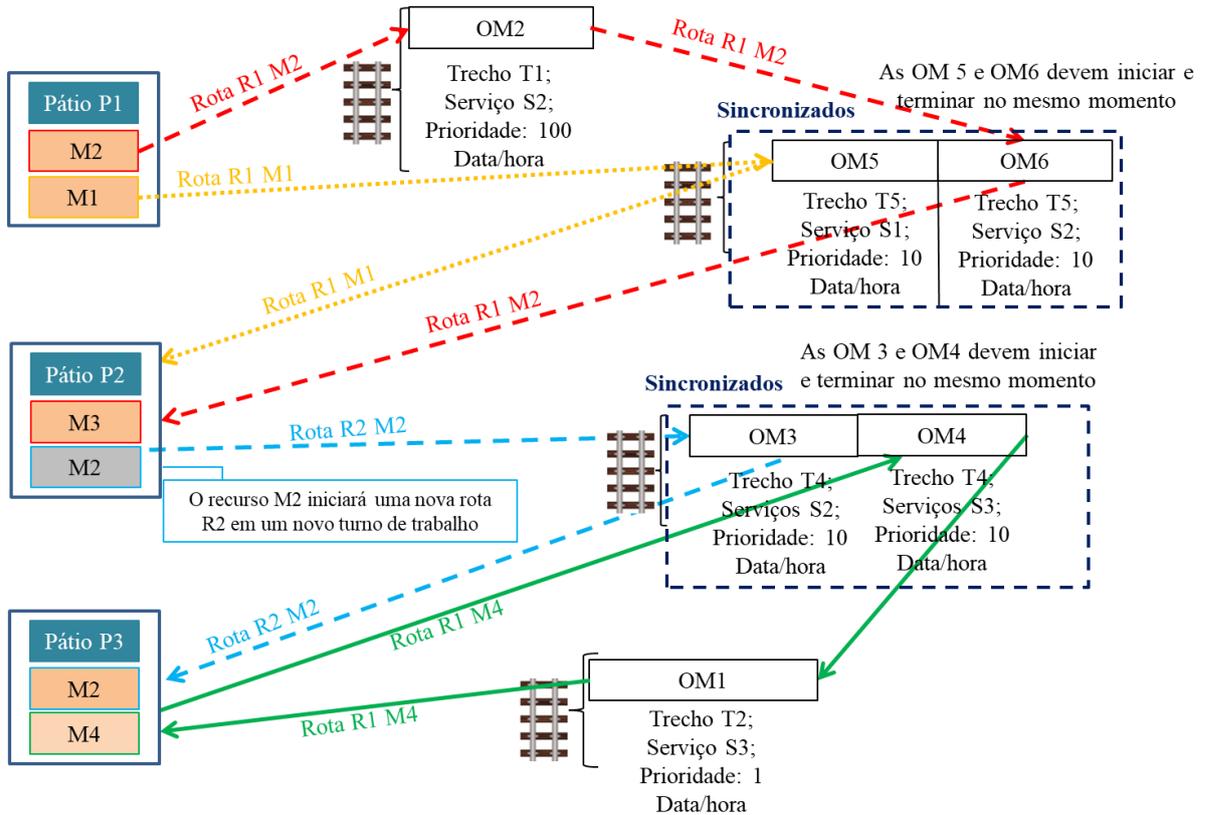
Com base em todas as OMs solicitadas, a equipe de planejamento da manutenção ferroviária elabora o planejamento da sequência de atendimento às OMs, visando reduzir a diferença entre a data/hora de atendimento à OM e a data/hora desejada para início da manutenção. Assim, a equipe de planejamento pode visualizar de maneira esquemática como será a sequência de trabalho de cada recurso (Figura 01).

No início do planejamento, é conhecido o pátio ferroviário onde cada recurso está estacionado para iniciar um turno de trabalho. Ao fim do turno de trabalho, cada

recurso se deslocará para um pátio ferroviário, a fim de aguardar o início do próximo turno. Com base nessa informação, o planejador elabora para cada recurso uma sequência de rotas visando o atendimento à OM, sendo que o recurso inicia seu turno a partir do pátio que está estacionado e termina o turno em qualquer outro pátio da ferrovia.

Na Figura 1, como exemplo, o recurso M2, que está estacionado no pátio P1, viaja até o trecho T1 pela rota R1 para realizar o atendimento à ordem de manutenção OM2, cujo serviço é S2 e que deve ser iniciado posteriormente à data/hora desejada. Depois, o recurso M2 viaja do trecho T1 para o trecho T5, onde realizará o atendimento à OM6, cujo serviço é S2 e que deve ser iniciado posteriormente à data/hora desejada. Vale ressaltar que a OM6 deverá ser atendida no mesmo momento das OM5 cujo serviço é S1 e que é atendido pelo recurso M1 no mesmo trecho T5, ocorrendo à sincronização entre essas OMs. Após atender a OM6 e a OM5 os recursos M2 e M1 viajam para o pátio P2 finalizando o turno de trabalho. Antes de iniciar um novo turno de trabalho os recursos M2 e M1 devem respeitar o período de descanso aguardando no pátio P2. Após cumprir o tempo de descanso o recurso M2 inicia uma nova viagem até o Trecho T4 pela rota R2 para realizar o atendimento à OM3, cujo serviço é S2 e que deve ser iniciado posteriormente à data/hora desejada. Cabe ressaltar que a OM3 deve começar junto com a OM4 cujo serviço é S3 e é atendido pelo recurso M4 no mesmo trecho T4, ocorrendo a sincronização entre essas OMs. Após atender a OM3 o recurso M2 viaja para o pátio P3 finalizando o seu turno de trabalho. Já o recurso M4 viaja até o trecho T2 para realizar o atendimento à OM1 cujo serviço é S3 e que deve ser iniciado posteriormente à data/hora desejada. Após atender a OM1 o recurso M4 viaja para o pátio P3 finalizando o seu turno de trabalho. Cabe ressaltar que todas as OMs contém o grau de prioridade de atendimento e a data e hora em que devem ser iniciados os atendimentos no trecho (janela de tempo), sendo que a sincronização entre os recursos e o início e término da operação de manutenção, devem ocorrer dentro do limite de tempo estimado pela equipe de planejamento.

Figura 01 – Fluxo de atendimento às OMs



Fonte: Autor.

Depois de definir os trechos que devem ser reparados, os tipos de serviços que devem ser executados e a ordem prioritária dos atendimentos, a equipe de planejamento da manutenção elabora a programação dos atendimentos às OMs, de forma empírica, designando os recursos para os trechos a serem reparados, na qual a equipe procura a melhor forma de realizar a alocação desses recursos, estabelecendo rotas que devem atender a todas as requisições dos períodos informados, minimizando o número de recursos utilizados e o percurso total viajado.

Diante do exposto, esse trabalho propõe um modelo matemático para realizar o planejamento das rotas dos recursos para atendimento às OMs da superestrutura ferroviária, visando 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. Uma abordagem possível para resolver o planejamento dos recursos para atender às OMs é aborda-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 dos recursos para atendimento às OMs passa a ser a elaboração das rotas de cada veículo (recurso) atendendo a vários clientes (OM), e considerando todas as premissas citadas anteriormente como: 1) pode ser que nem todos os clientes serão atendidos; 2) restrições de sincronismo; 3) restrições de precedência; e 4) prioridade de atendimento da OM.

O modelo matemático proposto 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); 2) *Capacitated Vehicle Routing Problem with Precedence Constraints* (CVRPPC); 3) *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP); 4) *Multi-Trip Vehicle Routing Problem* (MTVRP); 5) *Team Orienteering Problem* (TOP); 6) *Site-dependent Vehicle Routing Problem* (SDVRP); 7) *Vehicle Routing Problem with Time Windows*; e 8) *Vehicle Routing Problem with Heterogenous Fleet*.

Para validação do modelo matemático proposto, foram utilizados os dados da Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM). A aplicação do modelo proposto se justifica para a EFVM, pois as operações de manutenção impactam de forma negativa a capacidade de circulação de trens na ferrovia e, atualmente, o planejamento da manutenção é realizado com base na experiência da equipe de planejamento, sendo assim, o modelo matemático proposto poderá servir como uma ferramenta de apoio ao planejador, para elaborar um plano de manutenção que traga uma melhor utilização dos recursos, maximizando o número de OMs atendidas no período de planejamento e reduzindo o tempo entre a solicitação de manutenção e o efetivo início da manutenção (VALE, 2019).

O problema de planejamento das rotas dos recursos visando atender às OMs da superestrutura ferroviária por meio do problema de roteamento de veículo, não foi encontrado na literatura. Como, até o momento, nenhuma pesquisa abordou a roteirização dos recursos para atendimento às OMs da superestrutura ferroviária, incorporando todas as restrições tratadas nesta pesquisa em um único modelo matemático, esta pesquisa visa preencher essa lacuna tornando-se uma oportunidade para o desenvolvimento e avanço nesse campo de pesquisa. Além disso, o modelo proposto é considerado inovador, pois propõe a adaptação dos

parâmetros e variáveis dos problemas de roteirização descritos anteriormente para a realidade do problema estudado nesta pesquisa.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Esta dissertação tem como objetivo elaborar um modelo matemático para planejar as rotas dos recursos ferroviários visando o atendimento das OMs da superestrutura ferroviária, objetivando maximizar o número de OMs atendidas 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.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Realizar o levantamento de informações do planejamento da utilização dos recursos na Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM) para elaboração do modelo matemático;
- Realizar o levantamento de dados sobre o planejamento da utilização dos recursos na Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM) para geração das instâncias;
- Aplicar o modelo matemático ao problema real de planejamento das rotas dos recursos na EFVM e avaliar os eventuais ganhos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Na literatura científica não foi encontrado estudos realizados referentes ao planejamento das rotas dos recursos visando o atendimento às OMs da superestrutura ferroviária. Até o momento não foi identificada nenhuma pesquisa que realiza-se essa designação por meio de modelo matemático, e muito menos baseado em oitos diferentes tipos de problema de roteirização. Logo, esta pesquisa

visa preencher essa lacuna, tornando-se uma oportunidade para o desenvolvimento e avanço nesse campo de pesquisa.

Além disso, as manutenções podem ser consideradas como estratégias de negócios para as empresas, por estarem ligadas diretamente ao desempenho da produção e principalmente ao aumento da segurança e confiabilidade de suas atividades. As ferrovias de cargas mal gerenciadas são consideradas um dreno para os orçamentos, resultando na alocação inadequada de recursos, que poderiam ser usados de maneira mais produtiva em outros setores.

Fatores como os grandes volumes de cargas transportadas, a inter-relação entre manutenção e tráfego e os aspectos organizacionais, motivam a realização de um planejamento eficiente e coordenado. Há um conflito inerente ao definir os trechos da via em manutenção e os trechos disponíveis para o tráfego de trens, pois essas atividades são mutuamente excludentes. Portanto, a manutenção da via reduz a capacidade de circulação de trens da ferrovia, e para que essa redução tenha o menor impacto financeiro e operacional possível, é essencial a elaboração de um planejamento otimizado da manutenção (LIDÉN; JOBORN, 2016).

Nesse contexto, a modelagem matemática com base no CVRP e suas variantes podem entrar como uma ferramenta de suporte para o planejamento da manutenção, trazendo benefícios econômicos para a empresa responsável pela ferrovia. A ferramenta otimizará a alocação dos recursos disponíveis para realizar os reparos na via permanente, mantendo a confiabilidade e a segurança operacional da ferrovia.

1.3 ESTRUTURA DO PROJETO DE PESQUISA

Este trabalho está dividido em 06 capítulos, que estão distribuídos da seguinte forma:

O Capítulo 1 contém a introdução do trabalho, que contextualiza e define o problema a ser tratado propondo o desenvolvimento de um modelo matemático com base no problema de roteamento de veículo e suas variantes. Fazem parte deste capítulo, objetivo geral e os objetivos específicos, a justificativa do assunto e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura sobre os conceitos principais relativos ao problema tratado e sobre as bibliografias existentes.

O Capítulo 3 contém a contextualização da EFVM.

O Capítulo 4 apresenta o modelo matemático proposto que é objetivo geral da pesquisa bem como sua explicação.

O capítulo 5 contém a geração das instâncias testadas.

O capítulo 6 apresenta os resultados dos experimentos computacionais e subsequentes análises.

Por fim, as conclusões sobre a pesquisa e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 7, seguido pelas Referências Bibliográficas utilizadas.

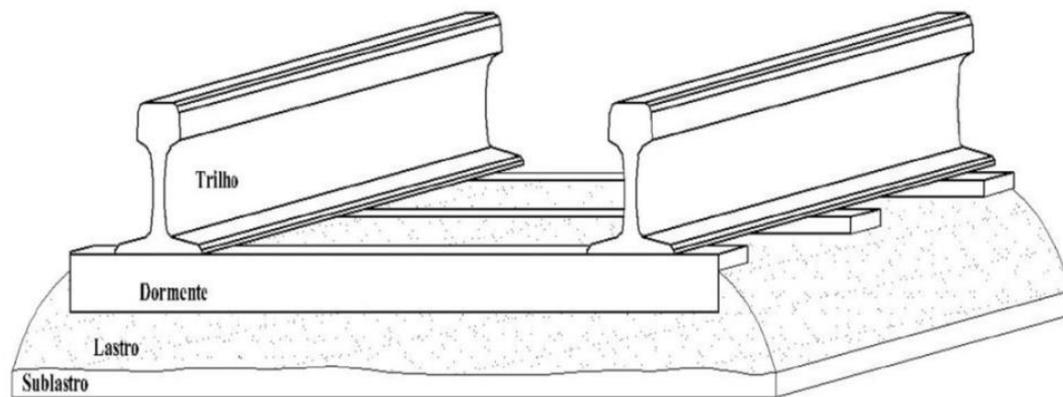
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda a definição e características dos recursos ferroviários definidos no trabalho, sendo eles: 1) Máquinas de via de diversos tipos; 2) Equipe técnica de profissionais qualificados; e 3) Veículos de apoio à manutenção. Além disso, é apresentado um levantamento bibliográfico feito sobre o planejamento da manutenção ferroviária com uso de modelos matemáticos. O capítulo também aborda o conceito do problema de roteirização de veículo e suas variantes como o *Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)*, *Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogenous Fleet (CVRPHF)*, *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows (CVRPTW)*, *Multi-Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP)*, *Multi-Trip Vehicle Routing Problem (MTVRP)*, *Capacitated Vehicle Routing Problem with Precedence Constraints (CVRPPC)*, *Team Orienteering Problem (TOP)* e *Site-dependent Vehicle Routing Problem (SDVRP)* e *Capacitated Vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints (CVRPSC)*, apresentando uma descrição com base na literatura sobre algumas aplicações do CVRPSC considerado a principal variante do CVRP utilizada no modelo matemático do trabalho.

2.1 MÁQUINAS DE VIA

A via permanente (VP), também conhecida como linha férrea, apresenta diversos elementos, cada um com uma função específica. Ela é composta pelas instalações e equipamentos que compõem as partes da ferrovia onde circulam os trens. A VP pode ser subdividida em duas partes, a infraestrutura e superestrutura. A infraestrutura é formada pelos elementos de terraplenagem, drenagem e obras de arte especial. Já a superestrutura é composta pelos elementos de trilho, dormente, lastro, sublastro e aparelho de mudança de via (AMV), sendo a sua estrutura sujeita aos impactos da composição ferroviária. A superestrutura ferroviária é esquematizada na Figura 2 a seguir:

Figura 2 – Componentes da superestrutura ferroviária



Fonte: Rodrigo e Ribeiro (2016).

Os impactos ocasionados à superestrutura geram anomalias nos seus elementos, como por exemplo, desgastes, desnivelamento, empeno, colmatação de lastro, entre outros, que podem inviabilizar a utilização da ferrovia, sendo necessária a realização da manutenção para correção dessas anomalias. (ROSA; RIBEIRO, 2016).

Para realizar a manutenção de forma eficiente, utilizam-se as chamadas máquinas de via, que de acordo com Rosa e Ribeiro (2016), são veículos rodantes que executam serviços especializados para atender determinado tipo de ocorrência de manutenção na malha ferroviária. Para fins de conhecimento os recursos ferroviários são apresentados no apêndice A.

2.2 PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO FERROVIÁRIA

Neste subcapítulo é apresentado o levantamento bibliográfico realizado com estudos que tratam do problema de planejamento da manutenção ferroviária com uso de modelos matemáticos. Os estudos envolvem tanto o planejamento da manutenção da superestrutura ferroviária como o agendamento das operações de manutenção. A seguir são apresentados os estudos.

Higgins, Ferreira e Lake (1999) trataram o problema de planejamento da manutenção ferroviária desenvolvendo um modelo matemático projetado para ajudar a resolver os conflitos existentes entre as operações de trens e o agendamento da atividade de manutenção. O objetivo é minimizar o atraso entre a alocação da atividade de manutenção e a circulação de trens. O modelo foi aplicado a um

corredor ferroviário de 89km na costa leste Australiana com um horizonte de planejamento de 4 dias. Para solucionar o problema os autores propuseram uma meta-heurística *Tabu Research*.

Nemani, Bog e Ahuja (2010) abordaram o problema de planejamento da manutenção ferroviária, conhecido como *curfew planning problem* (CPP). O CPP consiste em montar um cronograma anual para a equipe de manutenção executar reparos na superestrutura ferroviária, buscando reduzir o conflito existente entre a circulação de trem e a operação de manutenção. Os autores estudaram três modelos diferentes para solução do CPP (time-space network, set partitioning e column generation with team routes) e também propuseram uma heurística para resolver o modelo matemático.

Quiroga e Schinieder (2010) propuseram um método de previsão de deterioração da geometria do trilho e uma heurística para realizar os agendamentos das intervenções de manutenção realizada pela socadora, para as atividades de compactação e nivelamento da linha, visando à correção da geometria da linha. O objetivo é descobrir quando e onde devem ser realizadas as atividades de socaria. A aplicabilidade do modelo foi testada em 240km de uma linha de alta velocidade na França.

Bog et al. (2011) trataram do *curfew planning problem* (CPP) considerando os casos em que ocorre o fechamento completo da ferrovia para execução da manutenção ferroviária. Foram apresentados quatro algoritmos diferentes para solucionar o problema com o objetivo de minimizar o número de interrupções do tráfego de trens. Os algoritmos foram testados com instâncias reais de uma grande empresa ferroviária Norte-americana.

Peng et al. (2011) propuseram três modelos matemáticos e algoritmos para solucionar problemas de manutenção da via permanente, com destaque para *track inspection scheduling problem* (TISP), conhecido como o problema de programação de inspeção de trilho, que foi solucionado com base no problema de roteamento de veículo, objetivando minimizar os custos de viagens. Os autores também propuseram uma meta-heurística para resolução do modelo. Uma extensão do trabalho foi proposta por Peng e Ouyang (2012) com a introdução de outras restrições ao modelo matemático e também o desenvolvimento de um novo método

de solução. Os resultados finais mostram que o novo método de solução do modelo matemático é muito melhor em relação ao desempenho e a qualidade da solução.

Borraz-Sánchez e Klabjan (2012) abordaram o problema de manutenção ferroviária considerando a alocação de recursos ferroviários (pessoas e equipamentos) ao longo da ferrovia. Para solucionar o problema os autores desenvolveram um modelo matemático (job-team formulation) e uma heurística com abordagem de solução em duas etapas. O objetivo é minimizar os custos totais da operação de manutenção ferroviária.

