

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

DIESTHER CAMPOS MOREIRA SILVARES

**PLANEJAMENTO DAS ROTAS DOS LOTES DE VAGÕES EM PÁTIOS  
FERROVIÁRIOS VISANDO A REDUÇÃO DO TEMPO TOTAL DE ESTADIA**

VITÓRIA  
2021

DIESTHER CAMPOS MOREIRA SILVARES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**PLANEJAMENTO DAS ROTAS DOS LOTES DE VAGÕES EM PÁTIOS  
FERROVIÁRIOS VISANDO A REDUÇÃO DO TEMPO TOTAL DE ESTADIA**

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

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

VITÓRIA  
2021

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

---

C198p Campos Moreira Silves, Diesther, 1981-  
PLANEJAMENTO DAS ROTAS DOS LOTES DE  
VAGÕES EM PÁTIOS FERROVIÁRIOS VISANDO A REDUÇÃO  
DO TEMPO TOTAL DE ESTADIA / Diesther Campos Moreira  
Silves. - 2021.  
89 f. : il.

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

1. Ferrovia. 2. Pesquisa Operacional. 3. Planejamento de Rotas. 4. Vagões. I. de Alvarenga Rosa, Rodrigo. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**Planejamento das Rotas dos Lotes de Vagões em Pátios Ferroviários Visando a Redução do Tempo Total de Estadia**

**Diesther Campos Moreira Silves**

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

Aprovada no dia **24 de março** por:

---

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

---

Prof. Dr. Élcio Cassimiro Alves  
Doutor em Engenharia e Tecnologia Espaciais  
Examinador Interno– UFES

---

Prof. Dr. Luciano Lessa Lorenzoni  
Doutor em Engenharia Elétrica  
Examinador Externo - IFES

Vitória - ES, março de 2021

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e a minha corrente espiritual por me guiar e fortalecer ao longo da jornada.

Ao meu esposo Gleydson por me apoiar e entender minha ausência.

Ao professor Rodrigo por me orientar com tanta dedicação, entender minhas fraquezas e limitações e principalmente por extrair de mim o meu melhor como aluna, contribuindo para o meu crescimento acadêmico.

A amiga Daniela por me apoiar e ajudar com sua experiência acadêmica.

E pôr fim aos colegas de mestrado e aos professores do programa por todos os momentos juntos.

A meu Pai Edmundo, de longe foi a pessoa que mais me incentivou a estudar em toda minha trajetória estudantil e me ensinou que conhecimento é a única coisa da vida que ninguém é capaz de nos roubar.

“Tudo vale a pena quando a alma não é  
pequena.”

Fernando Pessoa

## RESUMO

Dentro da cadeia de suprimentos o transporte representa um elo importante para a competitividade empresarial. O modo ferroviário tem se destacado pela sua competitividade no que tange a custo de transporte e volume transportado. Os pátios de manobra ferroviária desempenham um papel importante dentro do modo ferroviário sendo que as atividades de deslocamento dos lotes dentro do pátio podem levar cerca de 10% a 50% do tempo total de trânsito dos trens em uma ferrovia. Desta forma, os Pátios ferroviários destacam-se por sua complexidade e são os maiores gargalos da operação. O planejamento de atividades em pátio ferroviário com alocação de recursos tem como objetivo reduzir o tempo de estadia do lote de vagões e fazer uso dos recursos da melhor maneira possível. Para planejar as atividades do pátio visando reduzir o tempo de estadia dos vagões essa dissertação propõe um modelo matemático inspirado no *Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem* (MRCPSP). O MRCPSP atua no sequenciamento de atividades levando em consideração a restrição de alocação de recursos, de forma a minimizar o tempo entre o início e o fim destas atividades. Para validar o modelo, foram testados os dados reais do Pátio de Tubarão utilizando o CPLEX 12.8 para executar o modelo. O modelo se mostrou eficiente em planejar as atividades do pátio, reduzindo o tempo de estadia dos lotes. Também foi possível identificar os gargalos e equipamentos e rotas críticas para a manutenção.

Palavras Chave: Recursos, MRCPSP, Pátios Ferroviários e Vagões.

## **ABSTRACT**

Within the supply chain, transportation represents an important link for business competitiveness. The railway mode has stood out for its competitiveness in terms of transport cost and volume transported. Railway maneuvering yards play an important role within the railway mode, and maneuvering activities can take about 10% to 50% of the total transit time of trains on a railroad. In this way, the railway yards stand out for their complexity and are the biggest bottlenecks in the operation. The planning of activities in a railway yard with resource allocation aims to reduce the length of stay of the wagon lot and make the best use of resources. To plan the yard activities, a mathematical model inspired by the Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem (MRCPSP) was developed. The MRCPSP acts in the sequencing of activities taking into account the restriction of resource allocation, in order to minimize the time between the beginning and the end of these activities. The model proved to be efficient in planning the activities of the yard, reducing the length of stay of the lots. It was also possible to identify bottlenecks and equipment and critical routes for maintenance.

**Key Words:** Resources, MRCPSP, Flat Yards and Wagons.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- ROTA 1- TRECHO T1 ATÉ ED01 .....	15
FIGURA 2 - ROTA 2 - TRECHO T1 ATÉ ED02 .....	15
FIGURA 3 - PÁTIO DE MANOBRA PROGRESSIVO .....	20
FIGURA 4 - CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS RCPSP .....	21
FIGURA 5 - MAPA PÁTIO FERROVIÁRIO DE TUBARÃO.....	39
FIGURA 6 - EXEMPLO DE ROTA .....	41
FIGURA 7: GRÁFICO GANTT INSTÂNCIA 1 .....	54
FIGURA 8 – GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 2 .....	54
FIGURA 9 -GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 3 .....	55
FIGURA 10 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 4 .....	56
FIGURA 11 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 5 .....	56
FIGURA 12 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 6 .....	57
FIGURA 13 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 7 .....	58
FIGURA 14 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 8 .....	59
FIGURA 15 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 17 .....	60
FIGURA 16 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 18 .....	61
FIGURA 17 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 19 .....	61
FIGURA 18 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 20 .....	62
FIGURA 19 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 21 .....	62
FIGURA 20 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 22 .....	63
FIGURA 21 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 23 .....	64
FIGURA 22 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 24 .....	65
FIGURA 23 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 29 .....	66
FIGURA 24 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 30 .....	67
FIGURA 25 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 31 .....	68
FIGURA 26 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 32 .....	69
FIGURA 27 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 33 .....	70
FIGURA 28 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 34 .....	70
FIGURA 29 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 36 .....	72
FIGURA 30 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 37 .....	72
FIGURA 31 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 38 .....	73
FIGURA 32 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 39 .....	74

FIGURA 33 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 40 .....	75
FIGURA 34 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 41 .....	75
FIGURA 35 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 42 .....	76
FIGURA 36 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 43 .....	77
FIGURA 37 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 44 .....	78
FIGURA 38 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 45 .....	79
FIGURA 39 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 46 .....	79
FIGURA 40 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 47 .....	80
FIGURA 41 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 48 .....	81
FIGURA 42 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 49 .....	81
FIGURA 43 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 50 .....	83
FIGURA 44 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 9 .....	91
FIGURA 45 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 10 .....	92
FIGURA 46 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 11 .....	93
FIGURA 47 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 12 .....	94
FIGURA 48 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 13 .....	95
FIGURA 49 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 14 .....	96
FIGURA 50 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 15 .....	97
FIGURA 51 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 16 .....	98
FIGURA 52 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 25 .....	99
FIGURA 53 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 26 .....	100
FIGURA 54 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 27 .....	101
FIGURA 55 - GRÁFICO DE GANTT INSTÂNCIA 28 .....	102

## **LISTA DE TABELAS**

TABELA 1 - RESUMOS DOS ARTIGOS REFERENTES AO USO DE PESQUISA OPERACIONAL EM FERROVIA.....	32
TABELA 2: INSTÂNCIAS .....	43
TABELA 3: QUANTIDADE DE VARIÁVEIS DE DECISÃO DO MODELO .....	50
TABELA 4 - RESULTADOS .....	52

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS .....	17
1.1.1	<b>OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>17</b>
1.1.2	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>17</b>
1.2	JUSTIFICATIVA .....	17
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	18
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>19</b>
2.1	PÁTIOS FERROVIÁRIOS .....	19
2.2	MULTI-MODE RESOURCE CONSTRAINED PROJECT SCHEDULING PROBLEM (MRCPSP) .....	21
2.3	REVISÃO DA LITERATURA SOBRE SEQUENCIAMENTO DE ATIVIDADES EM PÁTIOS FERROVIÁRIOS .....	23
2.4	REVISÃO DA LITERATURA MULTI-MODE RESOURCE CONSTRAINED PROJECT SCHEDULING PROBLEM (MRCPSP) .....	33
<b>3</b>	<b>PROBLEMA ESTUDADO E GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS PRELIMINARES</b> .....	<b>38</b>
3.1	ELABORAÇÃO DE INSTÂNCIAS .....	41
<b>4</b>	<b>MODELO MATEMÁTICO</b> .....	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES PRELIMINARES</b> .....	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>84</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>86</b>
	<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>91</b>
	<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>92</b>
	<b>APÊNDICE C</b> .....	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE D</b> .....	<b>94</b>
	<b>APÊNDICE E</b> .....	<b>95</b>

<b>APÊNDICE F.....</b>	<b>96</b>
<b>APÊNDICE G.....</b>	<b>97</b>
<b>APÊNDICE H.....</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICE I.....</b>	<b>99</b>
<b>APÊNDICE J.....</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE K.....</b>	<b>101</b>
<b>APÊNDICE L.....</b>	<b>102</b>

# 1 INTRODUÇÃO

As ferrovias de cargas ampliaram significativamente o volume transportado, que atingiu o recorde de 569 milhões de toneladas úteis em 2018, representando um aumento de 125% desde 1997 (ANTF, 2019). Em uma operação ferroviária os pátios de manobra desempenham um papel de grande importância pois as atividades de manobra, que são todos os movimentos do material rodante de uma posição do pátio para outra posição desse pátio, podem levar cerca de 10% a 50% do tempo total de trânsito dos trens em uma ferrovia. Esses números mostram que estudos voltados para redução do tempo de permanência dos trens em pátios ferroviários podem resultar em uma redução significativa de custos e ganhos de produtividade e eficiência no modo ferroviário (BOYSEN *et al.*, 2012). Os pátios ferroviários destacam-se por sua complexidade e são importantes gargalos de operação. Estima-se que 40% da frota esteja parada em pátios. O material rodante (que são os veículos ferroviários que circulam na ferrovia, *e.g.*, vagões, locomotivas, máquinas de via, dentre outros), sobretudo, os vagões, passam cerca de metade de sua vida útil em pátios ferroviários (ROSA, 2016).

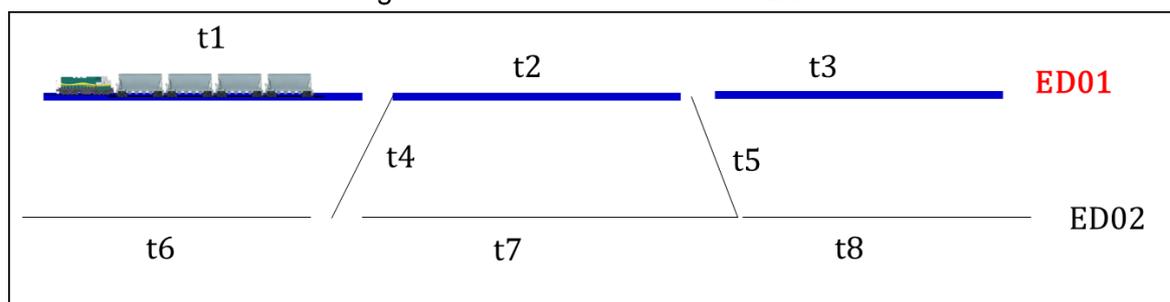
A operação de uma ferrovia é dividida em Circulação e Pátios/Terminais. A circulação se refere a viagem do trem ao longo da via permanente. Desde o momento que o trem sai de um pátio ferroviário até chegar em outro pátio. Os pátios e terminais são os locais onde ocorrem os processos de formação e desmembramento de trens, carga e descarga de vagões. Eles podem ser classificados em função das atividades em que são executadas, podendo ser: pátios de manobras, terminais, pátios de triagem, pátios de intercâmbio e pátios de oficina. Os pátios de manobra são destinados a realizar todos os tipos de manobras. Eles são compostos por um conjunto de linhas férreas conectadas por Aparelhos de Mudança de Via (AMV) (que é um equipamento que movimenta o trecho de linha, mudando sua direção, permitindo o trem mudar de direção na via) (ROSA, 2016). Os pátios de manobra possuem três áreas: recepção, classificação e formação. Na maior parte dos casos, essas três áreas podem compartilhar a mesma área física do pátio. Os terminais são locais destinados a operação de carga e descarga dos vagões. Usualmente, os terminais estão integrados a um pátio de manobra (CRAINIC, 1998).

A área de recepção de um pátio de manobra tem como objetivo receber os trens que estão chegando de viagem, liberando a ferrovia para a circulação dos demais trens. Após chegar de viagem, o trem é desmembrado em lotes, que são compostos por vagões que possuem o mesmo produto, cliente e destino. Os lotes permanecem estacionados em um trecho de linha férrea no pátio de recepção e ficam aguardando a autorização para serem manobrados até o local onde será realizada a atividade de carga ou descarga.

No problema tratado, os vagões são agrupados em lotes (um lote de vagões representa um conjunto de vagões que irão realizar todas as operações em conjunto sem se separar até o descarregamento total no equipamento de descarga). Os lotes são deslocados do pátio de recepção até o local de descarga por meio de uma atividade denominada manobra ferroviária onde percorrem um conjunto de trechos de linha férrea denominados rota. Para cada lote é planejada uma rota específica tomando como base o trecho onde o lote está estacionado e o equipamento de descarga aonde o lote será descarregado. Visando reduzir o tempo de estadia dos lotes (período compreendido entre a chegada do lote no pátio e término da atividade de descarga), deve-se planejar as rotas com menor tempo de deslocamento que o lote deverá percorrer desde o local onde foi estacionado no momento de sua chegada ao pátio ferroviário até o equipamento de descarga, considerando o trecho onde o lote será estacionado no momento de sua chegada e o próprio tempo de descarga que é dependente do equipamento. Ou seja, é necessário planejar o local onde o lote deverá ser estacionado no momento de sua chegada, quais trechos (segmentos de linha férrea compreendidos entre dois aparelhos de mudança de via) o lote irá percorrer para se movimentar do local de estacionamento até o equipamento de descarga e o próprio equipamento de descarga. A Figura 1 exemplifica a rota de um lote, que foi planejado para estacionar no trecho t1, percorrer os trechos t2-t5-t8 e descarregar no equipamento de descarga ED02.

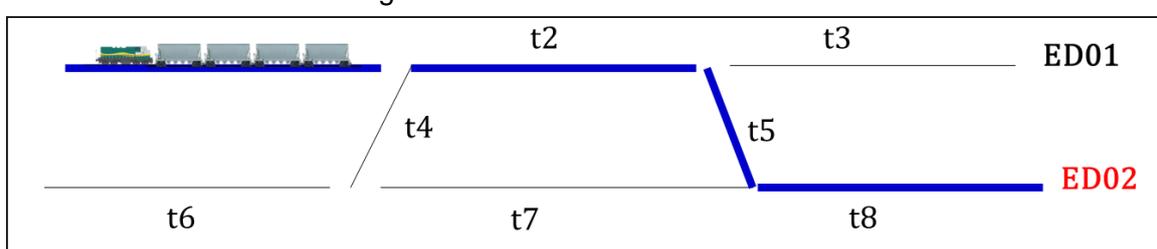
Dessa forma, rotas deverão ser definidas para o deslocamento de um lote no pátio. A Figura 1 e a Figura 2 representam duas possíveis rotas de manobra (t1-t2-t3 e t1-t2-t5-t8) para o lote estacionado no trecho t1 se deslocar até os equipamentos de descarga (ED01 e ED02).

Figura 1- Rota 1- Trecho t1 até ED01



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2 - Rota 2 - Trecho t1 até ED02



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para resolver o problema anteriormente descrito, essa dissertação propõe um modelo matemático inspirado no Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem (MRCPSP) (GEN, CHENG e LIN, 2010). O MRCPSP é uma variação do Resource Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) é um problema de otimização que leva em consideração recursos limitados e atividades com durações e quantidade de recursos determinados, conectados por relações de precedências. Ele realiza o sequenciamento das atividades e aloca os recursos limitados, ou seja, designa alguns recursos para uma determinada atividade de forma que os recursos alocados não excedam a quantidade disponível. (HARTMANN, 1999).

Para adaptar o MRCPSP ao problema estudado, foi considerado que cada projeto representa um lote que será operado no pátio; cada atividade representa um lote se deslocando sobre um trecho ou sendo descarregado no equipamento de descarga, nesse caso virador de vagões VV; cada recurso representa um trecho da ferrovia ou um VV; cada modo representa uma rota (conjunto de trechos e VV); a relação de precedência representa que um lote só pode percorrer um trecho após ter percorrido o trecho anterior na rota. Uma vez que o lote inicie a rota, ele não poderá parar até o seu descarregamento no VV escolhido, ou seja, funciona como MRPSP não

preemptivo. Desta forma, o modelo proposto é inovador, pois pela primeira vez é proposto resolver o problema de planejamento de rotas em pátios ferroviários por meio do MRCPSP e, também, pelo modelo ser capaz de definir o local de estacionamento na chegada e o VV, considerando eventuais restrições de estacionamento do lote em certos trechos do pátio e restrições de descarga do lote em alguns VVs. Para avaliar o modelo matemático proposto, foram utilizados dados do Pátio Ferroviário de Tubarão, pertencente à Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM). Porém, o modelo proposto pode ser aplicado para planejar rotas de descarga de qualquer outro pátio ferroviário com qualquer tipo de layout.

Essa dissertação propõe um modelo matemático para planejar para todos os lotes que chegam a um terminal ferroviário qual a rota que eles devem percorrer desde o trecho da recepção onde estão estacionados até o equipamento de descarga considerando as possíveis rotas entre esses dois pontos visando a minimização da soma do tempo de estadia no terminal de todos os lotes.

Esse trabalho foi apoiado pela EFVM/Vale S.A. e pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), EDITAL FAPES/VALE/FAPERJ Nº 01/2015 - PELOTIZAÇÃO, MEIO AMBIENTE E LOGÍSTICA. Os dados que estão sendo utilizados para realização desta dissertação estão sendo obtidos diretamente da EFVM por meio deste convênio.

Pela revisão bibliográfica realizada, não foram encontrados artigos publicados que tratassem do planejamento de rotas em pátios ferroviários que fosse elaborado com base no MRCPSP. Além disso, o modelo proposto elabora a utilização de cada trecho do pátio ao longo de um horizonte de planejamento, o que também não foi encontrado na literatura até o momento.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação é elaborar um modelo matemático para planejar para todos os lotes que chegam a um terminal ferroviário qual a melhor rota que eles devem percorrer, dentre as possíveis existentes, desde o trecho da recepção onde estão estacionados até o equipamento de descarga, visando a minimização da soma do tempo de estadia de todos os lotes no terminal.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da proposta de dissertação de mestrado são:

- Realizar levantamento dos dados e informações sobre o pátio ferroviário de Tubarão para elaboração e teste do modelo proposto;
- Criar e analisar cenários com variações de demanda de vagões para operar no pátio e analisar os pontos de gargalo de operação;
- Avaliar o impacto no tempo de estadia dos lotes causado pelas atividades de manutenção em trechos e VVs.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O Pátio Ferroviário de Tubarão é responsável por receber toda produção da Vale do sistema sul. Por ele passam em média 35 lotes de minério de ferro por dia. Qualquer melhoria realizada nessa operação de manobra resulta em ganho de produtividade para a Vale.

Segundo Rosa (2016), estima-se que os pátios representem mais da metade do custo construção e operação de uma nova ferrovia. Desta forma, terminais e pátios influenciam diretamente no custo global de uma ferrovia em três pontos principais: investimento de capital, custo operacional e material rodante. Face disso, conclui-se que pequenas melhorias nos processos operacionais dos pátios resultam em ganhos significativos para a operação.

Na literatura científica, encontram-se estudos, inclusive formulações matemáticas, para o planejamento de manobras ferroviárias, contudo de forma mais direcionada para formação de trens, planejamento de recursos sem abordar planejamento de rotas em pátios de manobra. Assim, esta dissertação se justifica por propor a formulação de um novo modelo matemático para planejar rotas, maximizando a utilização de ativos tais como vagões, estrutura física do pátio e equipamentos de descarga, aumentando a eficiência operacional, de forma a proporcionar maior geração de lucro e conseqüentemente a maximização do capital investido.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para atender aos objetivos desta pesquisa, o conteúdo a ser desenvolvido será estruturado em cinco capítulos, incluindo o capítulo presente, composto pelos objetivos, a introdução dessa dissertação, e os demais distribuídos da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta o referencial teórico sobre os conceitos relativos ao problema abordado, descrevendo pátios ferroviários e o *Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem* (MRCPSP), promovendo a revisão de artigos e trabalhos sobre planejamento de atividades em pátios ferroviários e o MRCPSP.

O capítulo 3 exhibe o problema estudado e as Instâncias geradas.

O capítulo 4 constitui o modelo matemático.

O capítulo 5 exhibe os resultados e análises.

Por fim, capítulo 6 que irá apresentar as conclusões, sugestões para trabalhos futuros e as Referências Bibliográficas utilizadas na redação deste documento.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é feito o embasamento teórico dessa dissertação. O primeiro subcapítulo é dedicado aos conceitos de pátio ferroviário, o segundo subcapítulo apresenta o *Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem* (MRCPSP), no terceiro subcapítulo é realizada uma revisão bibliográfica dos artigos que tratam planejamento de pátios ferroviários e por fim quarto subcapítulo é feita uma revisão bibliográfica de diversos artigos da literatura acerca do MRCPSP.

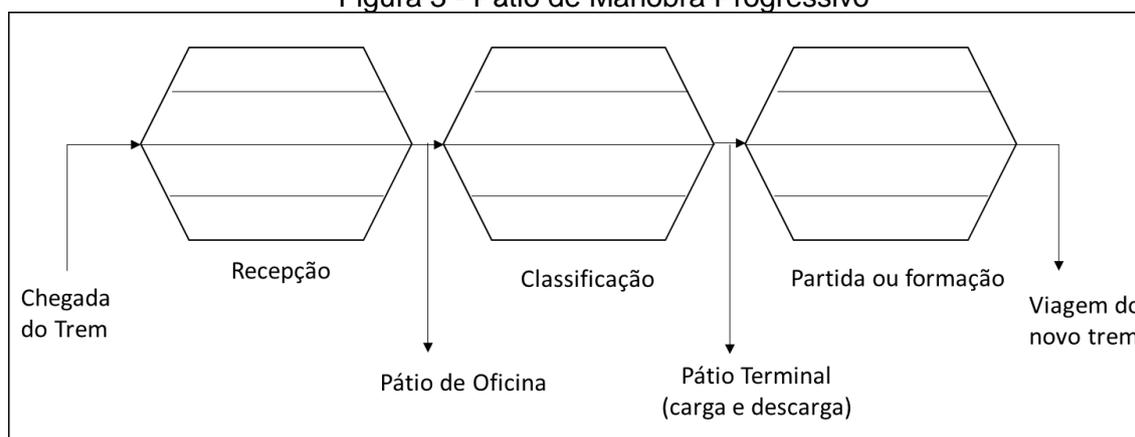
### 2.1 PÁTIOS FERROVIÁRIOS

O pátio ferroviário é o local da ferrovia destinado à realização de manobras, movimentação e atividades de carga e descarga de vagões (BOYSEN *et al.*, 2016). O pátio ferroviário é definido como a área plana composta por um conjunto de trechos, onde o trem é preparado para desmembramento e formação de trens, estacionamento de material rodante, operação de carga e descarga, manutenção do material rodante, dentre outros. Os Terminais ferroviários são locais destinados as atividades de carregamento e descarregamento de produtos, principalmente quando são alocados em locais de grande movimentação de cargas, como regiões de transbordo intermodais e complexos portuários. Nos terminais de cargas diversas estimasse-se que 70% da frota da ferrovia esteja parada realizando alguma operação, em terminais especializados esse número gira em torno de 40% (ROSA, 2016).

A manobra ferroviária é uma das principais atividades realizadas no pátio ferroviário e pode ser descrita como uma atividade que engloba diversas tarefas menores, tais como: movimentação inicial da locomotiva, partindo do local que está em direção ao lote de vagões a serem movimentados; engate de lote de vagões, atividade em que a locomotiva e o lote passam a ficar conectados; transporte desse lote de vagões até o trecho de destino da manobra (podendo ser realizada por meio da locomotiva puxando ou empurrando o lote); e, por fim, o desengate da locomotiva do lote, deixando esse conjunto de vagões estacionados no trecho de destino (SABINO *et al.*, 2010).

Os pátios ferroviários são definidos de acordo com sua função: Pátio de Manobra, Terminal Ferroviário, Pátio de Triagem, Pátio de Oficina e Pátio de Intercâmbio. O pátio de manobra tem como função realizar todo tipo de manobra em material rodante. São compostos por diversos trechos agrupados em feixes que formam subpátios podendo ser classificado em pátio combinado ou progressivo. O pátio combinado tem como principal característica não possuir áreas bem definidas, podendo todos os trechos serem usados para todas as funções. Já os pátios progressivos possuem todas as divisões bem definidas como mostra a Figura 3 Apesar das dificuldades do pátio combinado, a maioria dos pátios brasileiros são combinados (ROSA, 2016).

Figura 3 - Pátio de Manobra Progressivo



Fonte: ROSA (2016, p. 89)

O pátio de manobra pode ser dividido em 3 áreas sendo elas: recepção, classificação e formação. Na recepção o trem é recebido e a locomotiva de viagem é cortada (desengatada) do trem. Os vagões são estacionados e ficam aguardando para ir ao pátio de classificação. O pátio de recepção tem como principal função acomodar os vagões que serão direcionados posteriormente para a manobra e liberar imediatamente a circulação da ferrovia evitando interrupções no tráfego (ROSA, 2016).

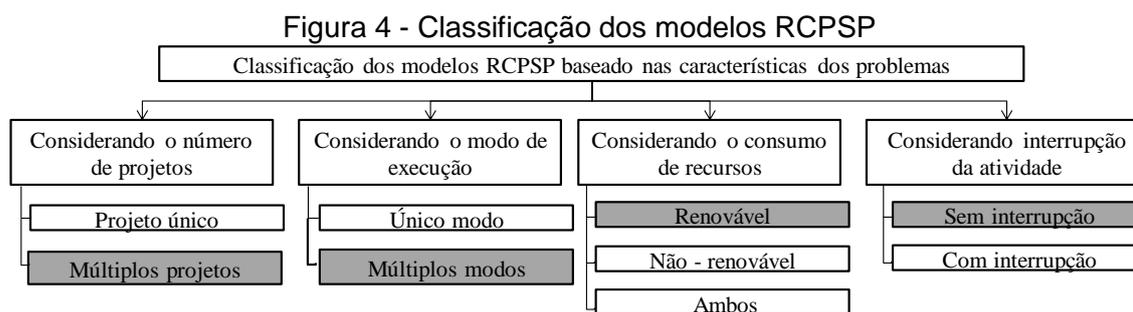
Após chegarem no pátio de recepção os vagões são manobrados até o pátio de classificação e separados em lotes conforme seu destino, cliente e produto. Usualmente o pátio de classificação é o que possui maior quantidade de trechos e cada um deles deve ser destinado exclusivamente a um único lote. Os pátios de

classificação são categorizados em dois tipos sendo eles pátios planos e pátios com *hump yard* (ROSA, 2016).