Famurewa et al. (2015) trataram de dois problemas da manutenção ferroviária, a deterioração da geometria da linha e a programação de intervenções para realização da manutenção da socaria. Uma função de deterioração exponencial é aplicada para modelar a qualidade da geometria da linha, de uma série de segmentos de 200m de uma seção de linha de 130 km. Também foi desenvolvido um modelo empírico para recuperação da geometria após compactação. Esses dois modelos também são usados para gerar uma metodologia para otimizar o cronograma de intervenção para realização da socaria de lastro, minimizando o custo total das intervenções, enquanto a qualidade da geometria da linha é mantida de acordo com o limite desejável. O resultado deste trabalho sugere um plano de compactação que levará à alocação ideal da socaria. Santos, Teixeira e Antunes (2015) propuseram um modelo de regras de decisão para planejar e programar as intervenções de manutenção da via com foco na atividade de correção da geometria da linha. O objetivo do estudo é minimizar os custos de deslocamento das equipes e minimizar os dias de intervenções na via, garantindo que a geometria da linha esteja sempre dentro dos limites exigidos. Hakan Guler (2017) propôs um sistema de suporte de decisões baseado em algoritmo genético, para otimizar o planejamento da manutenção da superestrutura ferroviária, sobre tudo a manutenção da geometria da linha. O sistema foi testado em 180km de uma ferrovia na Turquia e analisa a estrutura da linha com uso de um banco de dados desenvolvido por profissionais especialista em ferrovia.

Lidén e Joborn (2017) apresentaram um modelo matemático para planejar o tráfego ferroviário, incluindo a manutenção ferroviária. O objetivo é minimizar os custos totais de operação ferroviária. O modelo busca otimizar janelas livres para alocação da atividade de manutenção, reduzindo o conflito com a circulação de trens na

ferrovia. Um novo estudo como forma de extensão do trabalho anterior foi proposto por Lidén, Kalinowski e Waterer (2018), que introduziram novas restrições ao modelo matemático proposto e desenvolveram um novo método de solução para o problema.

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. Para solucionar os autores utilizaram uma Programação Linear Inteira Mista (MILP) baseada no *Capacitated Arc Routing Problem with Fixed Cost* (CARPF). Os autores também consideram que o depósito virtual só pode armazenar um único tipo de veículo, sendo que a rota do veículo deve começar e terminar no mesmo depósito. O modelo foi aplicado a um estudo caso em uma ferrovia na Holanda, com apenas uma linha de via única e dividida em seções (definida como a faixa entre duas estações). Os resultados da simulação, do estudo de caso de uma parte da rede ferroviária holandesa, mostraram que a frota heterogênea de capacidade flexível apresenta custos de manutenção mais baixos, incluindo custos de transporte e custos de instalação, levando em consideração as multas associadas ao tempo adicional de posse de via.

Khajehei et al. (2019) propuseram uma modelagem analítica para calcular a degradação da geometria do trilho e a probabilidade de ocorrência de defeitos isolados. Os autores também utilizaram a técnica de Monte Carlo para estimar o número esperado de ações preventivas e corretivas de manutenção. O objetivo é identificar um limite ideal para realização da manutenção da geometria da via com o uso de máquina de via (socadora), visando a minimização do custo total anual de manutenção, considerando os limites de segurança da via. Um modelo de custo foi desenvolvido para comparar a relação custo-benefício de diferentes cenários de limites, permitindo a seleção da decisão mais eficaz.

2.3 CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM E SUAS VARIANTES

O *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) é a categoria de VRP mais estudada na qual todos os clientes possuem demandas previamente conhecidas, que serão atendidas por veículos capacitados, em que uma restrição de capacidade

é imposta ao problema, estabelecendo que as somas das demandas de todos os clientes não devem superar a capacidade do veículo designado. Além disso, a frota é assumida como homogênea sendo que todos os veículos possuem a mesma capacidade e estão operando em custos idênticos. O objetivo do CVRP é encontrar um conjunto de rotas que começam e terminam no mesmo depósito, de forma que cada cliente seja atendido apenas uma vez e por um único veículo, visando minimizar o custo total da viagem (LETFORD; SALAZAR-GONZALEZ, 2019).

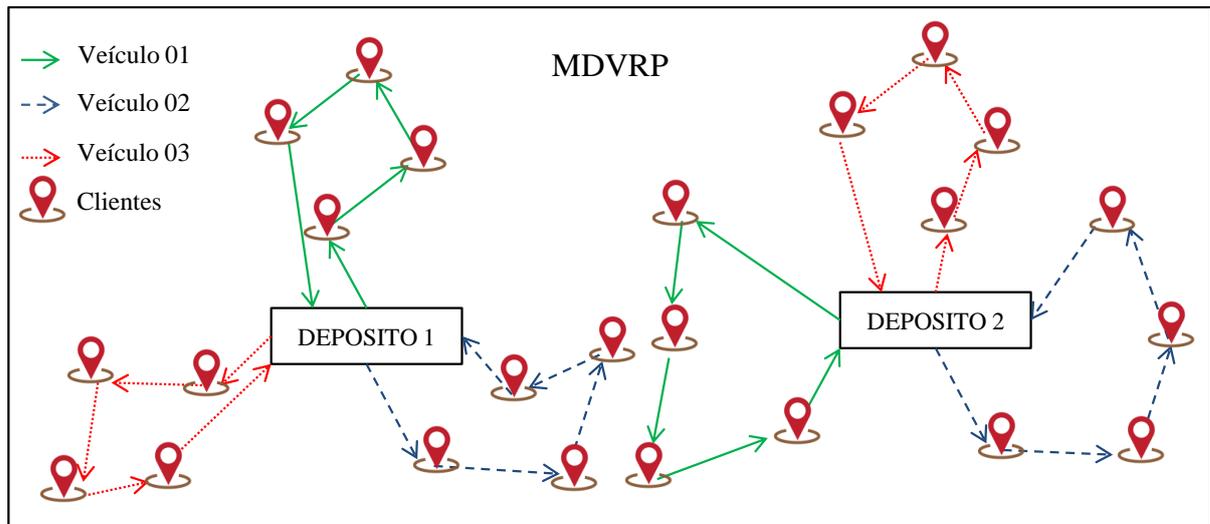
O CVRP também pode apresentar características variadas como a heterogeneidade da frota de veículos, conhecido como *Capacitated Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Fleet* (CVRPHF) em que os veículos utilizados diferem em relação aos seus equipamentos, capacidades, velocidades, custos operacionais, entre outros aspectos, aumentando assim a complexidade do problema de roteirização, cujo objetivo é reduzir os custos totais considerando a composição da frota de veículos variados (TOTH; VIGO, 2014).

Outra restrição relevante e presente na maioria das variantes do CVRP é a consideração da janela de tempo conhecido como *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows* (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 de cada veículo (TOTH; VIGO, 2014). No CVRPTW o veículo deve permanecer junto ao cliente durante o tempo de serviço, caso o veículo chegue antes da janela de tempo estimada, ele deve aguardar até a abertura da janela de tempo para então iniciar o atendimento ao cliente, caso o veículo chegue após o término da janela, o cliente não poderá ser atendido pelo veículo. Desta forma, a restrição da janela tempo influencia significativamente na distância total de viagem, por exemplo, nos casos em que a janela de tempo se torna muito restrita, é possível que um veículo atenda um cliente que está distante do cliente anterior, e depois retorne para outro cliente que se encontra próximo ao cliente inicial. Nos casos em que a janela de tempo for grande o bastante, os clientes podem ser atendidos exatamente na mesma sequência ótima gerada em um problema sem restrição de tempo (NICOLA; VETSCHERA; DRAGOMIR, 2019).

O *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP) pode ser considerado como um problema de roteirização em que mais de um depósito 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. Além disso, a rota de cada veículo deve iniciar e terminar no mesmo depósito. O objetivo do MDVRP é minimizar o custo total de viagem. (MONTROYA-TORRES et al., 2015). O MDVRP pode ser entendido melhor a partir do esquema apresentado na Figura 03.

Figura 03 – Esquematização do *Multi-depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP)



Fonte: Autor.

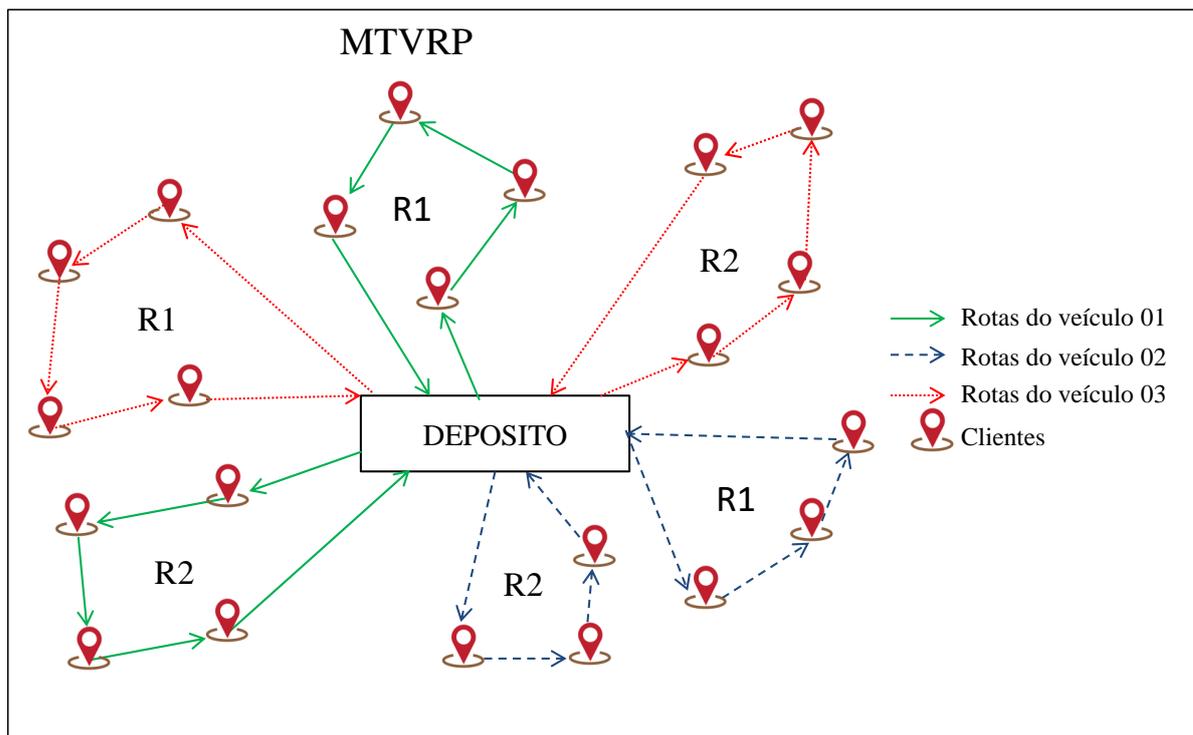
O *Multi-depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP) também apresenta algumas variações entre elas, podemos destacar o *Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Heterogenous Fleet and Time Windows* (MDVRP-HF-TW), que além de considerar o uso de vários depósitos, também leva em consideração a janela tempo, para início e fim da operação, e as características específicas dos veículos, como por exemplo, a capacidade de carga, a velocidade, os custos, entre outras, a fim de satisfazer a demanda de atendimento de um conjunto de clientes, deixando o problema de roteirização mais complexo e condizente com a realidade (BETTINELLI, 2011).

Ramos, Gomes e Pova (2019) apresentaram uma formulação de fluxo, baseada no *Two-commodity Flow Formulation* para o problema de *Multi-depot Vehicle Routing Problem with Heterogenous Fleet and Time Windows* (MDVRP-HF-TW). Os autores também exploraram quatro diferentes formulações de restrições para evitar o problema de *subtour*, recorrente em roteirização de veículos, e compararam os

resultados das formulações adaptadas com uma formulação tradicional conhecida como *three-index formulation*.

Outra variante importante é o *Multi-trip Vehicle Routing Problem* (MTVRP) considerado como uma extensão do CVRP em que cada veículo de uma frota, disponível em um dado depósito, pode realizar mais de uma rota para atender ao cliente. O MTVRP exige a determinação de um conjunto de viagens e a atribuição de cada viagem a um veículo, de modo que o tempo de viagem seja minimizado e as seguintes condições sejam atendidas: cada viagem deve começar e terminar no depósito; cada cliente é visitado exatamente uma única vez pelo veículo; a soma das demandas dos clientes em qualquer viagem não pode exceder a capacidade do veículo; e a soma do tempo viagem de um veículo, não pode exceder o tempo de operação estimado (CATARUZA, 2018).

Figura 04– Esquemática do *Multi-Trip Vehicle Routing Problem* (MTVRP)



Fonte: Autor.

No *Site-dependent Vehicle Routing Problem* (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. O objetivo é que cada cliente seja visitado por um veículo

capacitado para atender a sua demanda. (ZARE-REISABADI; MIRMOHAMMADI, 2015). O SDVRP foi utilizado no modelo matemático proposto para garantir a compatibilidade entre os serviços exigidos na OM e o serviço realizado pelo recurso ferroviário. No *Team Orienteering Problem* (TOP) é definida uma sequência prioritária de atendimento ao cliente, para que os clientes com prioridade mais alta sejam visitados primeiro. O problema é tratado como um conjunto de nós que apresenta um valor de pontuação. O objetivo do TOP é encontrar um conjunto de rotas para visitar os nós e coletar seus resultados, visando maximizar a pontuação total dentro do período de planejamento estabelecido. (TRACHANATZI et al., 2019).

O *Capacitated Vehicle Routing Problem with Precedence Constraints* CVRPPC, a restrição de precedência ocorre quando uma atividade e/ou atendimento deve ocorrer antes do início de outra atividade e/ou atendimento, seguindo uma sequência lógica para conclusão da tarefa imposta no problema. Esse problema geralmente é utilizado quando a entrega de uma mercadoria deve ser precedida pela coleta da mesma. (Sedighizadeh e Mazaheripour, 2016). Já o *Capacitated vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints* (CVRPSC) pode ser considerado como a principal variante do problema de roteirização de veículo utilizada para solução do problema estudado, logo, esta variante será detalhada conforme subcapítulo a seguir.

2.4 CAPACITATED VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH SYNCHRONIZATION CONSTRAINTS (CVRPSC)

Atualmente o *Capacitated Vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints* (CVRPSC) é um tópico muito importante e consideravelmente recente na área da pesquisa operacional. Segundo Drexl (2012), pode ser definido como um problema de roteirização onde mais de um veículo pode ou deve ser usado para completar uma tarefa, apresentando requisitos adicionais de sincronização em relação aos aspectos espaciais, temporais e de carga. Dessa forma foram definidos pelo autor cinco tipos de classificações quanto à sincronização, *Task Synchronization*, *Operation Synchronization*, *Movement Synchronization*, *Load Synchronization* e *Resource Synchronization* que são apresentadas a seguir:

2.4.1 Task Synchronization

Essa é a sincronização que ocorre entre os veículos para definir quais veículos devem cumprir cada tarefa. Significa que cada tarefa deve ser executada exatamente uma vez por um ou mais veículos específicos para o tipo de serviço solicitado. Essas tarefas podem consistir na coleta de suprimentos ou cargas, na entrega dessas cargas a outro local, ou na visita a um local para prestar um determinado serviço, etc.

2.4.2 Operation Synchronization

É o tipo de sincronização que decide os aspectos espaciais e temporais da tarefa, podendo induzir janelas de tempo dinâmicas para execução de uma operação. Refere-se ao deslocamento de tempo necessário entre operações que envolvem dois ou mais veículos no mesmo local ou em locais diferentes. Considerando os aspectos temporais, onde o deslocamento é indicado por Δ e o intervalo é dado por $[a, b]$ com $a \leq b$, existem três tipos de operation synchronization:

- a) *Pure spatial operation synchronization*: Ocorre quando somente o aspecto espacial é levado em consideração, sendo o aspecto temporal ignorado ou irrelevante para o problema, sendo ($a < b, b - a = T$).
- b) *Operation synchronization with precedences*: Ocorre quando dois veículos devem começar suas respectivas operações em seu respectivo vértice com um deslocamento variável, sendo ($a < b, b - a < T$) e o intervalo de deslocamento ($a \leq \Delta \leq b$).
- c) *Exact operation synchronization*: Ocorre quando dois veículos devem começar a executar suas tarefas em seu respectivo vértice ao mesmo tempo (*simultaneous operation* $0 = a = \Delta = b$), ou com um deslocamento positivo fixo (*deferred operation* $0 \neq a = \Delta = b$).

2.4.3 Movement Synchronization

Nessa sincronização, para que um veículo se mova ao longo de um arco, outro veículo diferente, porém compatível, deve se mover junto no mesmo arco. Ambos os veículos devem começar a percorrer o arco ao mesmo tempo, atravessar o arco juntos e chegar ao final do arco no mesmo tempo. Em outras palavras, dois veículos devem ser sincronizados no espaço e tempo, para formar um único veículo composto. Existem dois tipos de sincronização:

- a) *Movement synchronization at the depot*: Ocorre quando dois veículos podem juntar e se separar somente no depósito, antes de começar e depois de terminar uma rota.

- b) *Movement synchronization en route*: Ocorre quando dois veículos podem juntar e se separar em locais diferentes visitados ao longo do percurso.

2.4.4 Load Synchronization

Esse tipo de sincronização refere-se aos problemas onde ocorre transbordo de carga entre os veículos. Deve-se sempre garantir que a quantidade certa de carga seja coletada, entregue ou transbordada, sendo que a carga do veículo que descarrega (*active*) deve ser igual a carga do veículo que recebe (*passive*) e nenhuma carga deve ser perdida. Existem três tipos de *load synchronization*:

- a) *Fixed load synchronization*: Ocorre quando a quantidade de carga que pode ser entregue, recolhida ou transferida é fixada antecipadamente. Nesse caso, as cargas devem ser descarregadas por completo.

- b) *Discretized load synchronization*: Ocorre quando as possíveis quantidades de carga que podem ser entregues, coletadas ou transferidas são finitas e discretizadas.

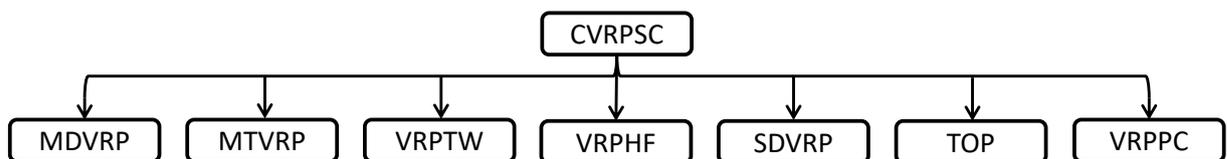
- c) *Continuous load synchronization*: Ocorre quando as quantidades de cargas que serão entregues, coletadas ou transferidas podem ser qualquer número real entre zero e o limite superior.

2.4.5 Resource Synchronization

Esse tipo de sincronização ocorre quando diferentes veículos competem por recursos comuns e escassos. Nesse caso a qualquer momento, a utilização ou o consumo total de um recurso por todos os veículos, deve respeitar as capacidades disponíveis, ou seja, ser menor ou igual ao limite especificado desse recurso.

Para desenvolvimento do modelo matemático aplicado nesta dissertação, foi utilizado o *Capacitated Vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints* (CVRPSC), classificado segundo Drexl (2012), como *Exact Operation Synchronization*, visto que, para atender determinadas OMs, pode haver a necessidade de que mais de um recurso esteja disponível, ocorrendo a sincronização do momento de chegada e saída desses recursos no trecho a ser reparado, garantindo a conclusão da tarefa de manutenção. O CVRPSC também foi integrado às diversas variantes do problema de roteirização de veículo tais como: MDVRP, MTVRP, VRPTW, VRPHF, SDVRP, TOP e VRPPC, para garantir que todas as restrições impostas no problema estudado sejam atendidas.

Figura 05 – Fluxograma do (CVRPSC)



Fonte: Autor.

A seguir serão apresentados o levantamento bibliográfico de alguns estudos que também utilizaram o *Capacitated Vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints* (CVRPSC).