## 2.2 MULTI-MODE RESOURCE CONSTRAINED PROJECT SCHEDULING PROBLEM (MRCPSP)

O planejamento das atividades em um terminal ferroviário que envolve um conjunto de atividades que se relacionam entre si, pode ser visto como um sequenciamento de atividades. Um dos modelos que pode ser utilizado para realizar esse planejamento é o *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP) (PIMENTA e ROSA, 2017). O RCPSP realiza o sequenciamento de todas as atividades de um determinado projeto, que não podem ser interrompidas, considerando a relação de precedência entre elas. Além disso, ele considera que os recursos utilizados pelas atividades são limitados. Este modelo tem por objetivo minimizar o tempo entre o início e o fim de uma sequência de atividades, chamado *makespan*.

As variações do modelo RCPSP podem ser classificadas, conforme a Figura 4, com base nas características dos problemas, isto é, no número de projetos, no modo de execução, no consumo dos recursos e na possibilidade de interrupção da atividade (GEN, 2010).



Fonte: Adaptado de GEN (2010).

Com base na Figura 4 o RCPSP pode ser classificado de acordo com o número de projetos, os modelos de RCPSP podem ser divididos em dois grupos: (1) projeto único, onde apenas um projeto terá seu processamento planejado no centro produtivo e (2) múltiplos projetos, onde há mais de um projeto a ser processado,

considerando um grupo de recursos único para processamento de todos eles. Com relação ao modo de execução, também existem dois grupos: (1) único modo e (2) múltiplos modos. Nessa última versão, cada atividade pode ser processada de forma diferente e, por isso, com tempos de processamento e necessidade de recursos diferentes.

No que tange o consumo de recursos, conforme apresentado na Figura 4, os modelos matemáticos do RCPSP são divididos em: (1) recursos renováveis, que são aqueles que são limitados em quantidade, mas podem ser utilizados mais de uma vez, (2) recursos não renováveis, que têm sua quantidade limitada para o projeto como um todo e podem ser utilizados uma única vez e (3) ambas as situações, que ocorre quando alguns recursos são renováveis e outros são não renováveis em um mesmo modelo. Por fim, os modelos matemáticos de RCPSP podem ser divididos naqueles em que as (1) atividades só podem ser realizadas sem interrupção ou (2) que as mesmas possam ser interrompidas para que outra atividade seja executada, para que a primeira seja completada posteriormente.

A proposta de dissertação, devido à realidade dos pátios ferroviários, conforme destacado em cinza na Figura 4, utiliza o RCPSP com múltiplos projetos, sendo que cada lote operado no terminal é considerado um projeto. A respeito do modo de execução, o modelo caracteriza-se por múltiplos modos, ou seja, cada lote pode ser manobrado por diversos modos/rotas, demandando recursos diferentes, quantidades diferentes e tempos de processamento diferentes. Especificamente essa variação, possui na bibliografia uma nomenclatura específica: *Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem* (MRCPSP). Com relação aos recursos, eles são renováveis, pois ao fim da atividade ele está disponível para ser utilizado em outro modo/rota. Em uma rota para realizar manobra ferroviária, cada atividade deve ser completamente finalizada após ser iniciada, ou seja, não havendo possibilidade de interrupção das mesmas. O consumo dos recursos utilizados é considerado renovável, pois ao término de uma atividade este pode ser novamente utilizado.

### 2.3 REVISÃO DA LITERATURA SOBRE SEQUENCIAMENTO DE ATIVIDADES EM PÁTIOS FERROVIÁRIOS

A seguir é apresentada uma revisão bibliográfica sobre sequenciamento de atividades em pátios ferroviários e terminais ferroviários. Existem algumas aplicações de modelos matemáticos utilizadas em terminais ferroviários, que, no entanto, não têm por objetivo realizar o planejamento das rotas de manobra em pátios ferroviários mediante os recursos disponíveis fazendo uso do MRCPSP.

Courdeau *et al.* (1998) abordaram em sua revisão bibliográfica os modelos de otimização aplicados à realidade ferroviária. Eles também abordam os modelos relacionados a pátios ferroviários. Porém, o foco do artigo concentrou-se em pátios com *hump yard*, não abrangendo terminais ferroviários tampouco planejamento de rotas.

Blasum *et al.* (1999) propuseram em seu estudo uma aplicação de um modelo de otimização para reduzir a necessidade de manobras para formação de trens, dado a chegada dos trens do dia e que, por sua vez, possuem programação para viajarem no dia seguinte pela manhã, após o posicionamento em uma área de transbordo de carga.

Dahlhaus *et al.* (2000) abordam a necessidade de linhas para classificação de vagões, em um pátio com *hump yard*, com base na chegada de trens, formação de novas composições e, sobretudo, quantidade de clientes.

Winter e Zimmermann (2000) abordaram em seus estudos a redução do tempo de formação e liberação de trens, minimizando as movimentações de manobra dentre outros objetivos.

He *et al.* (2000) desenvolveram um controle e formação de trens por meio de um modelo de despacho (*fuzzy dispatching model*) e um algoritmo genético para auxiliar a coordenação da liberação de trens, levando em conta a maximização da saída de trens do pátio e a aderência ao horário de formação e liberação dos trens planejados. Ainda com base no referido estudo, identificou-se que não foram abordados planejamento de rotas.

He *et al.* (2003) desenvolveram em sua pesquisa um modelo matemático aplicado inicialmente a um pátio simplificado, com um *hump yard*, uma locomotiva de manobra e uma máquina de chave. Ainda assim, não abordaram a realização de manobra de triagem em pátios planos, bem como, a interface com processos de carregamento e descarregamento de vagões.

Reis Junior e Lopes (2003) desenvolveram um otimizador para manobras ferroviárias, utilizando algoritmos *branch & bound* em arquitetura paralela visando a otimização do cumprimento das manobras do pátio ferroviário, tendo por base a movimentação de vagões por meio de locomotivas em linhas ferroviárias e chaves (aparelhos que interligam as linhas). Utilizando o entendimento de um pátio ferroviário como um grafo não direcionado  $G = (X, U)$ , o modelo utiliza aplicação do algoritmo do menor caminho para realizar a manobra com a locomotiva de forma a realizar o percurso em menor tempo, compara este tempo obtido dentre as diversas locomotivas disponíveis no pátio para escolher a que realizaria a atividade de forma mais rápida. Por fim, diante do problema de alocação de locomotivas para as diversas manobras e diversas locomotivas disponíveis, utiliza o algoritmo *branch & bound* para realizar o melhor plano de alocação dos recursos locomotiva para realizar as manobras necessárias. Os autores deste trabalho não abarcaram o planejamento de rotas.

Riezebos e Wezel (2009) desenvolveram um algoritmo de suporte as decisões de programação de manobras dos controladores de pátio para auxiliar na busca de melhores alternativas de manobras de formação de trens em pátios de manobra planos. No entanto, o pátio simulado por eles trata de manobras de vagões com autopropulsão (não utilizam locomotiva para realizar essas atividades) de transporte de passageiros (não possuem terminais de carregamento e descarregamento de vagões). Um dos principais focos desse artigo foi diminuir o tempo ocioso em situações que a manobra muda de direção, em que o operador precisa, no exemplo estudado, descer do vagão que está para ir para o último vagão da composição para, então, reiniciar o movimento em sentido contrário (situação essa não aplicável em manobras de vagões de carga e pátios destinados a esse fim).

Taffner (2009) propôs um modelo baseado na Administração da Produção e na Teoria da Programação para a resolução da programação de um terminal ferroviário

de granel agrícola e de fertilizante utilizando um software de programação da produção, o *Preactor*, que define programação como o processo de criar uma sequência de operações, com um número limitado de recursos. Este modelo não considera a possibilidade de as atividades serem realizadas em *múltiplos modos*, sendo necessárias várias adaptações para tornar possível a aplicação ao modelo de terminal, o que o torna pouco aplicável à realidade prática de pátios ferroviários.

D'Ariano *et al.* (2007) aplicaram um algoritmo *branch and bound* para planejar o sequenciamento de circulação de trens em um trecho de ferrovia singela (trecho de via único, não duplicado) quando há ocorrência operacional ou desvio ocorre no planejamento inicial. O problema pode ser visto como uma robusta aplicação do problema de sequenciamento *Job Shop* com as atividades sendo processadas sem intervalo de tempo entre elas, *i.e.*, seguindo a metodologia denominada sem-espera. Desta forma, o trabalho levou em consideração a utilização de múltiplos recursos por atividade, tampouco o bloqueio de parte desses recursos até a atividade sucessora.

No artigo de Liu e Kozan (2009), apresentaram mais um exemplo de aplicação de um modelo matemático aplicado ao sequenciamento de atividades de trens em uma ferrovia utilizando o *Job Shop* com máquinas paralelas com retenção de atividades. Denominando trens como atividades, seções de trecho de via unitárias como máquinas únicas e múltiplas seções de trechos de via como máquinas paralelas, o modelo matemático se concentrou na retenção destes recursos, não abordando planejamento de rotas.

Sabino *et al.* (2010) propuseram um algoritmo de Otimização com Colônia de Formigas (ACO) para auxiliar a equipe os controladores de pátios ferroviários no planejamento das manobras a serem realizadas. O algoritmo proposto é baseado em uma função multi-objetivo que busca a redução dos custos fixo e variável de movimentação de vagões no pátio, por meio da melhor programação de utilização das locomotivas de manobra, considerando um dado horizonte de planejamento. Diretamente aplicável a terminais ferroviários, o trabalho tem foco na redução de custos para a realização de manobras, calculado por meio do tempo de espera estimado para alocação dos recursos que considera, não tendo por foco específico, planejamento de rotas de manobra.

Mohamed e Qiyuan (2011) em seu estudo propuseram um modelo de programação não linear em 2 estágios para coletar os vagões que operam no sistema hub-and-spoke em uma estação central e encaminha-los até o pátio com hump-yard e novamente encaminhá-los até o seu destino de viagem. O modelo tinha como objetivo reduzir o custo com operação de manobras entre as estações. A ferramenta computacional LINGO 11. Em seu resultado obtiveram uma programação de trens que reduziu o custo de operação e maximizou as toneladas transportadas.

Marinov e Viegas (2011) desenvolveram um estudo para um pátio plano. No entanto, o foco desse trabalho foi um modelo de simulação baseado em eventos discretos para um pátio com duas linhas de acesso, duas locomotivas e duas equipagens (termo usado em algumas ferrovias para citar a equipe composta por um maquinista e seu auxiliar). O estudo compara o cenário simulado com o atual nível de produtividade do terminal.

Khoshniyat (2012) estudou estratégias de planejamento operacional que buscam auxiliar os controladores de pátios com *hump yard* a implantarem um modelo de operação menos empírico e que objetivou reduzir o tempo de classificação e, conseqüentemente, tornar a formação de trens mais rápida. No processo estudado havia necessidade de formar uma linha com vagões de diversos destinos para que a mesma passasse por uma nova manobra de classificação de vagões no *hump yard*. Para isso, utilizou um modelo de simulação para auxiliar na redução da necessidade de reclassificar lotes.

Boysen *et al.* (2013), realizaram uma revisão de literatura sobre os modelos de layout e estratégias de operação em terminais rodoviários e ferroviários destinados a carregamento de contêineres. Avaliaram custo de investimento e desempenho operacional.

Hansmann *et al.* (2014) aplicaram o problema de *Flexible Job Shop Scheduling* (Sequenciamento de atividades com múltiplos máquinas e múltiplos centros de processamento) com uma variação que denominaram bloqueio, a uma realidade de planejamento de atividades de manutenção de vagões. Esta variação consiste no fato de que se diversas manutenções são realizadas em sequência em uma mesma linha e, se uma manutenção posterior realizada nesta linha atrasar, a atividade

anterior não pode seguir para a próxima etapa de manutenção, pelo fato desta linha estar ocupada. Este modelo não leva em consideração diversos recursos por atividade, tampouco *múltiplos modos* de operação.

Khaled *et al.* (2015) estudaram o atraso da realização de atividades de uma ferrovia levando em consideração o congestionamento em pátios ferroviários e na circulação, devido a um bloqueio ou interdição de um pátio ou trecho ferroviário. Nessas situações um replanejamento seria necessário e, então, o impacto no sequenciamento das atividades da ferrovia seria medido, bem como a quantidade que os demais recursos seriam utilizados, uma vez que os demais pátios ferroviários e trechos ferroviários seriam sobrecarregados para realizar as manobras que foram impactadas com o bloqueio ou interdição anterior.

Shi e Zhoe (2015) descrevem em seu artigo, uma extensa revisão bibliográfica sobre modelos matemáticos aplicados a pátios ferroviários, a maior parte deles, no entanto, focada apenas na fase de classificação de vagões (*hump yard*). Os autores entendem que esse foco dificulta a identificação de gargalos de todo o processo que ocorre antes e depois da classificação de vagões e, por isso, propõem um estudo para aplicação de modelos que atuem de forma integrada entre as diversas atividades que ocorrem em um pátio e análise dos atrasos entre essas atividades.

Shi e Zhoe (2015) discorrem sobre diversos modelos de programação inteira mista a fim de planejar as atividades que ocorrem em um pátio ferroviário. O modelo inclui ainda um fluxo de contagem de vagões cumulativa, a fim de avaliar os atrasos entre as atividades. Neste modelo, as atividades de um pátio ferroviário são divididas em quatro: classificação, triagem, formação e partida do trem. No estudo, os autores não abordam a possibilidade de processamento das atividades por *múltiplos modos* e, apesar de abranger outras atividades, focam o problema em um pátio de classificação.

Adlbrecht *et al.* (2015) abordam em seu artigo o processo de classificação de vagões por meio da utilização de uma locomotiva de manobra para tal, ao invés do tradicional processo de classificação por *hump yard*. Os autores citam que apesar de não ser um processo de classificação incomum, não se trata de campo de pesquisa que tem recebido muita atenção da comunidade científica nos últimos anos. O artigo tem por

objetivo obter a distância mínima de percurso entre uma linha que está em uma parte do pátio, em que a locomotiva engata nos vagões a serem manobrados, para uma linha de destino em uma outra parte do pátio (essas partes do pátio são conectadas por linhas e chaves).

Saeednia, Bruckmann e Weidmann (2015) estudaram estudo para minimizar o custo de manobra por meio de redução do tempo de operação em pátio. Utilizaram como ferramenta computacional o software CPLEX. Os autores fizeram uma comparação entre o modelo proposto, o sistema FIFO (primeiro que entra e primeiro que sai) e o Método HSS. O modelo proposto apresentou o melhor resultado. No entanto, não consideraram em seu estudo restrições como capacidade da via e limitações de recursos.

Bohlin *et al.* (2015) analisaram o problema de formação de trens em um pátio ferroviário com *hump yard*. Foram utilizadas duas técnicas sendo programação inteira simples e heurística baseada em coloração de grafos. Foram utilizados dados reais de operação com um horizonte de 5 meses. Os autores realizaram uma comparação entre as soluções onde foi usado heurística e os métodos de otimização GG-IP, AI-IP e D-IP. Os métodos GG-IP e AI-IP apresentaram ganhos de 31% a 37%. Sendo que o AI-IP obteve um desempenho superior. Os experimentos identificaram que as limitações apresentadas pelas quantidades de linhas podem ser superadas quando se aumenta a quantidade de manobras.

Pimenta *et al.* (2016) propuseram um modelo matemático para planejamento operacional de manobras em um terminal ferroviário, considerando os recursos necessários para a realização dessas manobras que buscam auxiliar os controladores de pátios planos. No entanto, o trabalho não considerou a possibilidade de retenção da atividade que está sendo realizada até a liberação da atividade seguinte, como ocorre na realidade em terminais ferroviários, tampouco a variação da disponibilidade de recursos ao longo do tempo e, ainda, a alternativa do terminal operar essas atividades em *múltiplos modos*.

Haahr e Lusby (2016) analisaram por meio de solução heurística para planejar a recepção, desmembramento, classificação e formação de trens um pátio com *hump yard*. Foram utilizadas as técnicas *Hump Sequencing Problem* (HSP), *Block-To-*

*Track Assignment Problem* (BTAP) e *Pullout Allocation Problem* (PAP). Consideraram o processamento dos trens por ordem de chegada e otimizaram o resultado em 35%.

Pimenta e Rosa (2017) expandiram o modelo matemático proposto por Pimenta *et al.* (2016), propondo um modelo matemático para planejamento operacional de manobras em um terminal ferroviário, considerando os recursos necessários para a realização dessas manobras, a possibilidade de retenção de todos os recursos da atividade que está sendo realizada até a liberação da atividade seguinte (operação sem-espera), a variação da disponibilidade de recursos ao longo do tempo e, ainda, a alternativa dessas atividades serem operadas em *múltiplos modos*. No entanto, esse trabalho ainda não contemplou a necessidade de preparação e configuração de máquinas e equipamentos (tempo de *setup*), quando ocorre troca de carga (soja, milho ou farelo de soja) a ser operado por esse recurso, por exemplo, nem a retenção parcial dos recursos necessários de cada atividade. Pimenta (2017) em sua dissertação de mestrado expandiu novamente seu modelo matemático onde passou a considerar retenção de recursos e tempo de *setup*, porém não tratou de planejamento de rota, limitando-se somente a planejamento de recursos das atividades do terminal.

Dotoli, *et al.* (2017) estudaram o planejamento de um terminal intermodal de contêineres na Itália. Para planejar o carregamento de trens fizeram uso de programação linear inteira, o modelo elaborado tinha como objetivo maximizar o carregamento levando em conta aspectos tais como peso, valor, tipos de carga dos contêineres. Porém não levaram em consideração os recursos humanos nem as diferenças dos equipamentos disponíveis. Em um segundo momento foi elaborado um modelo para planejar a alocação de contêineres no pátio. O modelo se apresentou como ferramenta adequada para tomada de decisão além de possuir possibilidade de integração com o software utilizado pela empresa.

Wang e Ceder, (2017) propuseram um modelo de programação linear inteira para planejar os serviços de trens objetivando reduzir o custo de operação e a distância percorrida. O modelo foi testado e comparado com 3 casos reais em pátios com

*hump yard* obtendo redução de 496 horas de operação alcançando uma redução de custo de 40%.

Gestrelius *et al.* (2017) em seu estudo abordaram o uso de programação inteira para auxiliar nas tarefas de manobra minimizar o esforço de trabalho e minimizar o custo. O modelo apoia no sequenciamento da manobra e na atividade de classificação de trens. A validação foi realizada com dados de um pátio sueco.

Haahr, Lusby e Wagenaar (2017) compararam as diferentes formas de abordagem para resolver o problema de planejamento de trens em um pátio ferroviário. Esses experimentos foram utilizados em Instâncias de 3 operadores ferroviários diferentes. Os métodos utilizados foram *Constrain Programming Method (CPM)*, *Column Generation* e *Randomizes Greedy Construction Heuristic*.

Chen *et al.* (2018), desenvolveram uma ferramenta de simulação baseada no *Timed Petri Net*, para oferecer suporte à decisão para o projeto e gerenciamento de terminais ferroviários. Nesta plataforma, foi criado um módulo de layout de pátios e instalações para dar aos usuários de simulação de um novo projeto de ferrovia. Foi integrada a ferramenta dados reais de programação de um pátio ferroviário chinês. Os cenários testados mostraram que o planejamento das rotas e a localização dos equipamentos influenciam diretamente no desempenho dos pátios e terminais.

Lin *et al.* (2019) Utilizaram Simulated Annealing para avaliar o retorno financeiro e operacional os investimentos de capital realizados nos pátios das ferrovias chinesas poderiam proporcionar. Consideraram em suas análises uma vida útil de 50 anos para a ferrovia. Utilizaram o software lingo inicialmente para uma pequena rede ferroviária. Num momento posterior o modelo foi replicado e foram analisados cenários de investimento nas ferrovias da China.

Yan e Goverde (2019) os autores utilizaram Programação linear inteira Multiobjetiva para otimizar o fluxo ferroviário de Xangai. Levaram em consideração a redução de custo, redução do tempo de viagem e maximização do uso dos assentos dos vagões.

Zhang *et al.* (2020) utilizaram heurística para planejar os trens que percorrem uma ferrovia singela. Dividiram em 2 etapas, sendo a primeira trataram apenas a questão da pontualidade e na segunda etapa consideraram as janelas de tempo de cada

trem/estação. Não levaram em consideração as paradas para manutenção, tampouco a alocação dos trechos, somente tempo de intervalo entre trens. Os autores ao final do artigo consideram que o estudo não pode ser aplicado a outras ferrovias visto que se tratou apenas de um experimento.

Zahrani, Shahraki e Sayarshad (2020) utilizaram programação dinâmica para dimensionar frotas de lotes de vagões conforme uma política de previsão de demanda de clientes. Constataram que com seu modelo é possível melhorar a eficiência em até 27%. Porém não conseguiram validar o estudo com dados reais.

Tabela 1 - Resumos dos artigos referentes ao uso de pesquisa operacional em ferrovia

Ano	Autor	Aplicação de Pesquisa Operacional em Ferrovia	Planejamento rotas em pátio ferroviário utilizando MRCPSP
1998	Courdeau et al.	x	
1999	Blasum et al.	x	
2000	Dahlhaus et al.	x	
2000	Winter e Zimmermann	x	
2003	He et al.	x	
2003	Reis Júnior Lopes	x	
2007	D'Ariano <i>et al.</i> (2007)	x	
2009	Liu e Kozan	x	
2009	Taffner		
2010	Sabino	x	
2011	Marinov e Viegas	x	
2011	Mohamed e Qiyuan	x	
2012	Khoshniyat	x	
2013	Boysen	x	
2014	Hansmann	x	
2015	Khaled	x	
2015	Shi e Zhoe	x	
2015	Saeednia, Bruckmann e Weidmann	x	
2015	Adlbrecht	x	
2015	Bohlin	x	
2016	Pimenta	x	
2017	Pimenta e Rosa	x	
2017	Pimenta	x	
2017	Dotoli	x	
2017	Wang e Ceder	x	
2017	Gestrelius	x	
2017	Haahr, Lusby e Wagenaar	x	
2019	Lin	x	
2019	Yan e Goverde	x	
2020	Zahrani, Shahraki e Sayarshad	x	
2020	Zhang	x	
2021	Silvares (Dissertação de mestrado)	x	x

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme listado na Tabela 1 até o momento da elaboração dessa proposta de dissertação não foram encontradas publicações a planejamento de rotas em pátios ferroviários utilizando MRCPSP.

#### 2.4 REVISÃO DA LITERATURA MULTI-MODE RESOURCE CONSTRAINED PROJECT SCHEDULING PROBLEM (MRCPSP)

A seguir uma revisão de literatura acerca do MRCPSP.

A publicação pioneira acerca do sequenciamento de atividades que considerou a restrição de recursos foi trabalho de Pritsker *et al.* (1969), que, foi baseado em publicações anteriores a respeito de sequenciamento de atividades com programação binária (0-1), incluindo nas restrições múltiplos recursos limitados na modelagem.

Hartmann (1999), realizou em seu livro um aprofundado levantamento no que tange modelos métodos e aplicações de projetos de sequenciamento com recursos limitados, baseados no RCPSP. Sua obra abrange diversas variações do RCPSP, dentre elas aquelas que possuem múltiplos projetos e *múltiplos modos*, discorrendo também sobre variações na função objetivo de forma a conhecer objetivos baseados no uso dos recursos, objetivos financeiros (aumento/redução de fluxo de caixa, considerando a receita gerada descontando as despesas provenientes dos recursos utilizados), objetivos focados na qualidade (redução de retrabalhos) ou múltiplos objetivos.

Drexler *et al.* (2000) entenderam que o MRCPSP até então não possuía ferramentas suficientes para aplicação em vários problemas de sequenciamento de atividades executadas por pessoas. Dessa forma, desenvolveram um modelo matemático de MRCPSP visando contemplar especificidades como tempos de *setup* (tempo necessário de preparação de algum recurso quando ocorre a mudança de um produto em produção onde este recurso está processando) e tempos de folga entre atividades (necessário quando atividades são executadas em locais diferentes e que ocorre um tempo de deslocamento). A aplicação prática desse estudo foi o planejamento de atividades de uma equipe de auditoria.

Artigues *et al.* (2003) estudaram a inserção de novas técnicas para planejamento estático e dinâmico do sequenciamento de atividades aplicados ao RCPSP. O planejamento do sequenciamento estático é baseado na distribuição de algumas atividades no decorrer do tempo, levando em consideração os recursos disponíveis e as relações de precedência das atividades. O sequenciamento dinâmico é baseado na reação do planejamento devido a algumas mudanças nas características do problema inicial, que podem ocorrer durante a execução das atividades. A reação a estas mudanças pode ocorrer com o replanejamento de todas as atividades ou apenas das atividades diretamente relacionadas a esta situação. O artigo não contempla múltiplos projetos, tampouco *múltiplos modos* de operação.

Mika *et al.* (2008) identificaram através do MRCPSP a possibilidade de em certas situações cada atividade pode ser executada de um modo. Esses possíveis modos levam em consideração, na maior parte das vezes a maior ou menor utilização dos recursos e a conseqüentemente a variação na duração da atividade. Além disso também exploraram a inclusão do tempo de *setup*. Consideraram também em alguns casos a execução de uma atividade que deve ser precedida por algumas por alguma atividade preliminar que tenha como finalidade preparar os recursos da atividade principal.

Hartmann e Briscorn (2010) estudaram de forma detalhada as diversas aplicações e extensões do RCPSP através de um artigo de revisão de literatura dos trabalhos publicados de RCPSP realizados a partir do ano 2000. Esse artigo abordou os problemas de maneira bem abrangente, falaram da tratativa dada aos problemas onde a demanda por recurso variava em função do tempo e bem como problemas que abarcam a necessidade de tempo *setup* de máquinas. O trabalho contemplou também estudos em operação em múltiplos com recursos renováveis ou não renováveis. Trata-se de um trabalho bastante abrangente, porém não foi tratada a aplicação em ferrovias.

Zhang e Zong (2012) utilizaram o RCPSP para estabelecer a linha de base de um projeto com recursos dependentes entre si. Aplicaram heurística para gerar e modificar prioridades entre as tarefas do projeto obtendo diferentes modos de execução. Os resultados encontrados foram melhores que os resultados

encontrados na abordagem tradicional, no entanto, não houve aplicação em pátios ferroviários.

Brucker e Knust (2012) estudaram a respeito do RCPSP e suas variações, apresentando inclusive os modelos matemáticos destas variações. Em se tratando do MRCPSP, os autores relatam que alguns modos supérfluos do modelo de *múltiplos modos* podem ser dispensados na fase de pré-processamento. Estes modos são nomeados pelos autores como modos ineficientes ou não executáveis. O modo ineficiente é caracterizado nas situações em que outros modos ocorrem para a execução de uma mesma atividade e que há demanda por uma quantidade menor de recursos e um tempo menor de execução. O modo não executável caracteriza-se por um modelo que demanda uma quantidade maior de recursos além dos que estão disponíveis. Por terem estas características, estes modos podem ser retirados das Instâncias de processamento sem interferirem na função objetivo.