Li *et al.* (2005) estudaram o *Manpower Allocation Problem with Time Windows and Job-teaming Constraints* (MAPTWTC). Neste problema, um conjunto de trabalhadores com habilidades específicas são alocados em diferentes locais para realização do trabalho, ocorrendo a sincronização dos trabalhadores com os locais de trabalho. O objetivo é minimizar o tempo de deslocamento até os locais de trabalho e o número total de trabalhadores para executar a tarefa. Os autores

formularam este problema como um VRP onde um trabalhador desempenha o papel de um veículo e cada nó representa um local de trabalho, resultando em um problema de Programação Inteira Mista (MIP). Como procedimento de resolução duas heurísticas construtivas foram usadas, *Simple-Append* e *Block-Insertion*, e uma meta-heurística baseada no *Simulated Annealing Framework*.

Eveborn *et al.* (2006) trataram do problema de *Home Health Care* (HHC). Neste problema, os autores lidam com o atendimento a idosos que necessitam de serviços médicos, envolvendo mais de um médico e/ou enfermeiro ao mesmo tempo. Como solução do problema os autores usaram uma combinação de métodos de otimização e heurístico conhecido como *Repeated Matching*.

Amaya *et al.* (2007) empregaram o *Capacitated Arc Routing Problem with Refill Points* (CARP-RP), que é uma variação do *Capacitated Arc Routing Problem* (CARP), para resolver o problema de marcação (pintura) rodoviária. Neste problema, há dois veículos, um veículo de pintura que faz as marcações na estrada e um veículo de tanque para reabastecer o veículo de pintura. O objetivo do CARP-RP é sincronizar, a um custo mínimo, as rotas dos veículos de marcação com os veículos de recarga para reabastecimento. O veículo de reabastecimento pode reabastecer o veículo de marcação em qualquer entroncamento rodoviário e deve retornar ao depósito após cada reabastecida. Os autores propuseram um modelo linear inteiro para este problema e usaram uma abordagem de plano de corte para sua solução.

Bredstrom e Ronnqvist (2007) e Bredstrom e Ronnqvist (2008) propuseram uma formulação de Programação Inteira Mista (MIP) para o problema de *Home Health Care* (HHC) baseado no *Vehicle Routing and Scheduling Problem with Time Windows* (VRSP-TW) e no *Synchronization Constraints with Temporal Precedence* (SCSP). Ambos os artigos utilizaram o mesmo modelo, no entanto, no primeiro, os autores empregaram um algoritmo de *Branch and Price* para resolução do problema e no segundo os autores implementaram novas restrições e um novo procedimento heurístico para resolver o problema.

Dohn *et al.* (2009) propuseram uma formulação semelhante ao Li *et al.* (2005), com o *Manpower Allocation Problem with Time Windows, Job-teaming Constraints* e um número limitado de equipes (m-MAPTWTC). Neste problema é preciso designar m equipes para diversas tarefas, onde as equipes e as tarefas podem ser restritas por

janelas de tempo, fora do qual a operação não é possível. As tarefas podem requerer várias equipes individuais para serem concluídas, além disso, todas as equipes envolvidas devem iniciar o trabalho na tarefa simultaneamente exigindo uma cooperação sincronizada. Os autores desenvolveram uma abordagem *Branch and Price* para resolver o problema.

Uma extensão do trabalho com CARP-RP de Amaya et al. (2007) foi proposta por Amaya et al. (2010) com o chamado *Capacitated Arc Routing Problem with Refill Points and Multilevel Loads* (CARP-RP-ML), para resolver o problema de marcação (pintura) rodoviária. Neste problema o veículo de reabastecimento não retorna ao depósito após a recarga do veículo de marcação. Os autores descreveram um método heurístico baseado no princípio *route-first cluster-second*, para resolução do problema.

Kim et al. (2010) empregaram uma Programação Inteira Mista (MIP) para o *Combined Manpower Vehicle Routing Problem with Multi-Staged Services* (CMVRP). Semelhante ao proposto por Li et al (2005) e Dohn et al (2009), neste problema as equipes de trabalhadores só podem ser transportadas para os clientes através dos veículos, e os clientes exigem diversas visitas de diferentes trabalhadores em uma sequência pré-definida. O objetivo é minimizar o custo total do roteamento do veículo. As tarefas não são feitas por veículos e sim por equipes, portanto, as equipes devem ser atribuídas aos clientes e aos veículos. No entanto, as equipes e os veículos não estão ligados uns aos outros, portanto, eles podem ser programados separadamente, mas devem ser sincronizados. Os autores desenvolveram uma heurística construtiva e um *Particle Swarm Optimization* para resolver o problema.

Rabeh et al. (2011) abordaram o planejamento e o agendamento das visitas de dois enfermeiros no contexto do problema de *Home Health Care*, onde um paciente pode exigir mais de uma visita separada dos dois cuidadores, com uma sequência de ordem pré-definida. Esse problema foi formulado pelos autores com uma Programação Inteira Mista (MIP).

Dohn et al. (2011) apresentou uma generalização do *Vehicle Routing Problem with Time Windows and Synchronization Constraints* (VRPTWSyn) que é conhecido como o problema de roteamento de veículo com janela de tempo e dependência temporais. Além da sincronização padrão, são consideradas as dependências temporais mais gerais, como a diferença máxima e a diferença mínima entre o

horário de início e término das visitas. Também foi desenvolvido um sofisticado *Branch-and-Cut-and-Price* algoritmo para solucionar o problema generalizado e testado em um conjunto de instâncias derivadas do *Brench-Mark* Solomon.

Redjem *et al.* (2012) modelaram o problema de agendar as visitas dos cuidares aos pacientes, levando em conta as restrições de sincronização. No artigo o critério de otimização foi à minimização do tempo de espera dos pacientes. Em outro trabalho mais recente, Redjem e Marcon (2016), propuseram uma metaheurística *two-stage caregivers routing*, onde, primeiro um conjunto de rotas é gerado e depois são introduzidas restrições para obter soluções viáveis.

Salazar-Aguilar *et al.* (2012) empregaram o *Synchronized Arc Routing Problem* (SyARP) para a operações de lavra de neve que consiste em retirar a neve das ruas. O SyARP tem como objetivo determinar um conjunto de rotas que minimizam o tempo de processamento, ou seja, que todos os segmentos de rua sejam atendidos com o menor tempo possível. A operação está sujeita a uma restrição de sincronização para evitar a formação de montes de neve no meio da rua. Neste problema, a sincronização ocorre nos arcos, isto é, nas ruas onde é necessária manutenção, uma vez que as ruas com várias linhas na mesma direção devem ser aradas simultaneamente para evitar a formação de montes de neve. Uma formulação não linear e uma metaheurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS), foram apresentadas pelos autores para resolver o SyARP.

Salazar-Aguilar *et al.* (2013) apresentaram o *Synchronized Arc Routing and Node Routing Problem* (SANRP), que é uma extensão do *Capacitated Arc Routing Problem* (CARP). Esse problema tem como objetivo sincronizar a rota dos dois tipos de veículos, um usado na pintura rodoviária e o outro no reabastecimento da tinta. O objetivo é que o trabalho de pintura seja concluído no menor tempo possível e os veículos de pintura nunca fiquem sem tinta. Os autores propuseram uma formulação não linear e uma metaheurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS), para resolver o SANRP.

Afifi; Dang e Moukrim (2013) estudaram uma variante do *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW) onde são introduzidas as restrições de sincronização simultâneas. Além disso, uma abordagem metaheurística de *Simulated Annealing Algorithm* é apresentada para resolução do modelo e os resultados são comparados

com o trabalho desenvolvido por Bredstrom e Ronnqvist (2008), onde a função objetivo busca a minimização do tempo de viagem.

Labadie, Prins e Yang (2014) apresentaram em seu trabalho uma definição para o *Vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints* (VRPS), e uma classificação com dois tipos de sincronização: o *simultaneous synchronization* (SS) onde o vértice requer pelo menos duas visitas simultaneamente ou em uma janela de tempo curta e o *precedence synchronization* (PS) onde o vértice requer várias visitas sucessivas, com ou sem janelas de tempo. Além disso, os autores formularam uma Programação Inteira Mista (MIP) para o problema de *Home Health Care* (HHC), baseada no *Vehicle Routing Problem with Simultaneous Synchronization Constraints* (VRPSS). Para resolução do problema foi desenvolvido uma heurística construtiva chamada de *Simple-Append*.

López-Aguilar *et al.* (2018) apresentaram três formulações lineares para o *Vehicle Routing Problem with Exact Synchronization*, SVRP3, SVRP4 e SVRP5, e compararam com outras formulações encontradas na literatura, SVRP1 e SVRP2. Os autores também testaram e compararam a formulação desenvolvida com o *benchmark* proposto por Bredstrom e Ronnqvist (2008) para o problema de *Home Health Care* (HHC).

Liu *et al.* (2019) apresentaram uma extensão do *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW), o qual denominaram de *Vehicle Routing Problem with Time Windows and Synchronized Visits* (VRPTWSyn). Nesse problema, os veículos partem de um depósito e passam a atender um conjunto de clientes espalhados geograficamente, de modo que cada cliente é visitado apenas uma vez dentro de um determinado intervalo de tempo. Para resolver o problema de VRPTWSyn, os autores apresentaram um algoritmo *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS).

Sarasola e Doerner (2019) trataram do problema de logística na entrega de mercadoria em que os clientes exigem entregas de um ou mais fornecedores. O objetivo é minimizar o tempo ocioso, definido como o tempo sem serviço entre a primeira e a última entrega recebida pelo cliente. Para resolver o problema os autores propuseram um modelo matemático baseado no *Multi-trip Vehicle Routing Problem with Time Windows and Synchronization Constraints*. A sincronização ocorre na chegada de um número de veículos pertencentes a diferentes transportadoras ao local de entrega, e garantindo que todas as entregas ocorram dentro do intervalo de

tempo estimado. Para otimizar a solução os autores propuseram uma meta-heurística baseada no *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS).

Na Tabela 1 são apresentados os trabalhos descritos anteriormente sobre o planejamento da manutenção ferroviária com uso de modelagem matemática e sobre o *Capacitated Vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints* (CVRPSC) demonstrando que até momento não foram encontradas publicações e ou proposições de modelos matemáticos que considerassem todas as restrições impostas no problema tratado nesta dissertação.

Tabela 1 – Resumo dos artigos levantados

| Ano | Autor | MDVRP | MTVRP | VRPTW | VRPHF | SDVRP | TOP | VRPPC | VRPSC | Aplicado a ferrovia | Aplicado a manutenção da superestrutura ferroviária |
|------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|---------------------|---|
| 1999 | Higgins, Ferreira e Lake | --- | --- | X | --- | --- | X | --- | --- | X | X |
| 2005 | Li <i>et al.</i> | --- | --- | X | X | X | --- | --- | X | --- | --- |
| 2006 | Everborn <i>et al.</i> | --- | --- | X | X | --- | X | --- | X | --- | --- |
| 2007 | Amaya <i>et al.</i> | --- | --- | --- | X | --- | --- | --- | X | --- | --- |
| 2007 | Bredstrom e Ronnqvist. | --- | --- | X | X | --- | X | --- | X | --- | --- |
| 2008 | Bredstrom e Ronnqvist. | --- | X | X | --- | --- | --- | X | X | --- | --- |
| 2009 | Dhon <i>et al.</i> | --- | --- | X | --- | X | --- | --- | X | --- | --- |
| 2010 | Nemani, Bog e Ahuja | --- | --- | X | --- | --- | --- | X | --- | X | X |
| 2010 | Amaya <i>et al.</i> | --- | --- | X | X | --- | --- | --- | X | --- | --- |
| 2010 | Quiroga e Schinieder | --- | --- | X | --- | --- | --- | --- | --- | X | X |
| 2010 | Bog <i>et al.</i> | --- | --- | X | --- | --- | X | --- | --- | X | X |
| 2010 | Kim, Koo e Park | --- | --- | X | X | --- | --- | X | X | --- | --- |
| 2011 | Rabeh <i>et al.</i> | --- | --- | X | X | X | --- | --- | X | --- | --- |
| 2011 | Dohn <i>et al.</i> | --- | --- | X | --- | --- | --- | --- | X | --- | --- |
| 2011 | Peng <i>et al.</i> | --- | --- | X | X | X | --- | --- | --- | X | X |
| 2012 | Peng e Ouyang | --- | --- | X | X | X | --- | X | X | X | X |
| 2012 | Borraz-Sánchez e Klabja | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | X | X |
| 2012 | Redjem <i>et al.</i> | --- | --- | X | --- | --- | --- | --- | X | --- | --- |
| 2012 | Salazar-Aguilar <i>et al.</i> | --- | X | X | --- | --- | --- | --- | X | --- | --- |
| 2013 | Salazar-Aguilar <i>et al.</i> | --- | X | X | --- | --- | --- | --- | X | --- | --- |
| 2013 | Afifi; Dang e Moukrim | --- | --- | X | X | --- | X | --- | X | --- | --- |
| 2014 | Labadie <i>et al.</i> | --- | X | X | X | --- | --- | X | X | --- | --- |
| 2015 | Santos, Teixeira e Antunes | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | X | X |
| 2015 | Famurewa <i>et al.</i> | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | X | X |
| 2016 | Redjem e Marcon | --- | --- | X | X | --- | --- | --- | X | --- | --- |
| 2017 | Hakan Guler | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | X | X |
| 2017 | Lidén e Joborn | --- | X | X | X | X | --- | --- | --- | X | X |
| 2018 | Lidén, Kalinowski e Waterer | --- | X | X | X | X | --- | --- | --- | X | X |
| 2018 | López-Aguilar <i>et al.</i> | --- | --- | X | --- | --- | --- | X | X | --- | --- |
| 2018 | Su e Schutter | --- | --- | X | X | --- | --- | --- | --- | X | X |
| 2019 | Khajehei <i>et al.</i> | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | X | X |
| 2019 | Sarasola e Doerner | --- | X | X | X | X | --- | --- | X | --- | --- |
| 2019 | Liu <i>et al.</i> | --- | --- | X | X | --- | --- | X | X | --- | --- |
| 2021 | Esta Dissertação | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |

Fonte: Autor

3 PROBLEMA ESTUDADO

Os procedimentos operacionais para alocação dos recursos ferroviários foram obtidos com base nos procedimentos realizados na Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM). A estrada está localizada nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, cujo mapa pode ser visualizado na Figura 06, e é responsável por cerca de 30% da carga ferroviária transportada no país.

Dentre as principais mercadorias transportadas na ferrovia podemos citar: o minério de ferro com 112.172 milhões de toneladas úteis (TU) por ano, seguido dos produtos siderúrgicos com 4.223 milhões de TU por ano, o carvão mineral com 3.560 milhões TU por ano e a celulose com 1.163 milhões de TU por ano. (ANTT, 2019a).

Figura 06 – Mapa da estrada de ferro Vitória Minas (EFVM)

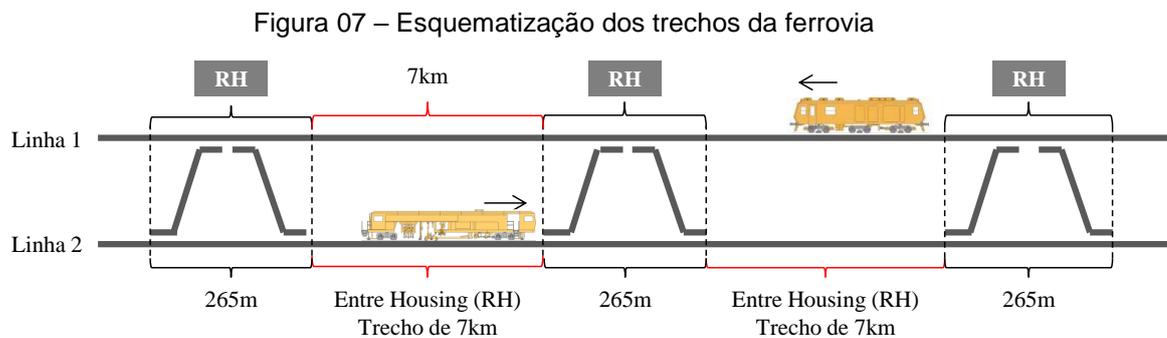


Fonte: ANTT (2019a).

A EFVM é atualmente operada pela empresa Vale S.A e possui uma extensão de 895 km de via, sendo 873 km de bitola métrica e 22 km de bitola mista (ANTT, 2019a). A linha tronco que compreende a via existente entre as cidades de Vitória -

ES e Santa Bárbara - MG possui 89 locações (*housing*, RH) distribuídas ao longo de seu comprimento. As *housings* são edificações próximas aos circuitos de chaves, nas quais estão instalados os equipamentos de sinalização e comunicação com identificação. Além das locações na linha de tronco, existem também locações nos diversos ramais da EFVM totalizando 112 *housings* sinalizadas. (VALE, 2019).

A distância entre uma *housing* e outra é denominada de trecho da ferrovia e possui aproximadamente 7 km, que pode ser entendido melhor no esquema apresentado na Figura 07. A linha tronco tem um número aproximado de 89 trechos, como a linha tronco é duplicada, são totalizados um número de aproximadamente 178 trechos de linha para serem realizadas as manutenções com as máquinas de via (VALE, 2019).

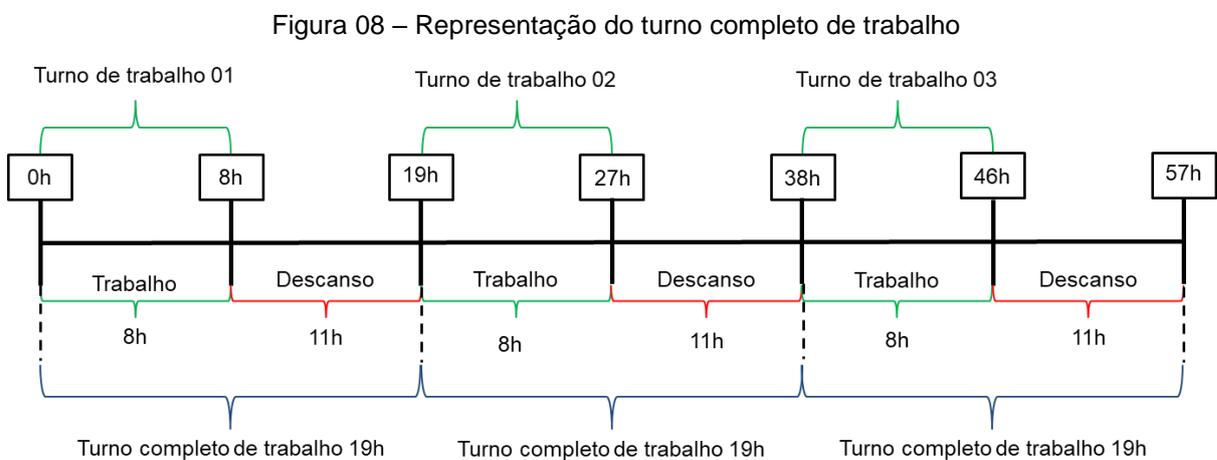


Fonte: Autor.

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 a equipe de manutenção emite OMs. Com base em todas as OMs solicitadas a equipe de planejamento elabora a sequência de atendimentos as OMs, designando cada recurso necessário para atender o tipo de serviço especificado na OM. Essa programação é feita de forma empírica com o auxílio do software Excel na qual a equipe de planejamento busca encontrar a melhor forma de atender as OMs, no período planejado, sem prejudicar a circulação de trens na ferrovia. A equipe de manutenção é responsável por emitir às OMs que deve conter o 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.

As OMs estabelecidas para cada trecho devem respeitar o período do turno de trabalho da equipe de manutenção que é de 08 horas, com uma escala de descanso

de 11 horas, totalizando 19 horas em um turno completo de trabalho, que pode ser definido como o tempo de trabalho mais o tempo de descanso (Figura 08). Após atender às OMs os recursos devem finalizar o turno de trabalho em qualquer pátio da ferrovia, podendo ser o seu pátio de origem ou outro que achar pertinente. Antes de iniciar um novo turno de trabalho os recursos devem cumprir período necessário de descanso, permanecendo estacionados no pátio ferroviário. Após cumprir o tempo de descanso os recursos iniciam um novo turno de trabalho para atender as novas OMs, que devem ser iniciadas posteriormente a data e hora desejada.