Kopanos *et al.* (2014) propuseram um modelo matemático que levava em consideração o horizonte de tempo contínuo em comparação aos modelos com horizonte de tempo discreto. Realizaram a comparação de Instâncias fazendo uso de duas metodologias na solução, onde levaram em consideração que a atividade precedente precisa estar encerrada antes da atividade seguinte nas situações onde o tempo é discreto. No entanto nas situações onde o tempo é contínuo a sobreposição de algumas atividades tornou-se inviável.

Okubo *et al.* (2015) propuseram um modelo de RCPSP com restrições de utilização de recursos renováveis e consumo de recursos que considerou restrições reais do consumo de energia durante o horário de pico, demanda contratual de energia e o consumo de energia nas horas de *setup*. Apesar de referenciar essas variações em sua bibliografia, o problema tratado não fez uso do modelo em *múltiplos modos*.

Kellenbrink e Helber (2015) abordaram em seu estudo a adaptação do RCPSP e do MRCPSP para projetos flexíveis. Os autores propuseram um sequenciamento de atividades com a possibilidade de implantar atividades operacionais específicas e restrições de precedência aplicadas as mesmas. Consideraram também a realização de atividades obrigatórias e eletivas. Em sua aplicação utilizaram as atividades realizadas em terra em uma aeronave (entre o pouso e a próxima decolagem).

Fizeram ainda a consideração sobre o procedimento de embarque e desembarque que de acordo com as condições operacionais pode ocorrer em ponte telescópica ou a pé fazendo uso de ônibus.

Kreter *et al.* (2016) analisaram modelos de RCPSP que consideraram quebra de calendário/ interrupções de tempo e o impacto das mesmas no planejamento das atividades. Os autores também analisaram as atividades que poderiam ser interrompidas ou não em relação aos recursos que estavam disponíveis. Avaliaram também os recursos que haviam necessidade de continuarem agrupados às atividades que foram interrompidas e aqueles que poderiam ser liberados.

Vanhoucke e Coelho, (2016) apresentaram uma abordagem para resolver problemas de agendamento de projetos com recursos limitados no segundo momento o modelo foi estendido com duas restrições lógicas. A primeira especifica que uma atividade não pode ser iniciada antes que sua predecessora se encerre e a segunda limita a execução de atividades em paralelo. Essas restrições foram resolvidas por meio de um a meta heurística.

Artigues (2017) realizou uma ampla análise dos artigos que artigos que tratavam o RCPSP considerando atividades sem interrupção e formulações de programação linear em horizonte de tempo discreto. A proposta do estudo foi comparar artigos assim caracterizados com objetivo de avaliar a efetividade de trabalhos intitulados como inovadores, comparados aos que já haviam sido estudados em artigos que já haviam sido estudados em artigos anteriormente publicados.

Naber (2017) propôs a adaptação do RCPSP fazendo uso de um perfil de recursos flexíveis, denominado FRCPS, considerando um horizonte de tempo contínuo, assim como propôs Kopanos *et al.* (2014). No RCPSP tradicional, uma atividade demanda, durante toda sua duração, uma quantidade constante de recursos. Esta pesquisa levou em consideração a variação da quantidade de recursos durante a execução de uma determinada desta forma impactando o tempo de sua duração. Devido este fato, a duração da atividade bem como a quantidade de recursos é determinada com conjunto com o sequenciamento das atividades e não previamente determinadas como parâmetros dos problemas.

Laurent *et al.* (2017) em seu trabalho fizeram uso de programação linear inteira para planejar múltiplos projetos. A proposta foi baseada em dois vetores sendo um para agendar tarefas e o outro para atribuir recursos aplicados a problemas de transportes. Testaram Instâncias de diversos tamanhos e também analisaram o comportamento das metas heurísticas.

Ahnert *et al.* (2019) propuseram o MRCPSP para planejar a atracação de navios integradas ao planejamento das rotas de embarque objetivando sequenciar a atracação dos navios em um porto graneleiro, indicando o berço de atracação e a rota para transportar a carga do pátio de armazenamento até o berço designado, minimizando o tempo de permanência dos navios no porto. No entanto, ao contrário dessa dissertação, o lote ao finalizar sua passagem pelo trecho tem o recurso disponibilizado para outra rota/lote nessa pesquisa todos os recursos da rota permaneciam indisponíveis até o final da estadia do navio.

Zhang, Liu e Son (2019), utilizaram o MRCPSP para planejar a construção de usinas de geração fotovoltaica na China. Para validar o modelo foi utilizado o caso prático da usina fotovoltaica em uma empresa chinesa de energia. O modelo se mostrou viável para resolver problemas práticos de programação de projetos de usinas fotovoltaicas.

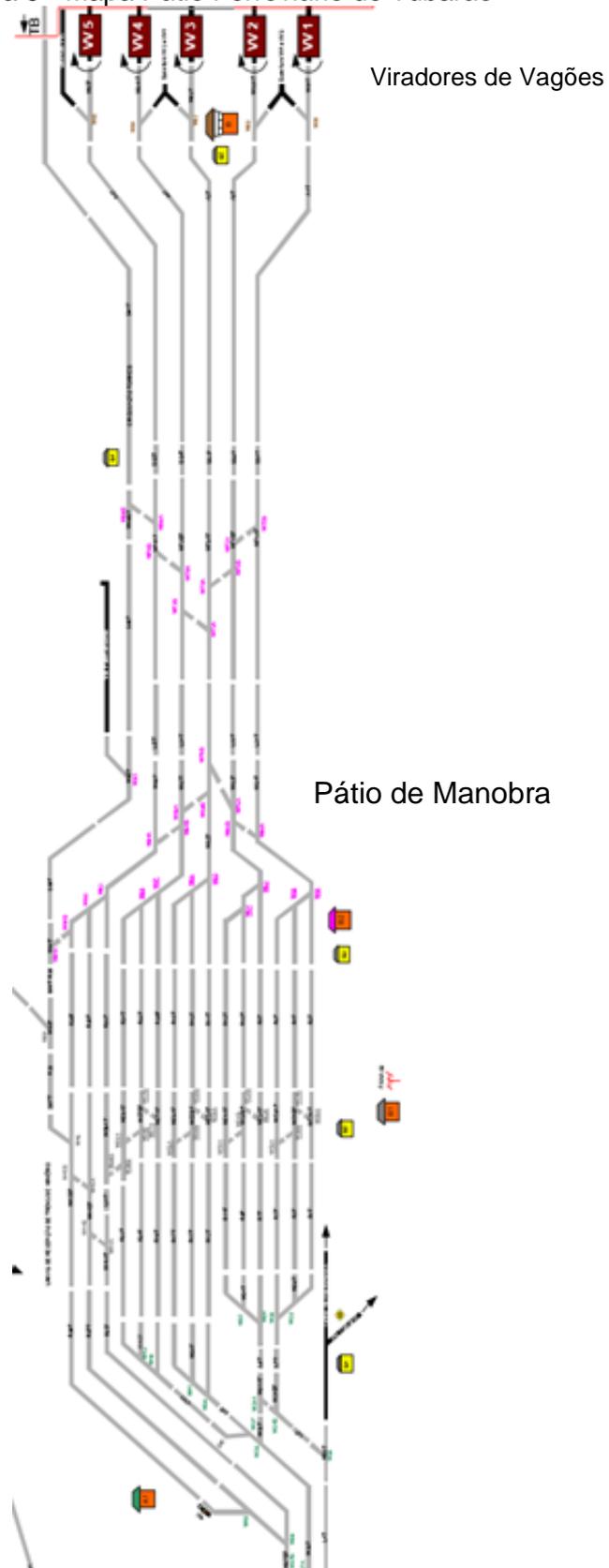
Xie, Li e Xu (2020) utilizaram o MRCPSP para planejar um cronograma de projetos que você viável em prazo e custos. O modelo se mostrou eficaz, porém para Instâncias grandes tiveram limitação computacional sendo necessário. Para cenários maior foi utilizada heurística e encontradas as soluções viáveis.

Conforme mencionado anteriormente até o momento da elaboração dessa proposta de dissertação não foram encontradas publicações referente ao uso de MRCPSP aplicado a planejamento de rotas em pátios ferroviários.

### **3 PROBLEMA ESTUDADO E GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS PRELIMINARES**

O modelo proposto por esta dissertação foi desenvolvido para planejar as rotas do pátio ferroviário de Tubarão, da Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) em Vitória – ES. O pátio ferroviário de Tubarão é formado por trechos de linha férrea destinados a recepção e manobra. Além dos trechos onde os lotes são estacionados e manobrados há também um terminal composto por equipamentos destinados a descarga de vagões, chamados Viradores de Vagões (VV's). O Layout do Pátio pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Mapa Pátio Ferroviário de Tubarão



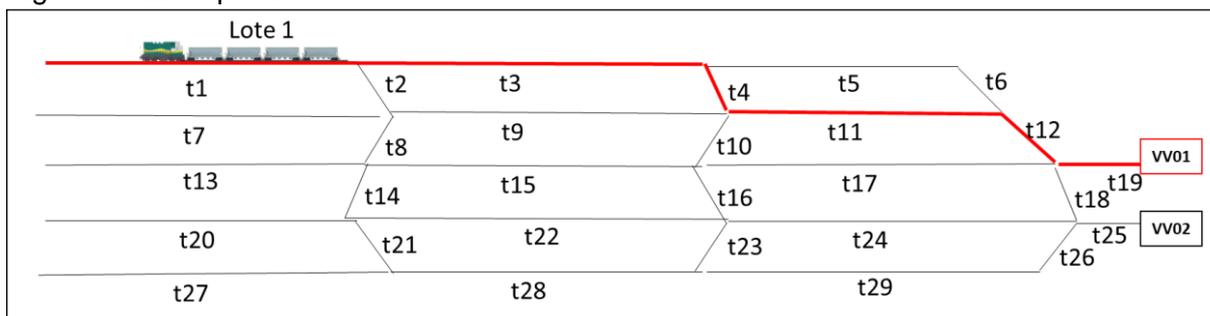
Fonte: Adaptado de Vale S.A (2019).

Conforme levantamento inicial realizado junto com a equipe de operação do pátio ferroviário de Tubarão, existem aproximadamente 110 trechos, sendo 95 efetivamente utilizados para manobra. Desses 95 trechos, 29 são utilizados para estacionamento e manobra e os demais dedicados somente a atividade de manobra. Os trechos combinados entre si podem gerar mais de 100 rotas, porém nessa pesquisa, foram consideradas 84 rotas que são as rotas consideradas viáveis pela operação do pátio. Além dos trechos, o pátio conta com 5 viradores de vagões que são utilizados na descarga dos lotes.

O trem ao chegar de viagem no Pátio de Tubarão é conduzido ao pátio de recepção para liberar a circulação da ferrovia. No pátio de recepção a locomotiva de viagem é cortada (desengatada), os vagões são desmembrados em lotes e estacionados. Cada lote é estacionado individualmente em um trecho do pátio. O lote permanece estacionado até que se tenha demanda do porto para que o mesmo seja descarregado. Quando a operação do porto solicita a descarga do lote, ela também informa a equipe de operação do pátio qual o VV onde o lote deverá ser descarregado. A equipe de operação do pátio ferroviário tomando como base o trecho inicial onde o lote está estacionado, e o VV onde o mesmo deverá ser descarregado, determina a rota, ou seja, faz a seleção dos trechos disponíveis que o lote irá percorrer até chegar ao VV de destino. A rota é determinada de forma manual e empírica conforme a ocupação/disponibilidade dos trechos do pátio. Por questões de segurança operacional, ao destinar a rota a um determinado lote os trechos que a compõe são bloqueados para que outro lote não percorra simultaneamente a mesma rota ou um dos trechos que a compõe. Após o lote percorrer todo o trecho, ou seja, quando todos os vagões terminarem de passar pelo o trecho, o mesmo é novamente disponibilizado para a operação. Durante a operação do pátio vários lotes podem ser manobrados e descarregados simultaneamente desde que não partilhem a mesma rota.

A Figura 6 apresenta uma opção de rota para o lote 1 chegar no VV01. O lote 1 sairá de t1 onde está estacionado e percorrerá a rota (t3-t4-t11-t12-t19) até chegar ao VV01.

Figura 6 - Exemplo de rota



Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a realização dessa pesquisa a operação do pátio solicitou que o modelo planejasse além da rota o trecho onde o lote seria estacionado ao chegar de viagem. Considerando os possíveis viradores de vagões que o lote poderá ser descarregado de acordo onde o local onde sua carga será armazenada o modelo também irá planejar o VV onde o lote será descarregado. Sendo assim, são necessárias as seguintes informações para a realização do planejamento das rotas do estacionamento até o VV: os trechos onde o lote poderá ser estacionado, a hora em que o lote estará disponível, e os VVs onde o lote poderá ser descarregado.

### 3.1 ELABORAÇÃO DE INSTÂNCIAS

Após a validação do modelo com as Instâncias de teste foram criadas 50 Instâncias para o leiaute de Tubarão. As Instâncias foram criadas com intuito de avaliar a capacidade do pátio, identificar quais trechos, VVs e rotas são mais críticos e impactam na operação do pátio.

As instâncias foram divididas em 5 grupos. O grupo A é composto pela instância inicial onde é avaliada a capacidade do modelo em planejar um turno comum de trabalho. Os grupos B e C avaliam o impacto em disponibilizar para a manutenção os trechos de ferrovia e VVS de forma individual respectivamente. O grupo D avalia o impacto de se disponibilizar para a manutenção mais de um VV simultaneamente e por fim o grupo E que avalia o impacto de disponibilizar para a manutenção mais de um trecho simultaneamente. Para todas as Instâncias foram considerados: 95 trechos, 5 VVs, 84 rotas e 10 lotes (quantidade máxima de lotes que são recebidos em 1 turno de trabalho de 6 horas). Como recursos foram considerados trechos e

VVs. Assim, cada trecho recebeu uma numeração de 1 a 95 e os VVs de 96 a 100. As Instâncias estão representadas na Tabela 2.

A coluna (1) apresenta o grupo, a coluna (2) se refere ao número da Instância, a coluna (3) se refere ao tipo de equipamento (se trecho ou VV) que estará em manutenção (se houver), a coluna (4) identifica o equipamento que está sendo considerado em manutenção (se houver), a coluna 5) a quantidade rotas que o equipamento que está em manutenção faz parte.

Tabela 2: Instâncias

Grupo	Instância	Tipo de Equipamento em manutenção	Número do Equipamento em manutenção	Quantidade de Rotas paralisadas
A	1	-	-	
	2	Trecho	1	6
	3	Trecho	2	7
	4	Trecho	3	5
	5	Trecho	4	8
	6	Trecho	5	5
	7	Trecho	6	8
	8	Trecho	7	9
	9	Trecho	8	4
	10	Trecho	9	4
B	11	Trecho	10	6
	12	Trecho	11	3
	13	Trecho	12	4
	14	Trecho	13	6
	15	Trecho	14	3
	16	Trecho	15	6
	17	Trecho	54	12
	18	Trecho	55	21
	19	Trecho	56	38
	20	Trecho	57	29
	21	Trecho	58	19
	22	Trecho	85	25
	23	Trecho	86	20
	24	Trecho	87	16
	25	Trecho	88	12
	26	Trecho	89	17
C	27	VV	VV1	20
	28	VV	VV2	19
	29	VV	VV3	19
	30	VV	VV4	13
	31	VV	VV5	14
D	32	VV	VV1, VV2	29
	33	VV	VV1, VV3	39
	34	VV	VV1, VV2, VV3	58
	35	VV	VV2, VV3, VV4	51
	36	VV	VV4, VV5	27
	37	VV	VV3, VV4, VV5	27
	38	VV	VV1, VV3, VV5	83
	39	VV	VV2, VV4	32
	E	40	Trecho	54, 55
41		Trecho	55, 56	59
42		Trecho	55, 56, 57	67
43		Trecho	55, 57	50
44		Trecho	58, 59	32
45		Trecho	65,66	35
46		Trecho	66, 67	33
47		Trecho	16, 17, 18	24
48		Trecho	4, 5, 6, 7, 8, 9	38
49		Trecho	10, 11, 12	13
50		Trecho	13,14, 15	15

Fonte: Elaborado pelo autor

## 4 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático proposto tem por objetivo reduzir o tempo total de estadia de todos os lotes, definindo o local de estacionamento do lote, o VV e a rota a ser percorrida entre os dois. Para tanto, devem ser conhecidas as seguintes informações sobre o lote: o horário que ele chegará ao pátio, os trechos onde ele pode ser estacionado e os VVs que ele pode descarregar. Ele tem como função, conhecendo o horário em que o lote estará disponível planejar a melhor rota minimizando o tempo de estadia do lote. Com essas informações, o modelo irá definir qual a rota (conjunto de trechos) que o lote deverá percorrer considerando o local onde o lote poderá ser estacionado e o VV onde poderá descarregar.

Foi percebido que as características do problema de planejamento de rota permitem uma correlação com o MRCPSP. Dessa forma, para realização do planejamento é proposto um modelo matemático inspirado no MRCPSP. Na introdução dessa dissertação, foi descrito como o problema tratado foi adaptado ao MRCPSP. Tendo em vista o layout do pátio ferroviário, é definida cada rota possível, i.e., a sequência de trechos que leve de um local de estacionamento até um VV. Cada lote ao percorrer uma rota deve seguir uma sequência de atividades (que usam os recursos trechos e VV). Deve-se considerar que uma atividade não pode iniciar antes que a atividade anterior na rota termine. Essa condição é denominada relação de precedência. Os trechos e VVs podem ser comuns a várias rotas, podendo ser alocados para atender um único lote por vez e conseqüentemente uma rota por vez. Sendo assim, poderá haver conflito para disponibilizá-los, o que pode vir a gerar atrasos para o percurso da rota, conseqüentemente, para a estadia do lote.

Define-se que  $nn$  é o número de atividades,  $ht$  unidades de tempo,  $ht$  é o número de unidades de tempo, sendo que cada unidade de tempo é equivalente a 15 minutos,  $ntm$  é o número de recursos disponíveis,  $nmo$  é o número de rotas possíveis, e  $np$  é o número de lotes.

A Função Objetivo (FO) minimiza a somatória das estadias dos lotes no terminal que nessa dissertação estão consideradas em unidades de tempos (UT). Dessa forma, o modelo matemático é apresentado a seguir em cinco partes: conjuntos, parâmetros, variável de decisão, função objetivo e restrições.

## Conjuntos

- $J$  conjunto de atividades,  $J \in \{1, \dots, nm\}$ ;
- $K$  conjunto de recursos,  $K \in \{1, \dots, ntm\}$ ;
- $M$  conjunto de rotas,  $M \in \{1, \dots, nmo\}$ ;
- $P$  conjunto de lotes,  $P \in \{1, \dots, np\}$ ;

## Parâmetros

- $tp_j$  Tempo de processamento de qualquer lote para executar a atividade  $j \in J$ ;
- $qtm_k$  Quantidade de recursos disponíveis  $k \in K$ ;
- $s_p$  Momento em que o lote  $p \in P$  chegará ao pátio;
- $r_{j,k}$  Quantidade de recurso  $k \in K$  necessário para realizar a atividade  $j \in J$ ;
- $ap_{m,j}$  Tem o valor 1 quando a atividade  $j \in J$  é executada na rota  $m \in M$  e zero, caso contrário;
- $ail_{p,j}$  Determina o trecho  $j \in J$  onde o lote  $p \in P$  inicia a rota e zero, caso contrário;
- $afl_{p,j}$  Determina o  $VV j \in J$  onde o lote  $p \in P$  será descarregado e zero, caso contrário;
- $lm$  Parâmetro que tem valor 0,0001 para a lógica do modelo;
- $lM$  Parâmetro que tem valor 9.999,0 para a lógica do modelo;

### Variáveis de decisão

$x_{p,j,m,t}$  variável binária que assume o valor 1 se o lote  $p \in P$ , termina a atividade  $j \in J$  na rota  $m \in M$  no instante  $t \in T$  e 0, caso contrário;

$mp_{p,m}$  variável binária que assume o valor 1 se o lote  $p \in P$  é deslocado na rota  $m \in M$  e 0, caso contrário;

$pim_{p,j,m}$  variável binária que assume o valor 1 se o lote  $p \in P$ , inicia o deslocamento no trecho  $j \in J$  na rota  $m \in M$  e 0, caso contrário;

$pfm_{p,j,m}$  variável binária que assume o valor 1 se o lote  $p \in P$ , encerra o deslocamento no VV  $j \in J$  na rota  $m \in M$  e 0, caso contrário;

A seguir serão apresentadas a Função Objetivo (FO) e as restrições do modelo proposto. As restrições foram expressas como restrições lógicas do CPLEX (IBM, 2018).

$$\text{minimizar } \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} (t - s_p + 1) x_{p,j,m,t} pfm_{pmj} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} x_{p,j,m,t} = \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} ap_{m,j} mp_{p,m} \quad \forall p \in P \quad (2)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{m \in M} \sum_{j \in J} r_{jk} \sum_{\substack{b \in T \\ (b \geq t) \wedge \\ (b \leq t + tp_j - 1)}} x_{p,j,m,b} \leq 1 \quad \forall t \in T, k \in K \quad (3)$$

$$x_{p,j,m,t} = 0 \quad \forall j \in J, p \in P, \quad (4)$$

$$m \in M, t \in T \mid$$

$$t$$

$$\leq s_p + tp_j - 2$$

$$\sum_{t \in T} x_{p,j,m,t} = ap_{m,j} mp_{p,m} \quad \forall j \in J, p \in P, \quad (5)$$

$$m \in M$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{t \in T} x_{p,j,m,t} \leq 1 \quad \forall p \in P, \quad (6)$$

$$j \in J$$

$$\sum_{m \in M} mp_{p,m} = 1 \quad \forall p \in P \quad (7)$$

$$\sum_{t \in T} t(x_{p,h,m,t}) \leq \sum_{t \in T} (t - tp_j) x_{p,j,m,t} + (1 - mp_{p,m}) lM \quad \forall p \in P, j \in J, \quad (8)$$

$$h \in J,$$

$$m \in M |$$

$$(pr_{m,j,h}$$

$$= 1) \wedge$$

$$(ap_{m,j} = 1) \wedge$$

$$(ap_{m,h} = 1)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} x_{p,j,m,t} \geq lm mp_{p,m} \quad \forall p \in P, \quad (9)$$

$$m \in M$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} x_{p,j,m,t} \leq lM mp_{p,m} \quad \forall p \in P, \quad (10)$$

$$m \in M$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} x_{p,j,m,t} = 0 \quad ap[m,j] = 0 \quad (11)$$

$$mp_{p,m} \leq \sum_{j \in J} 1 - pim_{p,j,m} \quad \forall p \in P, m \in M \quad (12)$$

$$pim_{p,m,j} \leq lM(2 - ail_{p,j} - ap_{m,j}) \quad \forall p \in P, m \quad (13)$$

$$\in M e$$

$$j \in J$$

$$pim_{p,m,j} \leq lm(2 - afl_{p,j} - ap_{m,j}) \quad \forall p \in P, \quad (14)$$

$$m \in M$$

$$mp_{p,m} \leq \sum_{j \in J} 1 - pfm_{p,j,m} \quad \forall p \in P, m \in M \quad (15)$$

$$pfm_{p,m,j} \leq lM(2 - atl_{p,j} - ap_{m,j}) \quad \forall p \in P, m \in M \quad (16)$$

$$pfm_{p,m,j} \leq lm(2 - afl_{p,j} - ap_{m,j}) \quad \forall p \in P, m \in M, j \in J \quad (17)$$

$$pim_{p,m,j} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, m \in M, j \in J \quad (18)$$

$$pjm_{p,m,j} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, m \in M, j \in J \quad (19)$$

$$mp_{p,m} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, m \in M \quad (20)$$

$$x_{p,j,m,t} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, j \in J, m \in M, t \in T \quad (21)$$

A FO, Equação (1), função representa a soma da estadia de todos os lotes no pátio. Calcula-se a estadia de um lote subtraindo do momento que o lote encerra a última atividade,  $j$ , do momento que lote chegou ao pátio,  $sp$ . Para garantir que o tempo  $t$  seja o término da última atividade, ele é multiplicado pela variável de decisão  $x_{p,j,m,t}$ , que vale 1 se o lote  $p$ , encerrou sua rota  $m$ , na atividade  $j$  no tempo  $t$ . Por fim, essa subtração também deve ser multiplicada pela variável de decisão  $pfm_{pmj}$ , pois o modelo matemático decide também qual será a última atividade  $j$  a ser realizada pelo lote  $p$ , no caso do problema do pátio ferroviário tratado, a última atividade será

realizada em um dos VVs. A FO deve ser minimizada. Destaca-se que a FO é não linear devido o termo  $x_{p,j,m,t} pfm_{pmj}$  ser a multiplicação. A linearização do respectivo termo será apresentada após apresentação das restrições do modelo.

As Restrições (2) garantem que cada atividade seja atribuída a uma rota por vez, garantindo a segurança operacional do pátio, onde apenas um lote por vez poderá passar por um trecho ou ser descarregado no VV. As Restrições (3) asseguram que o recurso seja renovável após seu uso. Após o lote passar pelo trecho ou pelo VV o mesmo será disponibilizado imediatamente para outra rota e/ou lote. As restrições (4) garantem que o lote não inicie seu deslocamento pela rota antes de chegar ao pátio. As Restrições (5) asseguram que uma determinada atividade só pode ser executada na rota, se o lote estiver sendo executado nessa mesma rota. A Restrições (6) garantem que uma atividade só pode ser realizada em uma rota por vez. As Restrições (7) determinam que um lote só pode se deslocar em uma rota por vez, não sendo possível passar em mais de uma rota simultaneamente. A Restrições (8) que definem as relações de precedências das atividades dentro de cada rota. As Restrições (9) e (10) definem se um determinado lote está se deslocando por uma rota ou não. As Restrições (11) garantem se o lote está em uma rota ou não. As Restrições (12) e (13) determinam a atividade e a rota que o lote iniciará o deslocamento. As restrições (14), (15), (16) e (17) asseguram a atividade (VV) e a rota que o lote encerrará a estadia no pátio. E por fim as Equações (18), (19), (20) e (21) definem o domínio das variáveis de decisão.

Tendo em vista que a FO é não linear por causa do termo  $x_{p,j,m,t} pfm_{pmj}$ . Como determina o momento de término  $t$ , da última atividade  $j$ , do lote  $p$ , na rota  $m$ . Sendo assim, para linearizar esse termo foi criada a variável de decisão inteira  $y_{p,j,m,t}$ . Além disso, foram criadas as Restrições (22) - (25).

$$y_{p,j,m,t} \leq x_{p,j,m,t} \quad \forall p \in P, j \in J, \quad (22)$$

$$m \in M \text{ e } t \in T$$

$$y_{p,j,m,t} \leq pfm_{p,m,j} \quad \forall p \in P, j \in J, \quad (23)$$

$$m \in M \text{ e } t \in T$$

$$y_{p,j,m,t} \geq x_{p,j,m,t} + p f m_{p,j,m} - 1 \quad \forall p \in P, j \in J, \quad (24)$$

$$m \in M \text{ e } t \in T$$

$$y_{p,j,m,t} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, j \in J, \quad (25)$$

$$m \in M \text{ e } t \in T$$

Assim, a FO, Equação (1), é escrita conforme a Equação (26).

$$\text{minimizar} \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} (t - s_p + 1) y_{p,j,m,t} \quad (26)$$

O modelo matemático proposto possui  $|P| |M| (2 |J| |T| + 2 |J| + 1)$  variáveis de decisão inteiras. Em todas as Instâncias foram considerados: 84 rotas possíveis, 10 lotes (quantidade máxima de lotes que são recebidos em 1 turno de trabalho de 6 horas e um horizonte de planejamento de 24 unidades de tempo (cada unidade representando 15 minutos), tem-se na Tabela 3 a quantidade de variáveis de decisão. A coluna (1) apresenta o período de planejamento, a coluna (2) a quantidade de lotes, a coluna (3) a quantidade de rotas, a coluna (4) a quantidade de atividades (trechos e VVs), a coluna (5) o horizonte de planejamento e pôr fim a coluna (6) a quantidade total de variáveis de decisão inteiras conforme o período de planejamento.