Fonte: Autor.

A equipe de planejamento procura a melhor forma de realizar a alocação desses recursos ao longo dos trechos da ferrovia, estabelecendo rotas que devem atender a todas as requisições dos períodos informados. O modelo matemático proposto por este estudo busca maximizar o número de OMs atendidas no período de planejamento estimado e, ao mesmo tempo, minimizar os custos por utilização de cada recurso e minimizar o atraso entre o momento efetivo de início do atendimento à OM e o momento solicitado para início, auxiliando a equipe de planejamento da manutenção ferroviária nas tomadas de decisões, tornando a matriz de transporte mais eficiente.

Como não foram encontrados na literatura pesquisada, nenhum modelo matemático que incorporasse esta realidade e restrições estabelecidas, baseado no *Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)* integrado com oito variantes e que fosse aplicado ao planejamento das rotas dos recursos para atendimento às OMs da superestrutura

ferroviária, esta pesquisa entra como um diferencial para preencher essa lacuna, tornando-se uma oportunidade para o desenvolvimento e avanço nesse campo de pesquisa.

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O modelo matemático proposto neste trabalho considera a integração e adaptação para o problema tratado dos seguintes modelos matemáticos: 1) *Capacitated Vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints* (CVRPSC); 2) *Capacitated Vehicle Routing Problem with Precedence Constraints* (CVRPPC); 3) *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP); 4) *Multi-Trip Vehicle Routing Problem* (MTVRP); 5) *Team Orienteering Problem* (TOP); 6) *Site-dependent Vehicle Routing Problem* (SDVRP); 7) *Vehicle Routing Problem with Time Windows*; e 8) *Vehicle Routing Problem with Heterogenous Fleet*.

Para adaptação dos modelos matemáticos ao problema tratado nesta dissertação, considerou-se que cada pátio ferroviário corresponde a um depósito e existe um depósito virtual correspondente para cada pátio. Em cada depósito é considerado que existe pelo menos um veículo, tratado nesta dissertação como recurso, que iniciará uma viagem para atender clientes, que são os atendimentos às OMs de manutenção em 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 encontrado na literatura, pois considera as restrições de prioridade, precedência e sincronização 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 visa maximizar o número de OMs atendidas no período de planejamento e, ao mesmo tempo, minimizar os custos por quilometro rodado de cada recurso ck_v e

minimizar o atraso entre o momento efetivo de início do atendimento à OM $tm_{i,v,r}$ e o momento solicitado para início ms_i .

O modelo matemático ainda considera o tempo do turno de trabalho tt , o tempo do turno de descanso td , o tempo de liberação tl e o local de partida (pátio) em que cada recurso $v \in MD$ encontra-se estacionado para dar início à operação de manutenção lp_v . O modelo também considera o tipo de serviço que cada veículo/recurso pode executar $vs_{v,s}$, o tipo de serviço solicitado para cada OM ss_i , a sincronização entre os duas ou mais OMs $sa_{i,j}$, a prioridade de atendimento à OM P_i e a precedência de atendimento entre as OMs $Pd_{i,j}$.

Considerando na o número total de OMs, nv como o número de veículos ou recursos disponíveis, nr o número de rotas ou turnos possíveis, np o número de depósitos ou pátios disponíveis e ns o número de serviços realizados pelos recursos. Existe uma frota heterogênea $v \in MD$ disponível nos pátios ferroviários np para realizar os atendimentos às OMs na . Para cada recurso $v \in MD$ é associado um tipo de serviço que o recurso pode executar $vs_{v,s}$, um tempo de operação relacionado a cada tipo de serviço solicitado na OM ot_i , e um custo variável ck_v em reais por quilômetro rodado (R\$/Km).

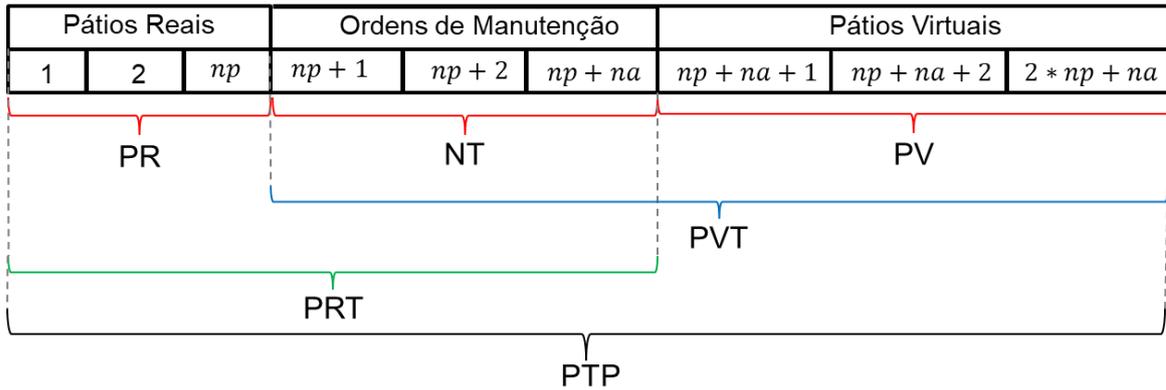
A seguir o modelo matemático proposto é apresentado em cinco partes: conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, função objetivo e restrições.

Os conjuntos do modelo matemático são definidos a seguir e ilustrado na Figura 09.

| | |
|-------|--|
| PR | Conjunto de pátios reais, $PR = \{1, \dots, n_p\}$; |
| PV | Conjunto pátios virtuais, $PV = \{(n_p + n_a + 1), \dots, (2 * n_p + n_a)\}$; |
| NT | Conjunto de OMs, $NT = \{(n_p + 1), \dots, (n_p + n_a)\}$; |
| PRT | Conjunto de pátios reais mais as OMs, $PRT = \{1, \dots, (n_p + n_a)\}$; |
| PVT | Conjunto de pátios virtuais mais as OMs, $PVT = \{(n_p + 1), \dots, (2 * n_p + n_a)\}$; |
| PTP | Conjunto de pátios reais, OMs e pátios virtuais, $PTP = \{1, \dots, (2 * n_p + n_a)\}$; |

| | |
|------|--|
| MD | Conjunto de recursos, $MD = \{1, \dots, n_v\}$; |
| R | Conjunto de rotas, $R = \{1, \dots, n_r\}$; |
| S | Conjunto de serviços, $S = \{1, \dots, n_s\}$. |

Figura 09 – Conjuntos do modelo matemático



Fonte: Autor.

Assim, o modelo matemático é definido como um grafo orientado $G = (V, A)$ 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 $\{1, \dots, np\}$ e terminam nos nós $\{(np + na + 1), \dots, (2 np + na)\}$.

Parâmetros:

| | |
|------------|--|
| $tv_{i,j}$ | Tempo de viagem que um recurso leva para percorrer a distância entre as OMs $i \in PTP$ e as OMs $j \in PTP$; |
| ms_i | Momento solicitado para início da operação da manutenção do trecho no atendimento à OM $i \in PTP$; |
| ml_i | Momento limite para iniciar a operação de manutenção do trecho no atendimento à OM $i \in PTP$; |
| 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 OMs $i \in NT$ e $j \in NT$; |
| $Pd_{i,j}$ | Precedência de atendimento das OMs $i \in NT$ e $j \in NT$; |
| M | Um número arbitrariamente grande para a lógica do modelo foi adotado o valor de 9999,9; |
| m | Um número arbitrariamente pequeno para a lógica do modelo foi adotado o valor de 0,0001; |
| α | Parâmetro multiplicado à primeira parcela da função objetivo que visa dar maior peso ao atendimento às OM foi adotado valor de 100.000; |
| β | Parâmetro multiplicado à segunda parcela da função objetivo usado para determinar o impacto das mudanças no coeficiente sobre o valor ótimo da função objetivo foi adotado o valor de 10; |
| γ | Parâmetro multiplicado à terceira parcela da função objetivo usado para determinar o impacto das mudanças no coeficiente |

sobre o valor ótimo da função objetivo foi adotado o valor de 1.

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 0 caso contrário; |
| $tm_{i,v,r}$ | Tempo 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 $v \in MD$ foi utilizado, e zero caso contrário; |
| $y_{i,j,v,r}$ | Variável binária usada para linearização do modelo matemático. |

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

Função objetivo:

Maximizar

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

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

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

Sujeito a:

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

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

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

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

$$+ \left(\sum_{i \in NT} \sum_{j \in PV} x_{i,j,v,r} \right) = 1$$

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

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

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

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

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

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

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

$$-M \left(1 - \sum_{h \in PRT} x_{h,(i+np+na),v,(r-1)} \right)$$

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} & tm_{(i+n_p+n_a),v,r} \\ & \leq ((r-1) td + tt) \sum_{h \in PRT} x_{h,(i+n_p+n_a),v,r} \end{aligned} \quad \forall i \in PR, v \in MD, r \in R \quad (19)$$

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

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

$$\sum_{v \in MD} v u_v \leq n_v \quad \forall v \in MD \quad (22)$$

$$\sum_{v \in MD} v u_v \geq 1 \quad \forall v \in MD \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{r \in R} \sum_{j \in EPTP} x_{i,j,v,r} = 0 \\ & \forall i \in PRT, v \in MD, \\ & s \in S | (i \geq (np+1)) \wedge \\ & (v s_{v,ss_i} = 0) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{r \in R} \sum_{j \in EPTP} x_{i,j,v,r} + \sum_{r \in R} \sum_{j \in EPTP} x_{h,j,v,r} \leq 1 \\ & \forall i \in PRT, h \in PRT, \\ & v \in MD | ((i \geq n+1) \wedge \\ & (h \geq np+1)) \wedge \\ & (sa_{i,h} = 1) \end{aligned} \quad (25)$$

$$tm_{i,v,r} \geq tm_{j,k,c}$$

$$-M \left(2 - \sum_{g \in PTP} x_{i,g,v,r} - \sum_{h \in PTP} x_{j,h,k,c} \right)$$

$$tm_{i,v,r} \leq tm_{j,k,c}$$

$$+M \left(2 - \sum_{g \in PTP} x_{i,g,v,r} - \sum_{h \in PTP} x_{j,h,k,c} \right)$$

$$tm_{j,v1,r1} \geq tm_{i,v,r} + ot_i + tl -$$

$$M \left(2 - \sum_{h \in PTP} x_{i,h,v,r} - \sum_{h \in PTP} x_{i,h,v1,r1} \right)$$

$$tm_{i,v,r} \in \mathbb{R}^+$$

$$vu_v \in \{0,1\}$$

$$x_{i,j,v,r} \in \{0,1\}$$

$$\forall i \in PRT, j \in PRT,$$

$$v \in MD, k \in MD, r \in R,$$

$$c \in R | ((i \geq np + 1) \wedge$$
 (26)
$$(j \geq np + 1) \wedge (v \neq k)) \wedge$$

$$(sa_{i,j} = 1)$$

$$\forall i \in PRT, j \in PRT,$$

$$v \in MD, k \in MD, r \in R,$$

$$c \in R | ((i \geq np + 1) \wedge$$
 (27)
$$(j \geq np + 1) \wedge (\neq k)) \wedge$$

$$(sa_{i,j} = 1)$$

$$\forall i \in NT, j \in NT, v \in MD,$$

$$r \in R, v1 \in MD, r1 \in R |$$
 (28)
$$(Pd_{i,j} = 1)$$

$$\forall i \in PTP, v \in MD, r \in R$$
 (29)

$$\forall v \in MD$$
 (30)

$$\forall i \in PTP, j \in PTP,$$
 (31)
$$v \in MD, r \in R$$

A Função Objetivo (F.O), equação (1), é composta em três parcelas. 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. O modelo matemático possui $2|PTP|^2|MD| |R|$ variáveis inteiras e $|PTP| |MD| |R|$ variáveis contínuas.

As restrições (5) não são lineares por conta do termo

$$\sum_{i \in PR} \sum_{j \in PV} x_{i,j,v,r} \sum_{h \in PRT} x_{h,(i+np+na),v,(r-1)} \cdot$$

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.

$$y_{i,j,v,r} \leq x_{i,j,v,r} \quad \forall i \in PR, j \in PV, v \in MD, \quad (32)$$

$$r \in R2$$

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

$$r \in R2$$

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

$$r \in R2$$

$$y_{i,j,v,r} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in PR, j \in PV, v \in MD, \quad (35)$$

$$r \in R2$$

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).

$$\left(\sum_{i \in PR} \sum_{j \in PV} y_{i,j,v,r} \right) + \left(\sum_{i \in NT} \sum_{j \in PV} x_{i,j,v,r} \right) = 1 \quad \forall v \in MD, r \in R2 \quad (36)$$

5 GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS

Nesse capítulo são apresentados os dados levantados para geração das instâncias testadas e validação do modelo proposto por esta pesquisa. Os testes computacionais foram executados em um computador com processador Intel Xeon Silver 4116 com dois processadores de 16 núcleos com 128 GB de memória RAM utilizando-se o solver CPLEX 12.10 (IBM, 2020).

5.1 GERAÇÃO DAS INSTÂNCIAS DE TESTE

Cada OM em um trecho da ferrovia exige serviços específicos para o tipo de anomalia detectada, sendo que cada serviço é atendido por recursos especializados para tal. Para elaboração das instâncias de teste foram determinados 7 tipos diferentes de recursos apresentado na Tabela 2, incluindo a equipe de apoio as máquinas de via e a equipe de manutenção manual que se deslocam ao longo dos trechos por meio de veículos de transporte de passageiro.

Tabela 2 – Tipos de recursos

| Tipo de Recurso | Descrição |
|------------------------|------------------------------------|
| M1 | Socadora de linha |
| M2 | Socadora de chave |
| M3 | Desguarnecedora de lastro |
| M4 | Esmerilhadeira de trilho |
| M5 | Equipe de manutenção manual |
| M6 | Equipe de apoio às máquinas de via |
| M7 | Caminhão rodoferroviário |

Fonte: Autor.

Cada tipo de recurso exerce diferentes tipos de serviços, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Tipos de serviços realizados pelos recursos

| Tipo de serviço | Descrição |
|------------------------|---|
| 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 |
| S10 | Carregamento de trilhos |

Fonte: Autor.

Os recursos apresentam diferentes tempos de manutenção por trecho, variando de acordo com o tipo de serviço que executam e a complexidade da anomalia identificada. Em alguns casos, o recurso pode realizar mais de um tipo de serviço, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Relação do recurso com o tipo de serviço

| Tipo de recurso | Tipo de serviço que cada recurso pode realizar | | | | | | | | | |
|------------------------|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 |
| M1 | X | ---- | ---- | ---- | ---- | X | ---- | ---- | ---- | ---- |
| M2 | ---- | X | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| M3 | ---- | ---- | X | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| M4 | ---- | ---- | ---- | X | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| M5 | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | X | X | ---- | ---- |
| M6 | ---- | ---- | ---- | ---- | X | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| M7 | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | X | X |

Fonte: Autor.

A partir de dados levantados junto à empresa Vale S.A, responsável pela operação da ferrovia Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM), foi possível calcular a produtividade em metros por hora (m/h) de cada recurso durante a execução da manutenção em um trecho da ferrovia, conforme Tabela 5. Cabe ressaltar que a produtividade da equipe de apoio às máquinas de via (M6) esta vinculada a

produtividade da máquina de via que ela irá apoiar, ou seja, a produtividade da equipe é dependente do serviço que a máquina de via vai realizar.

Tabela 05 – Produtividade de cada recurso

| Tipo de recurso | Produtividade (m/h) |
|------------------------|----------------------------|
| M1 | 430 |
| M2 | 200 |
| M3 | 20 |
| M4 | 1000 |
| M5 | 27 |
| M6 | Vinculada |
| M7 | 27 |

Fonte: Autor.

A equipe de manutenção informa, na emissão da OM, o tempo de operação para cada trecho. Esse tempo é calculado dividindo o comprimento em metros do trecho pela produtividade (m/h) de cada recurso. Para geração das instâncias foi definida a matriz distância entre nós, que podem ser pátios ou OMs, baseado no tempo de viagem de um nó para outro de cada recurso. A partir da velocidade média de viagem dos recursos, definida 40,0 km/h, e da distância entre os trechos, foi possível calcular o tempo de viagem em minutos que cada recurso leva para deslocar de um trecho a outro.

Nesta dissertação as instâncias propostas têm por objetivo realizar os testes para validação do modelo matemático, assim como, analisar a lógica e coerência dos resultados obtidos com base nas restrições estabelecidas, e analisar a viabilidade do solver CPLEX para solucionar o problema. Foram desenvolvidos 6 grupos com um total de 24 instâncias para testes. Cabe ressaltar que todas as instâncias contam com um horizonte de planejamento de 6 ciclos completos de trabalho, aproximadamente uma semana.

O Grupo 1 conta com as Instâncias de 1 a 4, que foram criadas para verificar a lógica e coerência do modelo matemático quanto o atendimento às OMs, apresentando um número reduzido de OMs e OMs sincronizadas. Todas as instâncias desse grupo foram criadas considerando um segmento reduzido da EFVM

contendo com um total de 5 pátios ferroviário, 14 recursos disponíveis para atendimento, que exercem diferentes tipos de serviços, e apresentam o período máximo para iniciar a OM de até 48 horas. Na Instância 1 foram utilizados dados aleatórios contendo 10 OMs com 4 OMs sincronizadas. As demais instâncias do grupo foram criadas para analisar o efeito do aumento do número de OMs e OMs sincronizadas. A Instância 2 conta com um total de 14 OMs sendo 6 OMs sincronizadas. A Instância 3 conta com 24 OMs sendo 10 OMs sincronizadas. Por último a Instância 4 conta com um total de 36 OMs sendo 14 OMs sincronizadas.

O Grupo 2 conta com as instâncias de 5 a 8, que foram criadas para analisar o comportamento do modelo mediante mudanças no período máximo para iniciar a OM. Todas as instâncias foram testadas com 10 pátios ferroviários, 14 recursos e 36 OMs sendo 14 OMs sincronizadas, que representa a média histórica registrada de OMs por semana nos trechos da EFVM estudados na pesquisa. A Instância 5 foi elaborada com o período máximo de 72 horas para iniciar a OM, considerado pela equipe de manutenção como um período mais flexível. A Instância 6 apresenta o período máximo de 48 horas para iniciar a OM, considerado como um período normal. A Instância 7 conta com o período máximo de 24 horas para iniciar a OM, considerado como um período crítico. A Instância 8 conta com o período máximo de 0 hora para iniciar a OM, ou seja, o atendimento a OM deve ser iniciado exatamente no momento solicitado, considerado como o período mais crítico para atendimento.

No Grupo 3 as instâncias foram criadas para verificar o impacto da inserção de um maior número de OMs e OMs sincronizadas. Tem como objetivo analisar a possibilidade de aumentar o número de OMs atendidas no mesmo horizonte de planejamento, um total de 6 ciclos completos de trabalho, aproximadamente uma semana e, além disso, analisar o comportamento do solver CPLEX para resolver instâncias de grande porte. A instância 11 conta com um total de 10 pátios ferroviários, 14 recursos, 48 OMs com 20 OMs sincronizadas e um período máximo de 48 horas para iniciar a OM. A instância 12 apresenta os mesmo dados da Instância 11, porém com um período máximo de 24 horas para iniciar a OM. O Grupo 4 conta com as Instâncias de 13 a 16 que foram criadas para verificar o impacto da inserção de um maior número de recursos disponíveis para atendimento as OMs, representando a possibilidade de aquisição de novos equipamentos e pessoal. As Instâncias do Grupo 4 foram criadas com os mesmos dados das

Instâncias do Grupo 3 porém com um acréscimo de 9 recursos, somando um total de 23 recursos disponíveis para atendimento as OMs, conforme Tabela 06.