Tabela 3: Quantidade de variáveis de decisão do modelo

Período	P (lotes)	M (Rotas)	J (Atividades)	T (Tempo)	Qtd de variáveis de decisão inteiras
1 turno	10	84	100	24	5.208.840

Fonte: Elaborado pelo autor

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Para resolver o modelo matemático proposto, foi utilizado o solver IBM® ILOG® CPLEX® Versão 12.8 em um computador com processador Intel® i7 com 32 GB de memória RAM.

Os resultados encontram-se na Tabela 4, sendo a coluna (1) o grupo, a coluna (2) se refere ao número da Instância, a coluna (3) a FO em UT, a coluna (4) as colunas a FO em minutos (1 UT equivale a 1 minutos) e pôr fim, a coluna (5) com o tempo de execução. Para as Instâncias que o CPLEX encontrou solução ótima, ou seja, o Gap 0,00%.

Tabela 4 - Resultados

Grupo	Instância	FO (UT)	FO (min)	Tempo Exec. (s)
A	1	110,00	1650,00	147,83
	2	110,00	1650,00	149,27
	3	150,00	2250,00	142,72
	4	110,00	1650,00	147,83
	5	110,00	1650,00	135,06
	6	114,00	1710,00	170,26
	7	110,00	1650,00	130,66
	8	110,00	1650,00	131,09
	9	110,00	1650,00	143,3
	10	110,00	1650,00	139,75
	11	110,00	1650,00	139,78
B	12	110,00	1650,00	141,75
	13	110,00	1650,00	142,11
	14	110,00	1650,00	134,05
	15	110,00	1650,00	142,72
	16	110,00	1650,00	136,66
	17	112,00	1680,00	153,88
	18	114,00	1710,00	146,11
	19	112,00	1680,00	87,88
	20	110,00	1650,00	101,52
	21	110,00	1650,00	117,06
	22	111,00	1665,00	232,017
	23	115,00	1725,00	146,75
	24	110,00	1650,00	112,95
	25	110,00	1650,00	129,55
	26	110,00	1650,00	120,33
C	27	110,00	1650,00	118,22
	28	110,00	1650,00	122,02
	29	112,00	1680,00	123,2
	30	116,00	1740,00	157,28
	31	112,00	1680,00	143,42
D	32	110,00	1650,00	88,67
	33	114,00	1710,00	86,41
	34	118,00	1770,00	22,00
	35	115,00	1725,00	149,64
	36	161,00	2415,00	304,08
	37	161,00	2415,00	180,64
	38	165,00	2475,00	144,66
	39	124,00	1860,00	151,05
E	40	119,00	1785,00	135,26
	41	161,00	2415,00	148,64
	42	161,00	2415,00	119,30
	43	128,00	1920,00	73,69
	44	112,00	1680,00	100,03
	45	142,00	2130,00	223,61
	46	112,00	1680,00	92,58
	47	115,00	1725,00	133,2
	48	116,00	1740,00	84,64
	49	110,00	1650,00	125,09
	50	110,00	1650,00	118,27

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme Tabela 4, foram encontradas soluções ótimas todas Instâncias testadas, porém as Instâncias 36, 37, 38, 41, 42 e 45 precisaram de tempo superior a 1 turno para que todos os lotes fossem deslocados.

A Instância 1 foi criada com intuito de testar o modelo no layout original. A Figura 7 apresenta o gráfico de *Gantt* ao longo do tempo com o planejamento encontrado pelo CPLEX. Cada rota está representada por uma cor diferente, sendo a rota 24 na cor amarela, a rota 10 na cor rosa e a rota 2 pela cor azul. Os lotes 1, 5, 6, 7 e 9 foram planejados para serem deslocados pela rota 24 composta pelos trechos (6-22-86-48-50-55-60-65-70) e VV 4 (99). Conforme planejamento encontrado pelo CPLEX o primeiro lote a ser deslocado foi o lote 1, iniciou no momento (2) no trecho (6), passou posteriormente pelos trechos (22-86-48-50-55-60-65-70) e encerrou o deslocamento na atividade (99) VV, no tempo (11). O lote 5, iniciou seu deslocamento no tempo (6) e finalizou no tempo (15). Logo após o trecho (6) ser liberado pelo lote 5, o lote 6 iniciou o deslocamento. Na sequência o lote 7 que iniciou no tempo (8) e encerrou no tempo (17). Por fim o lote 9, que iniciou no tempo 10 e encerrou no tempo (19). O planejamento ocorreu da mesma para os lotes que foram que tiveram sua manobra planejada nas rotas 10 e 2. Sendo os lotes 2, 4 e 8 que tiveram a manobra planejada pela rota 10 composta pelos trechos (2-17-33-85-51-56-61-66-71) e VV 3 (98) e os lotes 3 e 10 foram planejados para serem manobrados na rota 2 composta pelos trechos (2-17-33-85-49-54-59-64-69) e VV 5 (100) conforme apresentado na Figura 7. A FO encontrada foi 110 UTs.

Figura 7: Gráfico Gantt Instância 1

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 9										6	22	86	48	50	55	60	65	70	99				
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 8										2	17	33	85	51	56	61	66	71	98				
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100			
		<b>Legenda</b> Rota 24 Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga Rota 10 Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga Rota 2 Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga																					

Fonte: Elaborado pelo autor

Todos as demais Instâncias foram criadas para serem comparadas a Instância 1. O objetivo das Instâncias seguintes foi avaliar o impacto da manutenção dos trechos e VVs individualmente ou em conjunto. A Instância 2, Figura 8, teve planejamento de idêntico a Instância 1, pois o equipamento que foi disponibilizado para manutenção (trecho 1) não havia sido escolhido pelo CPLEX na Instância 1.

Figura 8 – Gráfico de Gantt Instância 2

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 9										6	22	86	48	50	55	60	65	70	99				
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 8										2	17	33	85	51	56	61	66	71	98				
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100			
		<b>Legenda</b> Rota 24 Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga Rota 10 Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga Rota 2 Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga																					

Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando a instancia 3, Figura 9, com a Instância 1, Figura 7, observou-se que ao disponibilizar para manutenção o trecho 2, que inicialmente era utilizado nas rotas 10 e 2, o CPLEX mudou complemente as rotas por onde seriam deslocados os lotes 6, 2, 4, 8, 3 e 10. Os lotes 1, 5, 10, 7 e 9 continuaram sendo planejados para serem deslocados pela rota 24 composta pelos trechos (6-22-86-48-50-55-60-65-70) e VV 4 (99). Porém, os lotes 2 e 8 foram planejados para a rota 3 composta pelos trechos ((3-18-19-34-85-49-54-59-64-69) e VV 5 (100). O lote 6 foi designado para rota 26, formada pelos trechos (6-22-86-48-85-51-56-61-66-71) e VV3 (98). O lote 4, foi planejado para a rota 52, composta pelos trechos (11-81-40-88-74-53-58-63-68-73) e VV1 (96). Por fim, o lote 3 foi designado para a rota 53, trechos (11-81-40-88-46-52-57-62-67-72) e VV2 (97). Devido a manutenção do trecho 2, o valor da FO que na Instância 1 foi 450 UTs nessa Instância aumentou para 150 UTs, em virtude do CPLEX ter planejado rotas com mais trechos que as rotas da instância 1.

Figura 9 -Gráfico de Gantt Instância 3

Resultados Instância 3																						
		Rotas																				
Lotes \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99											
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 9										6	22	86	48	50	55	60	65	70	99			
Lote 10											6	22	86	48	50	55	60	65	70	99		
Lote 2			3	18	19	34	85	49	54	59	64	69	100									
Lote 8				3	18	19	34	85	49	54	59	64	69	100								
Lote 6							6	22	86	48	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 4					11	81	40	88	74	53	58	63	68	73	96							
Lote 3				11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97								

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 3	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 26	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 4, Figura 10, obteve o mesmo planejamento que a Instância 1, visto que o trecho disponibilizado para manutenção foi o trecho 3, que não foi escolhido na Instância 1.

Figura 10 - Gráfico de Gantt Instância 4

		Rotas																					
Lote \ UT	UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Lote 1			6	22	86	48	50	55	60	65	70	99											
Lote 5							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 6								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 7									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 9										6	22	86	48	50	55	60	65	70	99				
Lote 2				2	17	33	85	51	56	61	66	71	98										
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 8										2	17	33	85	51	56	61	66	71	98				
Lote 3					2	17	33	85	49	54	59	64	69	100									
Lote 10												2	17	33	85	49	54	59	64	69	100		

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 5, Figura 11, também obteve o mesmo planejamento que a Instância 1, visto que o trecho disponibilizado para manutenção foi o trecho 4 que não foi atribuído as rotas planejadas na Instância 1.

Figura 11 - Gráfico de Gantt Instância 5

		Rotas																					
Lote \ UT	UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Lote 1			6	22	86	48	50	55	60	65	70	99											
Lote 5							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 6								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 7									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 9										6	22	86	48	50	55	60	65	70	99				
Lote 3					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 4						2	17	33	85	51	56	61	66	71	98								
Lote 8											2	17	33	85	51	56	61	66	71	98			
Lote 3					2	17	33	85	49	54	59	64	69	100									
Lote 10												2	17	33	85	49	54	59	64	69	100		

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 6, Figura 12, teve o trecho 5 disponibilizado para manutenção. Dessa forma os lotes 2,7 e 10 foram planejados para a rota 2, o lote 9 para a rota 9, os lotes 1, 3 e 8 para a rota 10, o lote 5 para a rota 52 e por fim, os lotes 4 e 6 na rota 56. A

FO também aumentou para 114 UTs, devido terem sido selecionadas rotas com mais trechos, mesmo com os acréscimos de trechos, todos os lotes foram deslocados dentro do turno de trabalho e sem atraso.

Figura 12 - Gráfico de Gantt Instância 6

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 2			2	17	33	85	49	54	59	64	69	100											
Lote 7								2	17	33	85	49	54	59	64	69	100						
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100			
Lote 9											2	17	33	85	48	50	55	60	65	70	97		
Lote 1		2	17	33	85	51	56	61	66	71	98												
Lote 3				2	17	33	85	51	56	61	66	71	98										
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 5						11	81	40	88	74	53	58	63	68	73	96							
Lote 4					11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97								
Lote 6							11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97						

Legenda	
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 9	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Instância 7, Figura 13, foi avaliado o impacto do trecho 6 em manutenção. O trecho 6, faz parte da rota 24 que foi selecionada na Instância 1. Como esse trecho estava indisponível o planejamento foi realizado da seguinte forma: lotes 1, 3 e 8 na rota 10, lotes 2, 7 e 10 na rota 2, lote 9 na rota 9, lote 5 na rota 52 e lotes 4 e 6 na rota 53. Essa manutenção não impactou a FO que se manteve em 110 UTs.

Figura 13 - Gráfico de Gantt Instância 7

		Rotas																					
LOTE \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		2	17	33	85	51	56	61	66	71	98												
Lote 3				2	17	33	85	51	56	61	66	71	98										
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 2			2	17	33	85	49	54	59	64	69	100											
Lote 7								2	17	33	85	49	54	59	64	69	100						
Lote 10										2	17	33	85	49	54	59	64	69	100				
Lote 9										2	17	33	85	48	50	55	60	65	70	99			
Lote 5						11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96							
Lote 4					11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97								
Lote 6							11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97						

Legenda	
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 9	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 8, Figura 14, avaliou os impactos do trecho 7 em manutenção. O CPLEX para essa Instância encontrou o mesmo planejamento para a Instância 1. Esse mesmo planejamento também foi encontrado para as Instâncias 9 a 16 que avaliaram os impactos de manutenção dos trechos 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15, respectivamente, pois os mesmos não faziam parte da solução encontrada na Instância 1. A FO manteve-se em 110 UTs. Os gráficos de *Gantt* das Instâncias de 9 a 16 estão apresentados nas Figuras 44 a 51 dos apêndices de A a G.

Figura 14 - Gráfico de Gantt Instância 8

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100			

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

As Instâncias de 17 a 26 avaliam trechos que quando paralisados impactam de 12 a 38 rotas. A Instância 17, Figura 15, avaliou o impacto causado pela manutenção do trecho 54. O CPLEX encontrou o seguinte planejamento: lotes 1, 5, 6, 7 e 8 se deslocaram pela rota 24, os lotes 2, 4 e 6 pela rota 10, o lote 9 pela rota 52 e, por fim, o lote 10 pela rota 53. A estadia dos lotes mencionados anteriormente aumentou em 2 UTs e, assim a FO aumentou de 110 UTs para 112 UTs, devido ao fato dos lotes passarem a percorrer rotas com mais quantidades de trechos. Porém, mesmo com a paralização desse trecho todos os lotes foram deslocados dentro do período do turno de trabalho sem atrasos. Tendo em vista que cada lote foi afetado em 1 UT que equivale a 15min esse acréscimo de tempo de operação não foi relevante.