Tabela 06 – Acréscimo na quantidade de recursos

| Tipo de recurso | Descrição | Quantidade inicial | Quantidade com acréscimo |
|------------------------|------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| M1 | Socadora de linha | 4 | 5 |
| M2 | Socadora de chave | 1 | 2 |
| M3 | Desguarnecedora de lastro | 1 | 2 |
| M4 | Esmerilhadeira de trilho | 1 | 2 |
| M5 | Equipe de manutenção manual | 3 | 5 |
| M6 | Equipe de apoio as máquinas de via | 3 | 5 |
| M7 | Caminhão rodoferroviário | 1 | 2 |
| TOTAL | | 14 | 23 |

Fonte: Autor.

O Grupo 5 conta com as instâncias de 17 a 20. Esse grupo foi criado para verificar se o aumento na produtividade (m/h) da manutenção dos recursos, aumenta a quantidade de OMs atendidas no horizonte de planejamento estimado. As instâncias foram elaboradas com os mesmos dados das instâncias do Grupo 3, porém, tiveram a produtividade de manutenção aumentada em 10%. Por último, o Grupo 6, também foi criado para analisar o aumento na produtividade (m/h) dos recursos. As instâncias de 21 a 24 foram elaboradas com os mesmo dados do Grupo 3 entretanto, tiveram a produtividade da manutenção aumentada em 20%. Na Tabela 7 é possível entender melhor o aumento da produtividade dos Grupos 5 e 6 descritos anteriormente.

Tabela 7 – Produtividade dos recursos

| Tipo de recurso | Produtividade normal (m/h) | Produtividade aumentada em 10% (m/h) | Produtividade aumentada em 20% (m/h) |
|------------------------|-----------------------------------|---|---|
| M1 | 430 | 473 | 516 |
| M2 | 200 | 220 | 240 |
| M3 | 20 | 22 | 24 |
| M4 | 1000 | 1100 | 1200 |
| M5 | 27 | 30 | 32 |
| M6 | Vinculada | Vinculada | Vinculada |
| M7 | 27 | 30 | 32 |

Fonte: Autor.

Para todas as instâncias foram mantidas um total de 6 rotas, representando o turno de trabalho, que devem respeitar o tempo máximo 8 horas por turno. Antes de iniciar um novo turno de trabalho os recursos devem respeitar o período de descanso de 11 horas. Por questão de confiabilidade a EFVM não informou os custos para deslocar um recurso de um trecho para outro trecho (este custo para as máquinas 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 40km/h, temos o consumo de 6,82 litros por quilometro. No Brasil o preço médio do óleo diesel B10 é de R\$3,2 (PETROBRÁS, 2020). Multiplicando o valor do diesel com o consumo por quilometro da máquina de via, temos um custo total de R\$22 reais por quilometro. 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 (2019). Considerando a velocidade de deslocamento entre trechos de 40km/h e o valor do diesel B5 de R\$ 3,2 (PETROBRÁS, 2020) tem-se um custo total de R\$2,94 reais por quilometro percorrido.

A Tabela 8 apresenta as instâncias de testes propostas. As colunas Grupo e Instância informam a quantidade de grupos e instâncias testadas. Nas demais colunas são apresentados os parâmetros: Quantidade de recursos refere-se à quantidade de recursos ferroviários disponível; Número de recursos que pode realizar o tipo de serviço refere-se ao número de recursos que pode exercer determinados serviços, variando de 1 a 10 como apresentado na Tabela 4; Número de OMs refere-se a quantidade de OMs criadas para cada instância; Número de OMs Sincronizadas refere-se a quantidade de sincronização que deverá ocorrer entre as OMs; e Período máximo para OM iniciar (h) refere-se ao tempo máximo que cada OM pode levar para ser atendida.

Tabela 8 - Dados das instâncias de testes

| Grupos | Instâncias | Quantidade de Recursos | Nº de recursos que pode realizar o tipo de serviço | | | | | | | | | | Nº de OMs | Nº de OMs Sincronizadas | Período máximo para OM iniciar (h) |
|--------|------------|------------------------|--|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----------|-------------------------|------------------------------------|
| | | | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | | | |
| 1 | 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 |
| | 4 | 14 | 4 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 36 | 14 | 48 |
| 2 | 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 |
| | 8 | 14 | 4 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 36 | 14 | 0 |
| 3 | 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 |
| | 12 | 14 | 4 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 48 | 20 | 24 |
| 4 | 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 |
| | 16 | 23 | 5 | 2 | 2 | 2 | 5 | 1 | 5 | 5 | 2 | 2 | 48 | 20 | 24 |
| 5 | 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 |
| | 20 | 14 | 4 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 48 | 20 | 24 |
| 6 | 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 |
| | 24 | 14 | 4 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 48 | 20 | 24 |

Fonte: Autor.

6 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na análise de sensibilidade realizada com os parâmetros da função objetivo e, os resultados alcançados pelo CPLEX, bem como, as análises desses resultados. Para executar o modelo proposto foi utilizado o *solver* CPLEX, versão 12.10 em um computador Intel Xeon Silver 4116, com 2 processadores de 2.10 GHz com 16 núcleos e 128 GB de memória RAM.

6.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DA F.O

A principal finalidade da Função Objetivo (F.O), equação (1), do modelo é atender o maior número de OMs possíveis. Uma vez alcançado este objetivo, espera-se também minimizar o custo por quilometro rodado de cada recurso e diminuir o atraso entre o momento em que se inicia o atendimento à OM e o momento solicitado para início. Desse modo, foram testados vários valores para os parâmetros α , β e γ , que multiplicam, respectivamente, as parcelas (a), (b) e (c) da equação (1), para visualizar o comportamento da F.O, dando ênfase a maximização do número de OMs atendidas.

Como a primeira parcela refere-se à prioridade de atendimento das OMs, esta recebeu maior valor para α , que teve seus valores aumentados até conseguir atender o máximo de OMs possíveis. A segunda parcela busca minimizar os custos com quilometro rodado de cada recurso, esta recebeu um valor menor que a primeira parcela do F.O com o parâmetro β , que teve seu valor aumentado gradativamente. A terceira parcela foi multiplicada pelo parâmetro γ , que apresenta valor constante igual a 1, pois é a parcela menos relevante para a equipe de planejamento da manutenção da EFVM.

Para realizar os testes da análise de sensibilidade foram considerados os procedimentos operacionais da EFVM. Assim como no Grupo 1 a instância testada foi criada considerando um segmento reduzido da EFVM contendo com um total de 5 pátios ferroviários, 14 recursos disponíveis para atendimento, que exercem diferentes tipos de serviços, e um período máximo para iniciar a OM de até 48 horas. A Instância apresenta um total de 24 OMs sendo 10 OMs sincronizadas e considera todas as premissas do problema estudado. Na Tabela 9 são apresentados os resultados obtidos com a análise de sensibilidade dos parâmetros da F.O. A

primeira, segunda e terceira colunas representam os valores de α , β e γ respectivamente. A quarta coluna representa o valor obtido na F.O, a quinta coluna representa o Tempo de Execução do CPLEX em segundos. A sexta e sétima colunas representam o número total de OMs testadas e o número total de OMs atendidas durante os testes da análise de sensibilidade.

Tabela 9 – Análise de sensibilidade dos parâmetros da Função Objetivo

| α | β | γ | Valor da Função Objetivo (F.O) | Tempo de Execução (s) | Numero Total de OM | Numero de OM Atendidas |
|----------------|-----------|----------|--------------------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|
| 10.000 | 10 | 1 | 4.652.069,80 | 1.494,00 | 24 | 13 |
| 10.000 | 30 | 1 | 4.343.505,80 | 298,76 | 24 | 13 |
| 10.000 | 50 | 1 | 4.034.941,80 | 432,02 | 24 | 13 |
| 10.000 | 100 | 1 | 3.528.158,10 | 191,11 | 24 | 7 |
| 10.000 | 300 | 1 | 2.080.058,10 | 70,83 | 24 | 5 |
| 10.000 | 500 | 1 | 1.082.722,10 | 70,43 | 24 | 3 |
| 50.000 | 10 | 1 | 24.199.834,80 | 1.564,24 | 24 | 23 |
| 50.000 | 30 | 1 | 23.668.936,50 | 1.726,70 | 24 | 18 |
| 50.000 | 50 | 1 | 23.293.708,25 | 1.282,32 | 24 | 14 |
| 50.000 | 100 | 1 | 22.503.531,80 | 277,16 | 24 | 13 |
| 50.000 | 300 | 1 | 19.426.604,00 | 281,32 | 24 | 12 |
| 50.000 | 500 | 1 | 17.669.518,10 | 137,26 | 24 | 7 |
| 100.000 | 10 | 1 | 48.777.121,25 | 4.184,25 | 24 | 24 |
| 100.000 | 30 | 1 | 48.097.007,75 | 2.658,18 | 24 | 22 |
| 100.000 | 50 | 1 | 47.556.839,00 | 1.354,07 | 24 | 19 |
| 100.000 | 100 | 1 | 46.598.208,25 | 844,72 | 24 | 14 |
| 100.000 | 300 | 1 | 43.467.891,80 | 653,11 | 24 | 13 |
| 100.000 | 500 | 1 | 40.382.251,80 | 252,04 | 24 | 13 |

Fonte: Autor.

Ao aumentar o valor de α , foi possível perceber um aumento significativo no número de OMs atendidas e no valor da F.O, chegando a atender todas as OMs planejadas. No entanto, ao variar o valor de β , mantendo o valor de α , houve uma redução no número de OMs atendidas. Pela análise do resultado da Tabela 9, foi verificado que os valores dos parâmetros $\alpha = 100.000$, $\beta = 10$ e $\gamma = 1$, foram os que levaram ao maior número de OMs atendidas, o que é o objetivo central da equipe de planejamento da manutenção da EFVM.

6.2 RESULTADOS DO CPLEX E ANÁLISES

As instâncias foram executadas por no máximo 86.400,00 segundos. Na Tabela 10 são apresentados os resultados do CPLEX. A primeira e segunda coluna representam, respectivamente, os grupos e as instâncias testadas. A terceira coluna representa o valor obtido na Função Objetivo (F.O). A quarta, quinta e sexta colunas representam o *Lower Bound* (LB), o *Upper Bound* (UB), e o *GAP* ($GAP = (LB - UB)/LB$) obtido pelo CPLEX. A sétima coluna representa o tempo de execução do CPLEX em segundos.

Tabela 10 – Resultados encontrados pelo CPLEX

| Grupo | Instância | Função Objetivo | UB | LB | GAP (%) | Tempo de Execução (s) |
|-------|-----------|-----------------|----------------|----------------|---------|-----------------------|
| 1 | 1 | 22.406.494,90 | 22.406.494,90 | 22.406.494,90 | 0,00 | 20,95 |
| | 2 | 24.525.369,80 | 24.525.369,80 | 24.525.369,80 | 0,00 | 48,45 |
| | 3 | 48.753.067,30 | 48.753.067,30 | 48.753.067,30 | 0,00 | 7064,94 |
| | 4 | 72.647.258,30 | 75.787.508,51 | 72.647.258,30 | 4,32 | 86.400,00 |
| 2 | 5 | 72.698.747,55 | 76.584.229,23 | 72.698.747,55 | 5,34 | 86.400,00 |
| | 6 | 70.720.686,30 | 75.252.551,36 | 70.720.686,30 | 6,41 | 86.400,00 |
| | 7 | 61.493.096,85 | 63.248.259,38 | 61.493.096,85 | 2,85 | 86.400,00 |
| | 8 | 34.734.271,00 | 34.734.271,00 | 34.734.271,00 | 0,00 | 184,00 |
| 3 | 9 | 70.720.686,30 | 75.252.551,36 | 70.720.686,30 | 6,41 | 86.400,00 |
| | 10 | 61.493.096,85 | 63.248.259,38 | 61.493.096,85 | 2,85 | 86.400,00 |
| | 11 | 102.844.792,60 | 106.736.144,70 | 102.844.792,60 | 3,78 | 86.400,00 |
| | 12 | 92.814.388,40 | 97.087.620,80 | 92.814.388,40 | 4,60 | 86.400,00 |
| 4 | 13 | 71.357.115,85 | 77.437.858,38 | 71.357.115,85 | 8,52 | 86.400,00 |
| | 14 | 62.194.294,30 | 72.999.919,78 | 62.194.294,30 | 9,01 | 86.400,00 |
| | 15 | 103.734.785,00 | 109.936.723,00 | 103.734.785,00 | 6,15 | 86.400,00 |
| | 16 | 102.734.450,00 | 105.058.526,12 | 102.734.450,00 | 6,14 | 86.400,00 |
| 5 | 17 | 71.663.758,65 | 74.281.255,10 | 71.663.758,65 | 3,65 | 86.400,00 |
| | 18 | 62.471.157,55 | 64.031.950,09 | 62.471.157,55 | 2,50 | 86.400,00 |
| | 19 | 103.982.833,90 | 106.681.175,37 | 103.982.833,90 | 2,59 | 86.400,00 |
| | 20 | 93.007.384,75 | 98.691.422,53 | 93.007.384,75 | 6,11 | 86.400,00 |
| 6 | 21 | 71.798.051,85 | 74.265.897,67 | 71.798.051,85 | 3,44 | 86.400,00 |
| | 22 | 62.610.682,30 | 64.042.918,09 | 62.610.682,30 | 2,29 | 86.400,00 |
| | 23 | 104.050.562,55 | 110.784.444,00 | 104.050.562,55 | 6,47 | 86.400,00 |
| | 25 | 93.922.206,45 | 107.661.191,02 | 93.922.206,45 | 8,18 | 86.400,00 |

Fonte: Autor.

Na tabela 11 são apresentadas as análises dos resultados operacionais das instâncias testadas no modelo matemático. A primeira e segunda coluna representam, respectivamente, os grupos e as instâncias testadas. A terceira coluna apresenta o número total de OMs solicitadas para cada instância. A quarta e quinta colunas representam o número de OM atendidas e o número de OM não atendidas, respectivamente.

Tabela 11 – Análise dos resultados operacionais

| Grupo | Instância | Total de OMs solicitadas | OMs atendidas | OMs não atendidas |
|--------------|------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------|
| 1 | 1 | 10 | 10 | 0 |
| | 2 | 14 | 14 | 0 |
| | 3 | 24 | 24 | 0 |
| | 4 | 36 | 26 | 10 |
| 2 | 5 | 36 | 27 | 9 |
| | 6 | 36 | 24 | 12 |
| | 7 | 36 | 21 | 15 |
| | 8 | 36 | 10 | 26 |
| 3 | 9 | 36 | 24 | 12 |
| | 10 | 36 | 21 | 15 |
| | 11 | 48 | 34 | 14 |
| | 12 | 48 | 31 | 17 |
| 4 | 13 | 36 | 27 | 9 |
| | 14 | 36 | 24 | 12 |
| | 15 | 48 | 36 | 12 |
| | 16 | 48 | 33 | 15 |
| 5 | 17 | 36 | 25 | 11 |
| | 18 | 36 | 22 | 14 |
| | 19 | 48 | 35 | 13 |
| | 20 | 48 | 32 | 16 |
| 6 | 21 | 36 | 26 | 10 |
| | 22 | 36 | 23 | 13 |
| | 23 | 48 | 37 | 11 |
| | 24 | 48 | 34 | 14 |

Fonte: Autor.

As instâncias do Grupo1, foram criadas para verificar a lógica e coerência do modelo matemático quanto ao atendimento às OMs. O grupo conta com as instâncias de 1 a 4 que possuem um total de 5 pátios ferroviário, 14 recursos disponíveis, que exercem diferentes tipos de serviços, e um período máximo para iniciar a OM de 48 horas.

A Instância 1 apresenta um total de 10 OMs sendo 4 OMs sincronizadas. Na Tabela 12 é apresentado o resultado obtido com a alocação dos recursos para atendimento às OMs da Instância 1. O recurso M sai do pátio P em que encontra estacionado para atender a OM, dentro do momento solicitado para início da manutenção. Após realizar o atendimento o recurso M desloca-se para o pátio virtual P, equivalente ao seu de origem, ou outro pátio virtual que achar pertinente, finalizando o turno de trabalho de 8 h. Antes de iniciar uma nova rota o recurso M deve aguardar o período de descanso de 11h. Após o descanso, o recurso M desloca-se para atender outra OM ou permanece estacionado no pátio P até o fim do horizonte de planejamento.

Na Instância 1 (Tabela 12) é possível observar os tipos de serviços realizados por cada recurso, variando de S1 até S10. Também é possível verificar o local de partida de cada recurso, ou seja, o pátio P em que o recurso está estacionado e deve iniciar o seu turno de trabalho. Outro resultado importante apresentado na Tabela 12 refere-se aos recursos utilizados em cada atendimento às OMs. Na OM1 foi solicitado o serviço S4 realizado pelo recurso M7 no trecho T5, na OM2 foi solicitado o serviço S1 realizado pelo recurso M4 no trecho T20, e assim por diante até a OM10 que requisitou o serviço S6 realizado pelo recurso M4 no trecho T21. Nota-se que as OMs sincronizadas OM4 com OM5 foram atendidas no trecho T12, pelos recursos M4 e M12 respectivamente. Além disso, o tempo de início da manutenção para os dois atendimentos foram iguais, comprovando que eles ocorreram ao mesmo tempo, ou seja, a sincronização solicitada foi atendida com êxito. O mesmo ocorreu com OMs sincronizadas OM6 com OM7 atendidas pelos recursos M12 e M5, respectivamente, no trecho T7.

Na Tabela 12 também foi apresentada a ordem de realização dos atendimentos às OMs para cada recurso utilizado, de acordo com a sua rota. Na coluna Recursos utilizados são apresentados os recursos utilizados na roteirização; na coluna Rotas

são apresentadas as rotas realizadas pelos recursos; e na coluna Detalhamento das rotas são apresentados os resultados obtidos com a alocação dos recursos.

O recurso M4 na rota R1 se deslocou do pátio P1 para o pátio P16, que corresponde ao seu pátio virtual, ou seja, não atendeu nenhuma OM na rota R1, permanecendo estacionado no pátio P1. Após aguardar o período de descanso de 11h o recurso M4 iniciou um novo turno de trabalho na rota R2. O recurso M4 saiu do pátio P1 e desloca-se até o trecho T12 para atender a OM4. Após atender a OM4 o recurso M4 dirige-se para o trecho T20 para atender a OM2, e em seguida vai para trecho T21 para atender a OM10. Após atender a OM10 o recurso M4 dirige-se para o pátio virtual P17 finalizando o turno de trabalho da rota R2.

Cabe ressaltar que o pátio P17 equivale ao pátio real P2, assim, na próxima rota R3 o recurso M4 inicia sua jornada no pátio P2 dirigindo-se até o pátio P16, correspondente ao pátio virtual do pátio P1. Esse deslocamento entre pátios ocorreu porque o modelo entendeu que é melhor começar a próxima rota R4 do pátio P1, por estar mais próximo a OM3 que será atendida pelo recurso M4 na rota R4. Após atender a OM3 o recurso M4 finaliza seu turno de trabalho no pátio P16. Nas demais rotas R5 e R6 o recurso M4 não atendeu OMs, portanto, permaneceu estacionado no pátio P1. É importante frisar que o mesmo processo de alocação vale para os demais recursos utilizados na roteirização.

Tabela 12 – Resumo dos resultados da Instância 1

| Instância 1 | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------------------|------------------|-----------------------|---------------|------|------------------------------------|------|------|------|------|--|----|
| Tipo de recurso utilizado | Tipos de serviços por recurso | Local de Partida | Função Objetivo (F.O) | | | Tempo de Execução (s) | | | | | | |
| M4 | S1 e S6 | P1 | 22.406.499,60 | | | 20,93 | | | | | | |
| M5 | S2 | P3 | | | | OMs solicitadas | | | | | | 10 |
| M6 | S3 | P4 | | | | OMs sincronizadas | | | | | | 4 |
| M7 | S4 | P5 | | | | Quantidade de recursos disponíveis | | | | | | 14 |
| M12 | S5 | P1 | | | | Nº de serviços | | | | | | 10 |
| Trechos | T5 | T20 | T23 | T12 | T12 | T7 | T7 | T5 | T8 | T21 | | |
| OMs atendidas | OM1 | OM2 | OM3 | OM4 | OM5 | OM6 | OM7 | OM8 | OM9 | OM10 | | |
| OMs Sincronizadas | ---- | ---- | ---- | Sincronizadas | | Sincronizadas | | ---- | ---- | ---- | | |
| Serviços solicitados | S4 | S1 | S6 | S1 | S5 | S5 | S2 | S3 | S4 | S6 | | |
| Recursos usados | M7 | M4 | M4 | M4 | M12 | M12 | M5 | M6 | M7 | M4 | | |
| Tempo de início da manutenção (min) | 302 | 1277 | 3450 | 1152 | 1152 | 1300 | 1300 | 150 | 168 | 1420 | | |
| Momento solicitado para início da OM (min) | 30 | 100 | 3450 | 50 | 50 | 1300 | 1300 | 100 | 40 | 1200 | | |
| Momento limite para início da OM (min) | 2760 | 2760 | 6180 | 2760 | 2760 | 3900 | 3900 | 2760 | 2760 | 3900 | | |

| Instância 1 | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|---------------------|----|---|------------------------|---|-----|---|------|---|-----|--|--|
| Recursos utilizados | Rotas | | | Detalhamento das rotas | | | | | | | | |
| Recurso M4 | R1 | P1 | → | P16 | | | | | | | | |
| Recurso M4 | R2 | P1 | → | OM4 | → | OM2 | → | OM10 | → | P17 | | |
| Recurso M4 | R3 | P2 | → | P16 | | | | | | | | |
| Recurso M4 | R4 | P2 | → | OM3 | → | P16 | | | | | | |
| Recurso M5 | R5 e R6 | P1 | → | P16 | | | | | | | | |
| Recurso M5 | R1 | P3 | → | P17 | | | | | | | | |
| Recurso M5 | R2 | P2 | → | OM7 | → | P17 | | | | | | |
| Recurso M5 | R3, R4, R5 e R6 | P2 | → | P17 | | | | | | | | |
| Recurso M6 | R1 | P4 | → | OM8 | → | P17 | | | | | | |
| Recurso M6 | R2, R3, R4, R5 e R6 | P2 | → | P17 | | | | | | | | |
| Recurso M7 | R1 | P5 | → | OM9 | → | OM1 | → | P16 | | | | |
| Recurso M7 | R2, R3, R4, R5 e R6 | P1 | → | P16 | | | | | | | | |
| Recurso M12 | R1 | P1 | → | P16 | | | | | | | | |
| Recurso M12 | R2 | P1 | → | OM5 | → | OM6 | → | P17 | | | | |
| Recurso M12 | R3, R4, R5 e R6 | P2 | → | P17 | | | | | | | | |

Fonte: Autor.

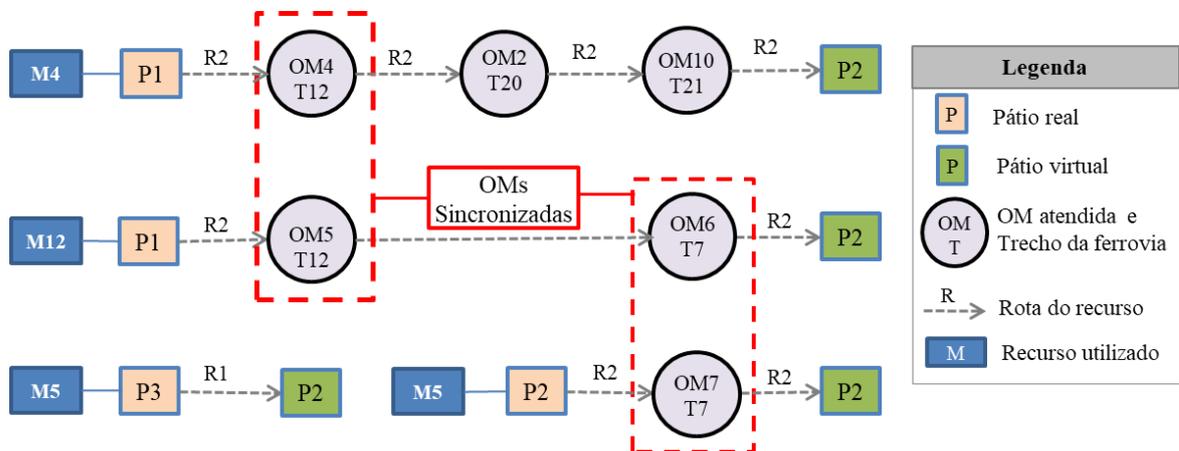
Cabe ressaltar que as OM4 e OM5 são sincronizadas e atendidas pelos recursos M4 e M12 respectivamente. As duas OMs são atendidas na mesma rota R2 e no mesmo trecho T12 e os tempos de chegada dos recursos nos trechos para atendimento às OMs são iguais, comprovando a sincronização entre eles. O mesmo ocorre para as

OM6 e OM7 que são atendidas pelos recursos M12 e M5 respectivamente, no trecho T7.

Na Figura 10 é possível entender melhor a sincronização ocorrida entre às OMs. O recurso M4 inicia seu turno de trabalho na rota R2, e desloca-se do pátio P1 até o trecho T12 para atender a OM4. Como a OM4 é sincronizada com a OM5, ambas no trecho T12, o recurso M12 também inicia seu turno de trabalho na rota R2, e desloca-se do pátio P1 até o trecho T12 para atender a OM5. Ao término dos atendimentos, os recursos deslocam-se para os próximos atendimentos. O recurso M4 desloca-se até o trecho T20 para atender a OM2 e depois viaja até o trecho T21 para atender a OM10, finalizando seu turno de trabalho no pátio virtual P2. Já o recurso M12 desloca-se até o trecho T7 para atender a OM6, que é sincronizada com a OM7 atendida pelo recurso M5.

O recurso M5 em sua rota R1 deslocou-se do pátio P3 até o pátio P2. Esse deslocamento entre pátios ocorreu porque o modelo entendeu que é melhor começar a próxima rota R2 do pátio P2, por estar mais próximo a OM7 que será atendida pelo recurso M5 na rota R2. Após cumprir o período de descanso o recurso M5 inicia um novo turno de trabalho na rota R2, deslocando-se até o trecho T7 para atender a OM7 que é atendida de forma sincronizada com a OM6. Ao término dos atendimentos, os recursos deslocam-se para o pátio virtual P2, finalizando seus trabalhos.

Figura 10 – Detalhamento da sincronização ocorrida na instância 1



Fonte: Autor.

Todas as OMs da Instância 1 foram atendidas com êxito, respeitando todas as restrições impostas no problema. Além disso, o CPLEX conseguiu encontrar solução ótima para a Instância 1.

As demais instâncias do Grupo 1 também foram criadas para verificar a lógica e coerência dos resultados obtidos com a solução do modelo matemático. Foram utilizados os mesmos dados da Instância 1 porém, com o número de OMs aumentadas. A Instância 2 conta com um total de 14 OMs sendo 6 sincronizadas, a Instância 3 conta com um total de 24 OMs sendo 10 OMs sincronizadas e a Instância 4 conta com um total de 36 OMs sendo 14 sincronizadas.

As Instâncias 2 e 3 tiveram todas as OMs atendidas dentro do período de planejamento estimado, conforme Tabela 11 de resultado operacionais do CPLEX. Além disso, o CPLEX encontrou solução ótima para as duas instâncias, conforme Tabela 11. Na Instância 4 nota-se que foram atendidas 26 OMs, deixando de atender 10 OMs. Isso ocorre porque o CPLEX optou por atender, primeiramente, as OMs com maior prioridade, deixando de atender OMs com prioridade baixa.

No Grupo 1 foram analisados a lógica e a coerência dos resultados obtidos com base nas restrições estabelecidas no modelo. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que as instâncias do Grupo 1 obedeceram todas as restrições impostas no modelo matemático. O tempo de início da manutenção para todas as OMs ocorreram dentro do momento solicitado para início da manutenção, bem como, do momento limite permitido para início da manutenção. Além disso, todas as OMs sincronizadas foram atendidas dentro do limite de tempo estabelecido para cada instância. 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.

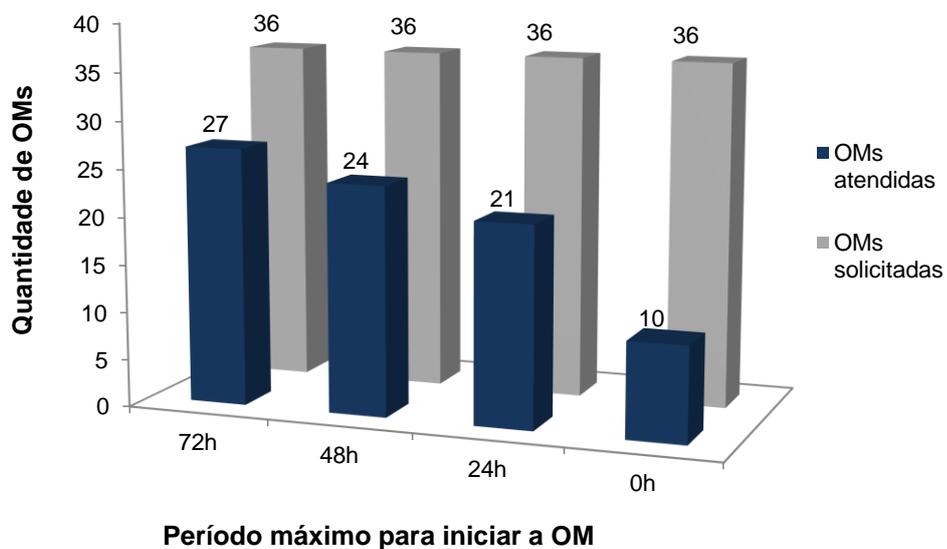
A partir do Grupo 2 todas as instâncias testadas foram desenvolvidas considerando toda extensão da EFVM (895 km), possuindo um total de 10 pátios ferroviários e 14 recursos disponíveis para atendimento, representando a situação mais próxima da realidade operacional da EFVM.

O Grupo 2 foi desenvolvido para analisar o comportamento do modelo matemático, mediante mudanças no período máximo para iniciar a OM. Na Instância 5, como o período máximo para iniciar a OM é considerado amplo, com 72 horas, nota-se que

o CPLEX conseguiu atender 27 das 36 OMs solicitadas, isso ocorre porque o CPLEX possui uma margem maior para decidir qual horário iniciar a OM. 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, sendo a Instância 6 com 48 horas e 24 OMs atendidas, a Instância 7 com 24 horas e 21 OMs atendidas e a Instância 8 com zero hora e 10 OMs atendidas. Cabe ressaltar que o CPLEX não atendeu todas as OMs solicitadas no grupo, isso ocorre porque o CPLEX optou por atender, primeiramente, as OMs com maior prioridade, e deixou de atender algumas com menor prioridade.

Assim, após as análises realizadas, percebe-se que o aumento do período máximo para iniciar a OM pode aumentar a capacidade de atendimento às OMs da superestrutura ferroviária. Na Figura 11, é apresentado o gráfico da capacidade de atendimento às OMs variando o período máximo para iniciar a OM do modelo proposto. No gráfico são apresentadas as OMs solicitadas para atendimento no Grupo 2 e também as OMs que foram atendidas nas quatro instâncias do grupo. Instância 5 com 27 OMs atendidas, Instância 6 com 24 OMs atendidas, Instância 3 com 21 OMs atendidas e Instância 4 com 10 OMs atendidas.

Figura 11 – Capacidade de atendimento às OMs variando o período máximo para iniciar a OM



Fonte: Autor

No Grupo 3 as instâncias foram desenvolvidas para verificar o impacto da inserção de um maior número de OMs solicitadas. Os períodos máximos para iniciar a OM nas Instâncias 11 e 12 foram, respectivamente, 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 CPLEX encontrou solução para todas as Instâncias testadas. Na Instância 11 foram atendidas 34 OMs das 48 OMs solicitadas. Na Instância 12 nota-se que o CPLEX atendeu a 31 OMs das 48 OMs solicitadas. O CPLEX conseguiu atender um maior número de OMs na Instância 11, porque ela possui um período máximo para iniciar a OM maior que a Instância 12, deixando o CPLEX com uma margem maior para atender às OMs solicitadas.

Após analisar os resultados, nota-se que o CPLEX rodando o modelo matemático encontrou solução para todas as instâncias do Grupo 3, mostrando ser capaz de atender um número considerado de OMs dentro do período de planejamento estimado. O tempo de início da manutenção para todas as OMs ocorreram dentro do momento solicitado para início da manutenção, bem como, do momento limite permitido para início da manutenção. Além disso, todas as OMs sincronizadas foram atendidas dentro do limite de tempo estabelecido para cada instância. Nas Tabelas 13 são apresentados os resultados obtidos na Instância 11. Na primeira e segunda colunas são apresentadas as OMs atendidas e sincronizadas respectivamente. Na terceira coluna são apresentados os trechos em que ocorreram as manutenções, na quarta coluna são apresentados o tempo de início de cada manutenção. Na quinta e sexta colunas são apresentados, respectivamente, o momento solicitado para início da manutenção e o momento limite para início da OM.

Tabela 13 – Resumo dos resultados da Instância 11

| OMs atendidas | OMs sincronizadas | Trechos | Tempo de início da manutenção (min) | Momento solicitado para início da OM (min) | Momento limite para início da OM (min) |
|---------------|-------------------|---------|-------------------------------------|--|--|
| OM1 | ---- | T5 | 1168,00 | 30,00 | 2760,00 |
| OM2 | Sincronizadas | T6 | 2295,00 | 1200,00 | 3900,00 |
| OM3 | | | 2295,00 | 1200,00 | 3900,00 |
| OM7 | Sincronizadas | T32 | 3564,00 | 3480,00 | 6180,00 |
| OM8 | | | 3564,00 | 3480,00 | 6180,00 |
| OM9 | Sincronizadas | T62 | 1162,00 | 200,00 | 2760,00 |
| OM10 | | | 1162,00 | 200,00 | 2760,00 |
| OM11 | Sincronizadas | T13 | 1278,00 | 100,00 | 2760,00 |
| OM12 | | | 1278,00 | 100,00 | 2760,00 |
| OM13 | ---- | T13 | 2344,00 | 100,00 | 2760,00 |
| OM14 | Sincronizadas | T56 | 3498,00 | 3420,00 | 6180,00 |
| OM15 | | | 3498,00 | 3420,00 | 6180,00 |
| OM16 | Sincronizadas | T43 | 4600,00 | 2300,00 | 5040,00 |
| OM17 | | | 4600,00 | 2300,00 | 5040,00 |
| OM18 | ---- | T46 | 4748,00 | 4560,00 | 6180,00 |
| OM23 | Sincronizadas | T52 | 2420,00 | 2420,00 | 5040,00 |
| OM24 | | | 2420,00 | 2420,00 | 5040,00 |
| OM27 | Sincronizadas | T21 | 3489,00 | 1200,00 | 3900,00 |
| OM28 | | | 3489,00 | 1200,00 | 3900,00 |
| OM34 | Sincronizadas | T65 | 4609,00 | 4590,00 | 6180,00 |
| OM35 | | | 4609,00 | 4590,00 | 6180,00 |
| OM36 | ---- | T34 | 2410,00 | 2300,00 | 5040,00 |
| OM37 | Sincronizadas | T27 | 1150,00 | 1140,00 | 3900,00 |
| OM38 | | | 1150,00 | 1140,00 | 3900,00 |
| OM39 | Sincronizadas | T27 | 3439,00 | 3420,00 | 6180,00 |
| OM40 | | | 3439,00 | 3420,00 | 6180,00 |
| OM41 | Sincronizadas | T24 | 2304,00 | 300,00 | 2760,00 |
| OM42 | | | 2304,00 | 300,00 | 2760,00 |
| OM43 | ---- | T24 | 3444,00 | 2300,00 | 5040,00 |
| OM44 | Sincronizadas | T40 | 3430,00 | 3430,00 | 6180,00 |
| OM45 | | | 3430,00 | 3430,00 | 6180,00 |
| OM46 | Sincronizadas | T48 | 291,00 | 200,00 | 2760,00 |
| OM47 | | | 291,00 | 200,00 | 2760,00 |
| OM48 | ---- | T17 | 4588,00 | 4560,00 | 6180,00 |

Fonte: Autor.

Na Tabela 14 são apresentados os resultados obtidos na Instância 12. Na primeira e segunda colunas são apresentadas as OMs atendidas e sincronizadas respectivamente. Na terceira coluna são apresentados os trechos em que ocorreram as manutenções, na quarta coluna são apresentados o tempo de início de cada manutenção. Na quinta e sexta colunas são apresentados, respectivamente, o momento solicitado para início da manutenção e o momento limite para início da OM.

Tabela 14 – Resumo dos resultados da Instância 12

| OMs atendidas | OMs sincronizadas | Trechos | Tempo de início da manutenção (min) | Momento solicitado para início da OM (min) | Momento limite para início da OM (min) |
|---------------|-------------------|---------|-------------------------------------|--|--|
| OM1 | ---- | T5 | 1168,00 | 30,00 | 1620,00 |
| OM2 | Sincronizadas | T6 | 2295,00 | 1200,00 | 2760,00 |
| OM3 | | | 2295,00 | 1200,00 | 2760,00 |
| OM7 | Sincronizadas | T32 | 4625,00 | 3480,00 | 5040,00 |
| OM8 | | | 4625,00 | 3480,00 | 5040,00 |
| OM9 | Sincronizadas | T62 | 1162,00 | 200,00 | 1620,00 |
| OM10 | | | 1162,00 | 200,00 | 1620,00 |
| OM11 | Sincronizadas | T13 | 1278,00 | 100,00 | 1620,00 |
| OM12 | | | 1278,00 | 100,00 | 1620,00 |
| OM14 | Sincronizadas | T56 | 4638,00 | 3420,00 | 5040,00 |
| OM15 | | | 4638,00 | 3420,00 | 5040,00 |
| OM16 | Sincronizadas | T43 | 3478,00 | 2300,00 | 3900,00 |
| OM17 | | | 3478,00 | 2300,00 | 3900,00 |
| OM18 | ---- | T46 | 5740,00 | 4560,00 | 6180,00 |
| OM23 | Sincronizadas | T52 | 3452,00 | 2420,00 | 3900,00 |
| OM24 | | | 3452,00 | 2420,00 | 3900,00 |
| OM27 | Sincronizadas | T21 | 2292,00 | 1200,00 | 2760,00 |
| OM28 | | | 2292,00 | 1200,00 | 2760,00 |
| OM29 | ---- | T21 | 4633,00 | 1200,00 | 2760,00 |
| OM34 | Sincronizadas | T65 | 4793,00 | 4590,00 | 6180,00 |
| OM35 | | | 4793,00 | 4590,00 | 6180,00 |
| OM39 | Sincronizadas | T27 | 3430,00 | 3420,00 | 5040,00 |
| OM40 | | | 3430,00 | 3420,00 | 5040,00 |
| OM41 | Sincronizadas | T24 | 1292,00 | 300,00 | 1620,00 |
| OM42 | | | 1292,00 | 300,00 | 1620,00 |
| OM43 | ---- | T24 | 2301,00 | 2300,00 | 3900,00 |
| OM44 | Sincronizadas | T40 | 3430,00 | 3430,00 | 5040,00 |
| OM45 | | | 3430,00 | 3430,00 | 5040,00 |
| OM46 | Sincronizadas | T48 | 200,00 | 200,00 | 1620,00 |
| OM47 | | | 200,00 | 200,00 | 1620,00 |
| OM48 | ---- | T17 | 4588,00 | 4560,00 | 6180,00 |

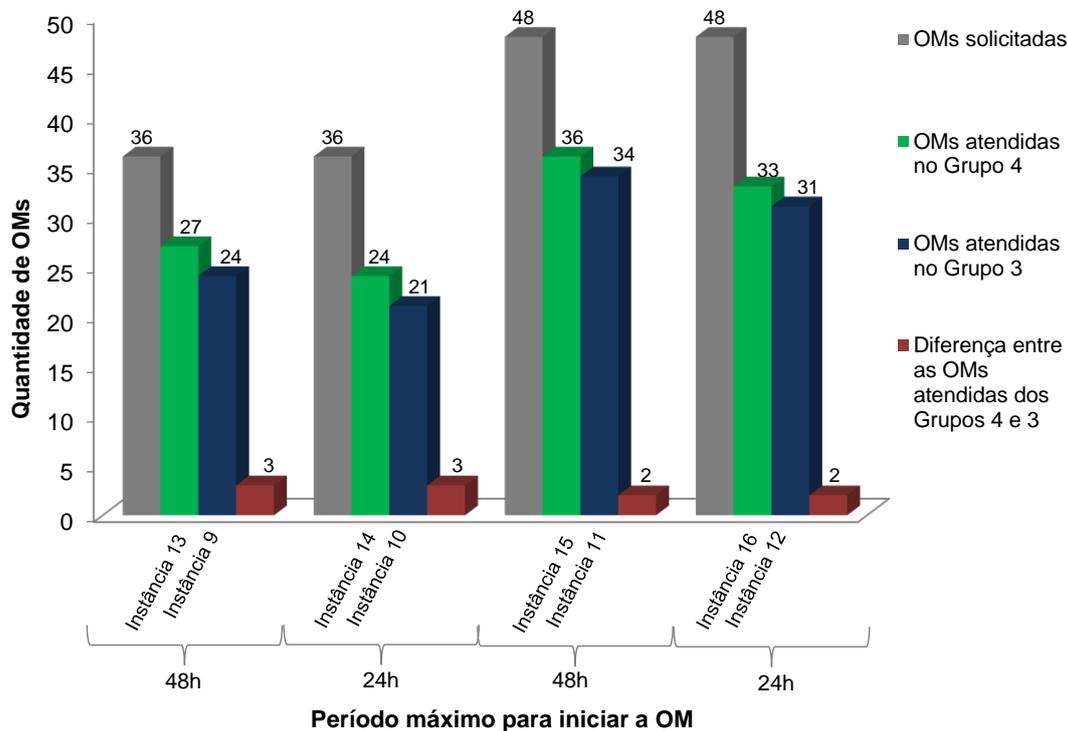
Fonte: Autor.

O Grupo 4 tem como objetivo verificar o impacto da inserção de um maior número de recursos disponíveis para atendimento às OMs, representando a possibilidade de aquisição de novos equipamentos e pessoal. O CPLEX, rodando o modelo matemático proposto, encontrou solução para todas as instâncias testadas no grupo. Nas Instâncias 13 e 14 foram atendidas, respectivamente, 27 e 24 das 36 OMs solicitadas. Já nas Instâncias 15 e 16 foram atendidas, respectivamente, 36 e 33 das 48 OMs solicitadas para cada instância.

Como resultado desse conjunto de instâncias percebe-se um ganho muito modesto no atendimento às OMs solicitadas, principalmente se comparado com o Grupo 3,

que possui um número menor de recursos disponíveis na frota. Na Figura 12 é apresentado o gráfico comparativo entre as OMs atendidas do Grupo 4 e do Grupo 3, mostrando um ganho pequeno entre a quantidade de OMs atendidas. A Instância 9 (Grupo 3) e a Instância 13 (Grupo 4) tiveram 36 OMs solicitadas para serem atendidas no período máximo para iniciar a OM de 48 horas. Na Instância 9 o modelo conseguiu atender 24 das 36 OMs solicitadas e na Instância 13 o modelo conseguiu atender 27 das 36 OMs solicitadas. Logo, a diferença entre a quantidade de OMs atendidas na Instância 13 (Grupo 4) com a Instância 9 (Grupo 3) foi de 3 OMs. É importante frisar que o mesmo processo de interpretação do gráfico vale para as demais instâncias do Grupo 3 e Grupo 4, variado a quantidade de OMs solicitadas e o período máximo para iniciar a OM.

Figura 12 – Comparação entre as OMs atendidas dos Grupos 4 e 3



Fonte: Autor.

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

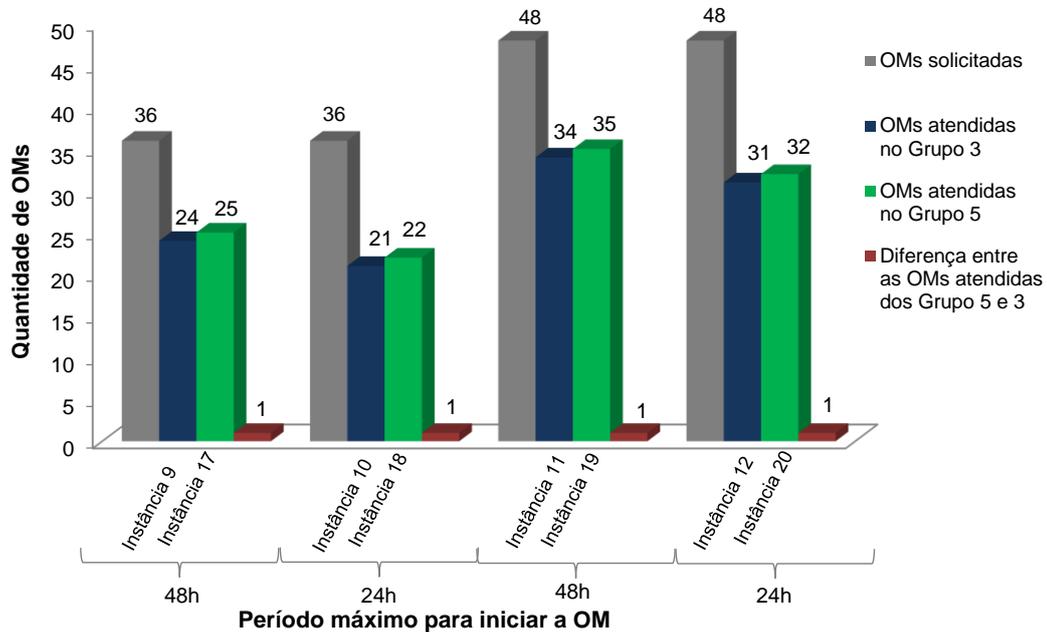
aquisição de uma máquina desguarnecedora de lastro, pode chegar ao valor R\$ 19.345.969,72 milhões de reais e a aquisição de um carro controle, pode chegar ao valor de R\$ 18.750.359,74 milhões de reais. Dessa maneira, os resultados obtidos com as instâncias testadas, mostram que a aquisição de novos 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.

Ao analisar os resultados obtidos no Grupo 2 e compara-los com o Grupo 4, percebe-se que o aumento no período máximo para iniciar uma OM também influencia no atendimento de um maior número de OMs. Por isso, em determinadas situações, pode ser mais vantajoso aumentar o período máximo para iniciar a OM, que a aquisição de novos recursos, principalmente se levar em consideração os elevados custos para aquisição de novas máquinas de via. Outra solução possível, e talvez a melhor das soluções, seria unir a aquisição de novos recursos, quando possível, com períodos mais flexíveis 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 considerado. Para analisar se houve ou não melhora nos atendimentos às OMs, os resultados obtidos nos Grupos 5 e 6 foram comparados com os resultados obtidos no Grupo 3, que apresenta instâncias semelhantes porém com a capacidade de produtividade (m/h) normal.

O Grupo 5 foi desenvolvido com um aumento de 10% na produtividade (m/h) dos recursos. Na Figura 13 é apresentado o gráfico comparativo do número de OMs atendidas no Grupo 5 com o número de OMs atendidas no Grupo 3. A Instância 9 (Grupo 3) e a Instância 17 (Grupo 5) tiveram 36 OMs solicitadas para serem atendidas no período máximo para iniciar a OM de 48 horas. Na Instância 9 o modelo conseguiu atender 24 das 36 OMs solicitadas e na Instância 17 o modelo conseguiu atender 25 das 36 OMs solicitadas. Logo, a diferença entre a quantidade de OMs atendidas na Instância 17 (Grupo 5) com a Instância 9 (Grupo 3) foi de 1 OM. É importante frisar que o mesmo processo de interpretação do gráfico vale para as demais instâncias do Grupo 3 e Grupo 5, variado a quantidade de OMs solicitadas e o período máximo para iniciar a OM.

Figura 13 – Comparação entre OMs atendidas dos Grupos 5 e 3

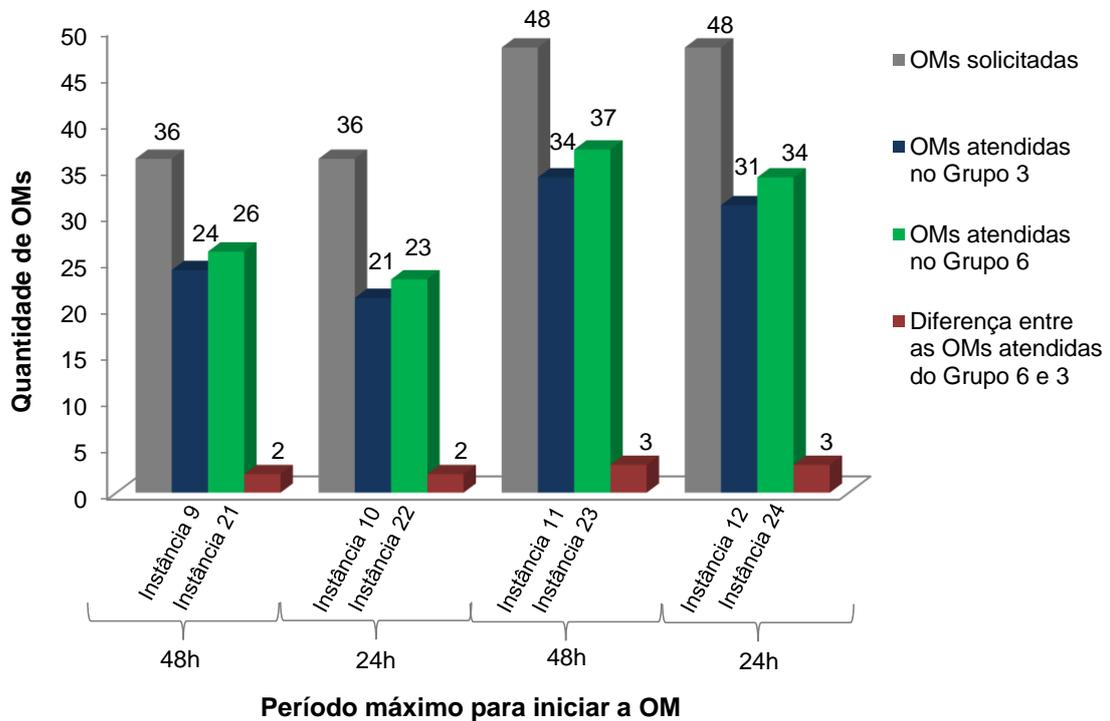


Fonte: Autor.

Ao analisar os resultados das instâncias testadas no Grupo 5, verifica-se que houve um aumento muito pequeno, de apenas 1 OM atendida, quando comparado com os resultados obtidos no Grupo 3. Logo, percebe-se que o esforço de melhorar a produtividade em 10%, seja da máquina de via ou da equipe de manutenção, não é a melhor opção para aumentar o número de OMs atendidas, dentro do horizonte de planejamento considerado.

O Grupo 6 foi desenvolvido com um aumento de 20% na produtividade (m/h) dos recursos. Na Figura 14 é apresentado o gráfico comparativo do número de OMs atendidas no Grupo 6 com o número de OMs atendidas no Grupo 3. A Instância 9 (Grupo 3) e a Instância 21 (Grupo 6) tiveram 36 OMs solicitadas para serem atendidas no período máximo para iniciar a OM de 48 horas. Na Instância 9 o modelo conseguiu atender 24 das 36 OMs solicitadas e na Instância 21 o modelo conseguiu atender 26 das 36 OMs solicitadas. Logo, a diferença entre a quantidade de OMs atendidas na Instância 21 (Grupo 6) com a Instância 9 (Grupo 3) foi de 2 OMs. É importante frisar que o mesmo processo de interpretação do gráfico vale para as demais instâncias do Grupo 3 e Grupo 6, variado a quantidade de OMs solicitadas e o período máximo para iniciar a OM.

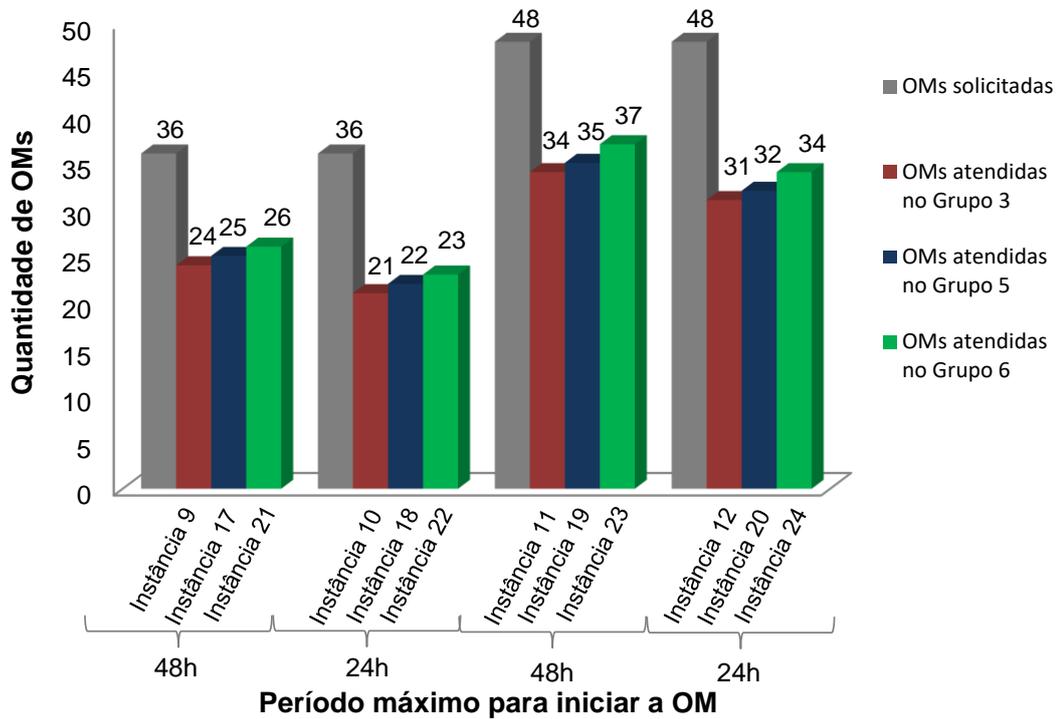
Figura 14 – Comparação entre OMs atendidas dos Grupos 6 e 3



Fonte: Autor.

Como resultado desse grupo de instâncias percebe-se que o aumento da produtividade dos recursos em 20% ocasionou um modesto aumento do número de OMs atendidas. Portanto o esforço de aumentar a produtividade em 20%, seja da máquina de via ou da equipe de manutenção, pode não ser a melhor solução quando se busca aumentar o número de OMs atendidas, dentro do horizonte de planejamento considerado. Para melhor compreensão dos resultados obtidos, na Figura 15 é apresentado o gráfico comparativo das OMs atendidas nas instâncias dos três grupos anteriores, Grupo 3, Grupo 5 e Grupo 6.

Figura 15 – Comparação entre OMs atendidas dos Grupos 3, 5 e 6

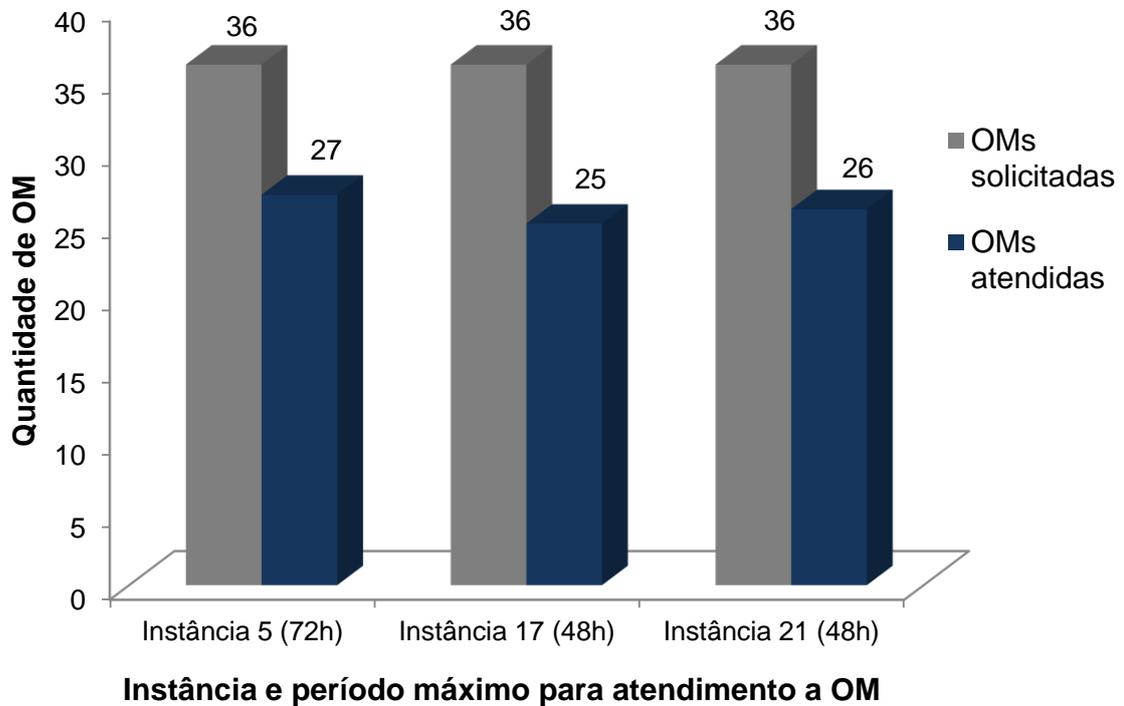


Fonte: Autor.

Ao analisar os resultados obtidos com a comparação entre os três grupos, verifica-se que o aumento da produtividade dos recursos, seja em 10% ou 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.

Ao comparar os resultados obtidos na Instância 5 do Grupo 2 com as Instâncias 17 e 21 dos Grupos 5 e 6, verifica-se que o aumento do período máximo para iniciar a OM causa um maior impacto no número de OMs atendidas do que o aumento na produtividade de manutenção dos recursos. 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. Na Figura 16 é apresentado o gráfico com a comparação entre as OMs atendidas na Instância 5 do Grupo 2 com o número de OMs atendidas nas Instâncias 17 e 21 dos Grupos 5 e 6 respectivamente.

Figura 16 – Comparação entre OMs atendidas das Instâncias 5, 17 e 21



Fonte: Autor.

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, respeitando todas as restrições da ferrovia, podendo servir como uma ferramenta para auxiliar a equipe de manutenção ferroviária no planejamento do atendimento às OMs da superestrutura ferroviária.

7 CONCLUSÕES

Esta dissertação tratou do problema de planejamento das rotas dos recursos ferroviários para atendimento às OMs da superestrutura ferroviária, visando 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. 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.

Para tanto, esta dissertação propôs um modelo matemático que 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); 2) *Capacitated Vehicle Routing Problem with Precedence Constraints* (CVRPPC); 3) *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP); 4) *Multi-Trip Vehicle Routing Problem* (MTVRP); 5) *Team Orienteering Problem* (TOP); 6) *Site-dependent Vehicle Routing Problem* (SDVRP); 7) *Vehicle Routing Problem with Time Windows*; e 8) *Vehicle Routing Problem with Heterogenous Fleet*. O modelo matemático proposto foi executado no solver CPLEX 12.10 e os dados levantados para o desenvolvimento do modelo matemático foram baseados em informação adquiridas com a equipe de manutenção da EFVM na empresa VALE.

Com a realização da revisão da literatura foi possível perceber a carência de estudos sobre o planejamento das rotas dos recursos ferroviários para auxiliar nas manutenções da via permanente. Assim, entende-se que esta nova abordagem contribui para futuros estudos no meio científico sobre manutenção da superestrutura ferroviária.

O CPLEX rodando o modelo matemático proposto encontrou soluções para todas as instâncias testadas. Quanto ao tempo de execução do processamento, verificou-se que para a maioria das instâncias a execução foi realizada com GAPs inferiores a

10%. Os resultados encontrados nas instâncias testadas foram satisfatórios obedecendo todas as restrições impostas no problema, mostrando que o modelo matemático atendeu seu objetivo de maneira eficaz.

Com os resultados obtidos nas instâncias testadas, 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 início 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.

Por fim, propõe-se como trabalho futuro e complemento desta pesquisa, a análise do modelo matemático com uma função multiobjectivo e a elaboração de uma meta-heurística para o modelo matemático proposto, a fim de reduzir os tempos de execução e resolver instâncias maiores. Outro trabalho futuro possível é a análise econômica financeira da aquisição de novos recursos.

REFERÊNCIAS

- Afifi, S., Dang D., & Moukrim, A. (2013). *A simulated annealing algorithm for the vehicle routing problem with time Windows and synchronization constraints. Learning and intelligent optimization.* (pp. 259-265). Springer.
- Amaya, C. A., Langevin, A. A., & Trépanier, M. M. (2007). *The capacitated arc routing problem with refill points. Operations Research Letters, 35(1), 45–53.* <https://doi.org/10.1016/j.orl.2005.12.009>
- Amaya, C. A., Langevin, A. A., & Trépanier, M. M. (2010). *A heuristic method for the capacitated arc routing problem with refill points and multiple loads. Journal of the Operational Research Society, 61(7), 1095–1103.* <https://doi.org/10.1057/jors.2009.58>
- ANTF – Agência Nacional dos Transportadores Ferroviários (2019). Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/> Acessado em: 10 de setembro de 2019.
- ANTT - **Agência Nacional de Transportes Terrestres** (2019a). Disponível em: <http://www.antt.gov.br/> Acessado em: 10 de setembro de 2019.
- ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres (2019b). **Caderno de Engenharia.** Brasília, DF, 2017. 1ª Edição, volume 1, 166 p.
- ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres (2019c). **Manual de Custos Referências Ferroviários: Metodologia e Conceitos.** Brasília, DF, 2019. 1ª Edição, volume 1, 70 p.
- Aritua, B. (2019). *The Rail Freight Challenge for Emerging Economies: How to Regain Modal Share. In The Rail Freight Challenge for Emerging Economies: How to Regain Modal Share.* <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1381-8>
- Bélangier, N., Desaulniers, G., Soumis, F., & Desrosiers, J. (2006). *Periodic airline fleet assignment with time windows, spacing constraints, and time dependent revenues. European Journal of Operational Research, 175(3), 1754–1766.* <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.051>
- Bettinelli, A., Ceselli, A., & Righini, G. (2011). *A branch-and-cut-and-price algorithm for the multi-depot heterogeneous vehicle routing problem with time windows. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 19(5), 723–740.* <https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.07.008>

- Bertels, S., & Fahle, T. (2006). *A hybrid setup for a hybrid scenario: Combining heuristics for the home health care problem*. **Computers and Operations Research**, 33(10), 2866–2890. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.01.015>
- Bredström, D., & Rönnqvist, M. (2007). *A branch and price algorithm for the combined vehicle routing and scheduling problem with synchronization constraints*. **Technical report**. Norwegian School of Economics and Business Administration, Department of Finance and Management Science.
- Bredström, D., & Rönnqvist, M. (2008). *Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints*. **European Journal of Operational Research**, 191(1), 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.07.033>
- Boğ, S., Nemani, A. K., & Ahuja, R. K. (2011). *Iterative algorithms for the curfew planning problem*. **Journal of the Operational Research Society**, 62(4), 593–607. <https://doi.org/10.1057/jors.2010.1>
- Borraz-sánchez, C., & Klabjan, D. (2012). *Strategic Gang Scheduling for Railroad Maintenance*. **Center for the Commercialization of Innovative Transportation Technologies (CCITT)**. *Northwestern Engineering*. Disponível em: <http://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/INFORMS/e52cec4c-eedb-4c3b-a379-8408d89f8fc9/UploadedImages/SP2011_RMSP-Extended%20Abstract%20-%20Borraz-Sanchez.pdf> Acesso em: 20 de janeiro de 2020.
- Carvalhaes, B. B., de Alvarenga Rosa, R., Márcio de Almeida, D. A., & Ribeiro, G. M. (2017). *A method to measure the eco-efficiency of diesel locomotive*. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, 51, 29-42.
- Cattaruzza, D., Absi, N., & Feillet, D. (2018). *Vehicle routing problems with multiple trips*. **Annals of Operations Research**, 271(1), 127–159. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2988-7>
- Dohn, A., Kolind, E., & Clausen, J. (2009). *The manpower allocation problem with time windows and job-teaming constraints: A branch-and-price approach*. **Computers and Operations Research**, 36(4), 1145–1157. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.12.011>

- Dohn, A., Rasmussen, M. S., & Larsen, J. (2011). *The vehicle routing problem with time Windows and temporal dependencies*. **Networks**, 58, 273–289. <https://doi.org/10.1002/net.20472>
- Drexler, M. (2012). *Synchronization in Vehicle Routing—A Survey of VRPs with Multiple Synchronization Constraints*. **Transportation Science**, 46(3), 297–316. <https://doi.org/10.1287/trsc.1110.0400>
- Eveborn, P., Flisberg, P., & Rönnqvist, M. (2006). *Laps Care—an operational system for staff planning of home care*. **European Journal of Operational Research**, 171(3), 962–976. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.01.011>
- Famurewa, S. M., Xin, T., Rantatalo, M., & Kumar, U. (2015). *Optimisation of maintenance track possession time: A tamping case study*. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, 229(1), 12–22. <https://doi.org/10.1177/0954409713495667>
- Guler, H. (2016). *Optimisation of railway track maintenance and renewal works by genetic algorithms*. **Gradjevinar**, 68(12), 979–993. <https://doi.org/10.14256/JCE.1458.2015>
- Higgins, A., Ferreira, L., & Lake, M. (1999). *Scheduling Rail Track Maintenance to Minimise Overall Delays*. **Transportation and Traffic Theory**, 779–796. <http://eprints.qut.edu.au/2417>
- IBM - IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.10. (2020). **Using logical constraints**. Disponível em: < <https://www.ibm.com/support/pages/downloading-ibm-ilog-cplex-optimization-studio-v12100> >. Acesso em: 17 nov. 2020.
- Khajehhei, H., Ahmadi, A., Soleimanmeigouni, I., & Nissen, A. (2019). *Allocation of effective maintenance limit for railway track geometry*. **Structure and Infrastructure Engineering**, 15(12), 1597–1612. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1629464>
- Kim, B. I., Koo, J., & Park, J. (2010). *The combined manpower-vehicle routing problem for multi-staged services*. **Expert Systems with Applications**, 37(12), 8424–8431. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.05.036>
- Labadie, N., Prins, C., & Yang, Y. (2014). **Iterated Local Search for a Vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints**. (June), 257–263. <https://doi.org/10.5220/0004837502570263>

- Letchford, a. N.; salazar-gonzalez. J. J. (2019). *The Capacitated Vehicle Routing Problem: Stronger bounds in pseudo-polynomial time*. **European Journal of Operational Research**, v. 272, p. 24-31.
- Li, Y., Lim, A., & Rodrigues, B. (2005). *Manpower allocation with time windows and job-teaming constraints*. **Naval Research Logistics**, 52(4), 302–311. <https://doi.org/10.1002/nav.20075>
- Lidén, T., & Joborn, M. (2016). Dimensioning windows for railway infrastructure maintenance: Cost efficiency versus traffic impact. **Journal of Rail Transport Planning and Management**, 6(1), 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.03.002>
- Lidén, T., & Joborn, M. (2017). *An optimization model for integrated planning of railway traffic and network maintenance*. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, 74, 327–347. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.11.016>
- Lidén, T., Kalinowski, T., & Waterer, H. (2018). *Resource considerations for integrated planning of railway traffic and maintenance windows*. **Journal of Rail Transport Planning and Management**, 8(1), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2018.02.001>
- Liu, R., Tao, Y., & Xie, X. (2019). *An adaptive large neighborhood search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and synchronized visits*. **Computers and Operations Research**, 101, 250–262. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.08.002>
- López-Aguilar, E., Boyer, V., Salazar-Aguilar, M. A., & Sbihi, M. (2018). *Linear Formulations for the Vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints*. **Journal of Computer and Systems Sciences International**, 57(3), 453–462. <https://doi.org/10.1134/S106423071803005X>
- Montoya-Torres, J. et al. (2015). *A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots*. **Computers & Industrial Engineering**, v. 79, p. 115-129.
- Nemani, A. K., Bog, S., & Ahuja, R. K. (2010). *Solving the curfew planning problem*. **Transportation Science**, 44(4), 506–523. <https://doi.org/10.1287/trsc.1100.0323>
- Nicola, D; Vetschera, R.; Dragomir, A. (2019). *Total distance approximations for routing solutions*. **Computers and Operations Research**, v. 102, p. 67-74.
- Peng, Fan. (2011). *Scheduling of track inspection and maintenance activities in railroad networks*. **PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign**. p. 01 -

171. Disponível em: <<https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/24517>> Acesso em: 20 de jan. de 2020.

Peng, F., & Ouyang, Y. (2012). *Track maintenance production team scheduling in railroad networks*. **Transportation Research Part B: Methodological**, 46(10), 1474–1488. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2012.07.004>.

Petrobrás (2020). **Composição de preço do diesel**. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/precos-de-venda-as-distribuidoras/gasolina-e-diesel/>>. Acesso em: 20 de jan. de 2020.

Plasser & Theurer (2015). **Plasser do Brasil**. Disponível em: <<https://www.plasser.com.br/pt/maquinas-sistemas/socadora-dinamica-expressa-09-4x-e3.html>>. Acesso em: 10 de jan. de 2020.

Quiroga, L. M., & Schnieder, E. (2010). *A heuristic approach to railway track maintenance scheduling*. **WIT Transactions on the Built Environment**, 114, 687–699. <https://doi.org/10.2495/CR100631>

Rabeh, R., Saïd, K., & Eric, M. (2011). *Collaborative model for planning and scheduling caregivers' activities in homecare*. In **IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)** (Vol. 44). <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01043>

Ramos, T. R. P., Gomes, M. I., & Póvoa, A. P. B. (2020). *Multi-depot vehicle routing problem: a comparative study of alternative formulations*. **International Journal of Logistics Research and Applications**, 23(2), 103–120. <https://doi.org/10.1080/13675567.2019.1630374>

Redjem, R., Kharraja, S., Xie, X., & Marcon, E. (2012). *Routing and scheduling of caregivers in home health care with synchronized visits*. **9th International Conference of Modeling, Optimization and Simulation**.

Redjem, R., & Marcon, E. (2016). *Operations management in the home care services: a heuristic for the caregivers' routing problem*. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, 28(1–2), 280–303. <https://doi.org/10.1007/s10696-015-9220-8>

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

- Salazar-Aguilar, M. A., Langevin, A., & Laporte, G. (2013). *The synchronized arc and node routing problem: Application to road marking*. **Computers and Operations Research**, 40(7), 1708–1715. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.01.007>
- Salazar-Aguilar, M. A., Langevin, A., & Laporte, G. (2012). *Synchronized arc routing for snow plowing operations*. **Computers and Operations Research**, 39(7), 1432–1440. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.08.014>
- Santos, R., Fonseca Teixeira, P., & Pais Antunes, A. (2015). *Planning and scheduling efficient heavy rail track maintenance through a Decision Rules Model*. **Research in Transportation Economics**, 54, 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2015.10.022>
- Sarasola, B., & Doerner, K. F. (2020). *Adaptive large neighborhood search for the vehicle routing problem with synchronization constraints at the delivery location*. **Networks**, 75(1), 64–85. <https://doi.org/10.1002/net.21905>
- Sedighizadeh, D. e Mazaheripour, H. (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**, 57, 2225-2239. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.09.006>
- Su, Z., & Schutter, B. De. (2018). *Optimal scheduling of track maintenance activities for railway networks*. **IFAC-PapersOnLine**, 51(9), 386–391. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.07.063>
- TRACHANATZI D., TSAKIRAKIS E., MARINAKI M., MARINAKIS Y., MATSATSINIS N. (2019) *A Memetic Algorithm for the Team Orienteering Problem*. In: Moscato P., de Vries N. (eds) **Business and Consumer Analytics: New Ideas**. Springer, 609-635. https://doi.org/10.1007/978-3-030-06222-4_14
- TOTH, P., VIGO, D. (2014). **Vehicle Routing Problems, Methods and Applications**. *Monographs on Discrete mathematics and Applications*. Segunda Edição, SIAM, Philadelphia, PA, pp 01 -467.
- VALE. **Manual técnico da via permanente**. Vale S.A., 2009. 362 p.
- Viamob (2020). **Viamob Engenharia**. Disponível em: <http://www.viamob.com.br/locacao-de-equipamentos/>. Acesso em: 10 de maio de 2020.

Zare-Reisabadi, E., & Hamid Mirmohammadi, S. (2015). *Site dependent vehicle routing problem with soft time window: Modeling and solution approach*. **Computers and Industrial Engineering**, 90, 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.09.002>

APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DOS RECURSOS FERROVIÁRIOS

Carro Ultrassom

Este veículo executa a inspeção do trilho, visando identificar os defeitos e imperfeições difíceis de serem detectados na parte interna no trilho como, por exemplo, trincas, fissuras, porosidades e etc., para que possa ser feita a retirada ou reparação do trilho com defeitos com antecedência para não prejudicar a operação da via.

Figura 17 – Carro ultrassom



Fonte: Rodrigo e Ribeiro (2016).

Carro Controle

O carro controle atua na prevenção de acidentes e tem como função principal realizar a medição dos parâmetros geométricos da linha férrea, para identificar defeitos como empeno, alinhamento, nivelamento, e perfil de trilho, permitindo que as manutenções sejam programadas com antecedência, evitando a ocorrência de acidentes e conseqüentemente elevando a segurança operacional da ferrovia.

Figura 18 – Carro controle



Fonte: Rodrigo e Ribeiro (2016).

Máquina Esmerilhadora de Trilho

Esta máquina realiza o esmerilhamento dos trilhos, para manter a superfície de rolamento de acordo com os padrões de segurança operacional e eliminando os defeitos superficiais do trilho, como as deformações, trincas superficiais, desgaste e marca de patinação, adequando a superfície de rolamento dos boletos e conseqüentemente melhorando o rolamento do contato da roda com o trilho entre o trem e a superfície do boleto.

Figura 19 – Máquina esmerilhadora de trilho



Fonte: Vale (2019).

Máquina Reguladora de Lastro

Dentre as suas funções esta máquina regulariza o lastro da linha, mantendo suas características geométricas iniciais de ombro e inclinação de talude. Também fazem um trabalho complementar ao da socadora, alinhando o lastro após a realização da socaria. Com os trilhos e lastros ordenados conforme orientações técnicas, a geometria da via permanente garantirá a confiabilidade necessária para as composições férreas circularem com segurança.

Figura 20 – Máquina reguladora de lastro



Fonte: Plasser & Theurer (2015).

Máquina Socadora

A socadora tem como principal função realizar a correção geométrica da via, mantendo o nivelamento e o alinhamento dos trilhos de acordo com os padrões definidos pelo departamento de engenharia da empresa operante. A correção geométrica é feita através do processo de compactação do lastro e alinhamento da linha férrea, objetivando manter a geometria da linha de acordo com os parâmetros de segurança operacional.

Figura 21 – Máquina socadora de lastro



Fonte: Plasser &Theurer (2015).

Máquina Socadora de Chave

Esta máquina funciona como a socadora de lastro, mantendo o alinhamento e nivelamento da via de acordo com os parâmetros de segurança operacional, porém são específicas para atuarem nos Aparelhos de Mudança de Via (AMV's).

Figura 22 – Máquina socadora de chave



Fonte: Rodrigo e Ribeiro (2016).

Máquina Desguarnecedora de Lastro

A principal função desta máquina é realizar o desguarnecimento de lastro, ou seja, a retirada do lastro objetivando a sua descontaminação por minério de ferro e a recuperação de suas características físico-mecânicas ideais para via. Após a retirada do lastro, aqueles que estão com a granulometria dentro do padrão exigidos na norma são devolvidos para via, e em seguida ocorre o processo de socaria do lastro, tudo objetivando manter a geometria da linha e atender aos padrões de segurança operacional.

Figura 23 – Máquina desguarnecedora de lastro



Fonte: Rodrigo e Ribeiro (2016).

Máquina Multifunção (Socadora e Reguladora)

Como o próprio nome sugere, esta máquina realiza o processo de socaria, nivelamento, alinhamento da linha e dos aparelhos de mudança de via (AMV's) e também tem a função de regularizar a ombreira de lastro.

Figura 24 – Máquina multifunção (socadora e desguarnecedora)



Fonte: Rodrigo e Ribeiro (2016).

Máquina Reperfiladora de Trilhos

A reperfiladora de trilhos realiza o trabalho que a esmerilhadora de trilho não consegue atingir, eliminando os defeitos superficiais que não foram retirados pela esmerilhadora, mantendo a geometria da linha e garantindo a segurança operacional da via.

Figura 25 – Máquina reperfiladora de trilhos



Fonte: Plasser & Theurer (2015).

Equipe de apoio à máquina de via

As atividades exercidas pelas máquinas de via demandam o apoio de profissionais especializados em manutenção ferroviária. Esses profissionais atuam no suporte às máquinas durante o período de operação da manutenção. O suporte exercido pela equipe tem como objetivo fortalecer os trabalhos voltados à segurança operacional e garantir que a operação da máquina de via ocorra de maneira satisfatória e eficiente.

Figura 26 – Equipe de apoio a máquina via



Fonte: Plasser & Theurer (2015).

Equipe de manutenção manual

A manutenção ferroviária conta com a ajuda de profissionais especializados que, com o auxílio de diversos equipamentos manuais, executam serviços como a substituição de acessórios de fixação (grampos, pregos e tirefon), soldagem aluminotérmica, lubrificação de peças diversas, entre outros. Os serviços realizados por esses profissionais visam eliminar ou reparar as anomalias encontradas na superestrutura ferroviária.

Figura 27– Equipe de manutenção manual da superestrutura



Fonte: Plasser & Theurer (2015).

Veículo de apoio à manutenção

Os veículos de apoio à manutenção são veículos aptos a trafegar tanto em rodovia quanto em ferrovia, facilitando o transporte de material e equipamentos para a manutenção da via permanente, principalmente em locais onde não é possível o acesso de veículos comum. Dentre os veículos de apoio à manutenção podemos citar para esta pesquisa o caminhão rodoferroviário que tem a finalidade de transportar funcionários, equipamentos e cargas para auxílio da manutenção ferroviária.

Figura 28 – Caminhão rodoferroviário



Fonte: Viamob Engenharia (2020).