Figura 15 - Gráfico de Gantt Instância 17

		Rotas																							
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99														
Lote 5				6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99									
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 8									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98													
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 6						2	17	33	85	51	56	61	66	71	98										
Lote 9				11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	99											
Lote 10											11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97				

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A instância 18, Figura 16, avaliou os impactos de manutenção do trecho 55, que impacta diretamente em 21 rotas. A FO, passou de 110 UTs para 114 UTs, reflexo da escolha pelas rotas 52 e 53 que possuem mais trechos a serem percorridos. Mesmo assim, todos os lotes se deslocaram dentro do turno de trabalho sem atraso. O planejamento ficou da seguinte forma: lotes 1,5 e 7 na rota 8, lotes 2, 6 e 10 na rota 10, lotes 3 e 9 na rota 52 e lotes 4 e 8 na rota 52.

Figura 16 - Gráfico de Gantt Instância 18

		Rotas																								
Lote \ UT	UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Lote 1			2	17	33	85	49	54	59	64	69	98														
Lote 5						2	17	33	85	49	54	59	64	69	98											
Lote 7								2	17	33	85	49	54	59	64	69	98									
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98														
Lote 6							2	17	33	85	51	56	61	66	71	98										
Lote 10											2	17	33	85	51	56	61	66	71	98						
Lote 3				11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	100												
Lote 9											11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	100					
Lote 4						11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97										
Lote 8									11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97							

Legenda	
Rota 8	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor.

A rota 19, Figura 17, avaliou os impactos de manutenção do trecho 58, que impacta diretamente em 38 rotas. A FO, passou de 110 UTs para 112 UTs, devido a escolha de rotas com mais trechos a serem percorridos, porém, todos os lotes se deslocaram dentro do turno de trabalho sem atraso. O planejamento ficou da seguinte forma: lotes 1,5, 6, 9 e 10 na rota 24, lotes 2, 4 e 7 na rota 8, lotes 3 na rota 52 e lote 8 na rota 53.

Figura 17 - Gráfico de Gantt Instância 19

		Rotas																								
Lote \ UT	UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Lote 1			6	22	86	48	50	55	60	65	70	99														
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99											
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99										
Lote 9										6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 10											6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 2			2	17	33	85	49	54	59	64	69	100														
Lote 4						2	17	33	85	49	54	59	64	69	100											
Lote 7								2	17	33	85	49	54	59	64	69	100									
Lote 3				11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	100												
Lote 8									11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97							

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 8	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 20, Figura 18, avaliou os impactos de manutenção do trecho 57 que impacta diretamente em 29 rotas. O CPLEX encontrou planejamento idêntico ao da Instância 1 e FO de 110 UTs. Esse mesmo resultado foi encontrado para a Instância 21, Figura 19, que avaliou os impactos causados pelo trecho 58 em manutenção. Esse trecho em manutenção paralisa 19 rotas.

Figura 18 - Gráfico de Gantt Instância 20

		Rotas																							
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99														
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99										
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99									
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 9										6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98													
Lote 4					2	17	33	85	49	54	59	64	59	98											
Lote 8									2	17	33	85	49	54	59	64	59	98							
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	98												
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	98					

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 - Gráfico de Gantt Instância 21

		Rotas																						
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99													
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99									
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 9										6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98												
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98										
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98						
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100											
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100				

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 22, Figura 20, avaliou os impactos de manutenção do trecho 85 que impacta diretamente em 25 rotas. O CPLEX encontrou uma FO de 111 UT, todos os lotes foram deslocados dentro do turno, porém nessa Instância observou que o último lote teve seu descarregamento encerrado faltando apenas 1 UT (15 minutos) para o encerramento do turno. O trecho 85, não é o trecho que paralisado impacta mais rotas, porém é o trecho que ao ser paralisado ele impacta a rota mais rápida do pátio, a rota 2. O planejamento ficou da seguinte forma: lotes 1,5, 8, 9 e 10 na rota 24, lotes 2, e 4 a rota 52, lotes 3 e 7 na rota 53 e lote 6 na rota 80.

Figura 20 - Gráfico de Gantt Instância 22

Lote \ UT	Rotas																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99															
Lote 5					6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 8								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99									
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 10										6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 2			11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96													
Lote 4					11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96											
Lote 3				11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97												
Lote 7								11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97								
Lote 6							13	63	29	68	73	83	30	43	89	47	53	58	95	63	68	73	96			

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 80	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 23, Figura 21, avaliou os impactos de manutenção do trecho 86 que impacta diretamente em 20 rotas. O CPLEX encontrou uma FO de 115 UTs, todos os lotes foram deslocados dentro do turno. O planejamento ficou da seguinte forma: lotes 2, 3, 10 na rota 8, lote 9 na rota 9, lotes 3, 6 e 7 rotas 10, lote 5 rotas 52 e lotes 4 e 8 na rota 53.

Figura 21 - Gráfico de Gantt Instância 23

		Rotas																			
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	22
Lote 2		2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100								
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100	
Lote 9										2	17	33	85	48	50	55	60	65	70	99	
Lote 3				2	17	33	85	51	56	61	66	71	98								
Lote 6							2	17	33	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 7								2	17	33	85	51	56	61	66	71	98				
Lote 5								11	81	40	68	88	47	53	58	63	68	73	96		
Lote 4					11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97						
Lote 8									11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97		

Legenda	
Rota 8	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 9	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 24, Figura 22, avaliou os impactos do trecho 7 em manutenção. O CPLEX para essa Instância encontrou o mesmo planejamento para a Instância 1. Esse mesmo planejamento foi encontrado também para as Instâncias de 25, 26, 27 e 28 que avaliaram os impactos de manutenção dos trechos 88, 89 e VVs 1 e 2A FO manteve-se me 110 UTs. Os gráficos de Gantt das Instâncias de 25 a 28 estão apresentados nos apêndices de H a K.

Figura 22 - Gráfico de Gantt Instância 24

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100			

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 29,

Figura 23 avaliou os impactos causados pela parada de manutenção do VV3. A FO passou de 110 UTs para 115 UTs, ao contrário das Instâncias 28 e 29 que avaliaram o impacto de parada dos VVs 1 e 2. Esse resultado mostra que se a operação do pátio tivesse que escolher dentre os VVs 1, 2 e 3 um VV para disponibilizar para manutenção o VV3 seria o menos indicado. Mesmo assim o planejamento foi cumprido dentro do turno. O planejamento ficou da seguinte forma: lotes 1, 6, 7, 9 e 10 na rota 24, lotes 3 e 8 na rota 52 e os lotes 2, 4 e 5 na rota 2.

Figura 23 - Gráfico de Gantt Instância 29

Lote \ UT	Rotas																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99											
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 9										6	22	86	48	50	55	60	65	70	99			
Lote 10											6	22	86	48	50	55	60	65	70	99		
Lote 3			11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96									
Lote 8									11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96			
Lote 2				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100									
Lote 4					2	17	33	85	49	54	59	64	69	100								
Lote 5							2	17	33	85	49	54	59	64	69	100						

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 30, Figura 24, avaliou os impactos causados pela parada de manutenção do VV3. A FO passou de 110 UTs para 116 UTs, ao contrário das Instâncias 28 e 29 que avaliaram o impacto de parada dos VVs 1 e 2. Esse resultado mostra que além do VV3, o VV4 também impactará de forma significativa na operação do pátio. O planejamento foi cumprido dentro do turno. O planejamento ficou da seguinte forma: lotes 2, 7 e 10 na rota 8, lotes 1, 6 e 9 na rota 10, lotes 3 e 5, rota 52 e por fim lotes 4 e 8, rota 53.

Figura 24 - Gráfico de Gantt Instância 30

Lote \ UT	Rotas																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Lote 2			2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 7								2	17	33	85	49	54	59	64	69	100					
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100		
Lote 1		2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 6							2	17	33	85	51	56	61	66	71	98						
Lote 9										2	17	33	85	51	56	61	66	71	98			
Lote 3					11	81	40	68	88	47	53	58	63	68	73	96						
Lote 5							11	81	40	68	88	47	53	58	63	68	73	96				
Lote 4					11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97							
Lote 8									11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97			

Legenda	
Rota 8	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

Dentre os 5 VVs onde analisou-se o impacto em disponibilizar para a manutenção, Instância 31, Figura 25, mostra que o VV5 é o VV que mais irá impactar na operação. Apesar de não ser o VV que mais está presente nas rotas é o VV que está presente na rota mais rápida, a rota 2. Mesmo assim ainda foi possível planejar todos os lotes dentro do turno. O planejamento ficou da seguinte forma: lotes 1, 5, 6, 8 e 9 na rota 24, lotes 2, 3 e 4 pela rota 10, lote 10 na rota 52 e por fim lote 7 pela rota 53.

Figura 25 - Gráfico de Gantt Instância 31

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 8									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 9										6	22	86	48	50	55	60	65	70	99				
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 3				2	17	33	85	51	56	61	66	71	98										
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 10											11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	99		
Lote 7								11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97					

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

As Instâncias 32 a 39 tinham por objetivo avaliar os impactos causados pelos VVs sendo disponibilizados para manutenção em conjunto. A Instância 32, Figura 26, avaliou os possíveis impactos causados por se disponibilizar os VVs 1 e 2 simultaneamente para a manutenção. Esses VVs parados em conjunto são responsáveis por tornar indisponíveis 29 rotas, porém mesmo com 29 rotas paradas o tempo de estadia dos lotes não foi afetado. Esse fato se deu devido os VVs 1 e 2 fazerem parte das rotas mais longas. Como o CPLEX busca planejar sempre o menor tempo de estadia para todos os lotes, o resultado encontrado foram as rotas mais curtas, onde se destaca a rota 2 da qual esses VVs não fazem parte. O planejamento ficou da seguinte forma: lotes 1, 5, 6, 7 e 9 na rota 24, lotes 2, 4 e 8 na rota 10 e, por fim, os lotes 3 e 10 na rota 2.

Figura 26 - Gráfico de Gantt Instância 32

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100			

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 33, Figura 27, avaliou os possíveis impactos causados por se disponibilizar os VVs 1 e 3 simultaneamente para a manutenção. Esses VVs parados em conjunto são responsáveis por tornar indisponíveis 39 rotas aumentando o valor da FO para 114 UTs. Mesmo assim, foi possível realizar o deslocamento dos lotes dentro do turno. O planejamento ficou da seguinte forma: lotes 1, 5, 6, 9 e 10 na rota 24, lotes 2, 5, lote 7 pela rota 8 e por fim, lotes 3 e 8 pela rota 53.

Figura 27 - Gráfico de Gantt Instância 33

		Rotas																					
Lote \ UT	UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Lote 1			6	22	86	48	50	55	60	65	70	99											
Lote 4						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 6								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 9											6	22	86	48	50	55	60	65	70	99			
Lote 10												6	22	86	48	50	55	60	65	70	99		
Lote 2				2	17	33	85	49	54	59	64	59	64	69	100								
Lote 5						2	17	33	85	49	54	59	64	69	100								
Lote 7								2	17	33	85	49	54	59	64	69	100						
Lote 3					11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97								
Lote 8										11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97			

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 8	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor 1

A Instância 34, Figura 28, avaliou os possíveis impactos causados ao se disponibilizar para manutenção os VVs 1, 2 e 3 simultaneamente. Mesmo disponibilizando para manutenção 3 VVs simultaneamente o FO foi 118 UTs, mesmo assim o planejamento se manteve dentro do turno de trabalho. Esse resultado foi obtido devido estar disponíveis os VVs 4 e 5 que possuem rotas de acesso mais rápidas devido a quantidade menor de trechos. O planejamento ficou da seguinte forma: lotes 1, 3, 5, 7 e 8 na rota 24 e os demais lotes na rota 2.

Figura 28 - Gráfico de Gantt Instância 34

		Rotas																							
Lote \ UT	UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lote 1			6	22	86	48	50	55	60	65	70	99													
Lote 3					6	22	86	48	50	55	60	65	70	99											
Lote 5							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99									
Lote 6								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 7									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 8										6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 2				2	17	33	85	49	54	59	64	59	64	69	100										
Lote 4						2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 9											2	17	33	85	49	54	59	64	59	64	69	100			
Lote 10												2	17	33	85	49	54	59	64	59	64	69	100		

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 35, Figura 29, avaliou o impacto em disponibilizar para manutenção os VVs 2, 3 e 4 simultaneamente. O CPLEX encontrou o valor de 115 UTs para a FO, o que significa aumento do tempo de estadia dos lotes em virtude desses 3 VVs parados juntos refletirem na paralização de 51 rotas, porém devido ao fato do VV5, equipamento de descarga integrante da rota mais rápida, rota 2, estar disponível foi possível deslocar todos os lotes e descarrega-los dentro do turno de trabalho. O planejamento ficou da seguinte forma: lotes 1, 4, 5, 7, 6 e 4 na rota 2 e os demais lotes na rota 53.

Figura 29 - Gráfico de Gantt Instância 35

Lote \ UT	Rotas																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lote 1		6	17	33	85	49	54	59	64	69	100													
Lote 4					6	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 5						6	17	33	85	49	54	59	64	69	100									
Lote 7								6	17	33	85	49	54	59	64	69	100							
Lote 6								6	17	33	85	49	54	59	64	69	100							
Lote 4					6	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 2		11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96												
Lote 3				11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96										
Lote 9										11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96				
Lote 10											11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96			

**Legenda**

Rota 2  Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Rota 53  Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 36, Figura 30 avaliou os impactos causados pela manutenção dos VVs 3, 4 e 5 simultaneamente. Nessa Instância constatou-se que a paralização do VV5 (VV integrante da rota 2, rota de menor tempo de deslocamento) somado a outros 2 VVs parados simultaneamente afeta diretamente no tempo de estadia dos lotes fazendo com que o tempo total de deslocamento exceda o turno de trabalho (24 UTs). Para essa Instância o CPLEX encontrou para todos os lotes o planejamento pela rota 37 e FO igual a 161 UTs.

Figura 30 - Gráfico de Gantt Instância 36

Lote \ UT	Rotas																										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Lote 1		11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96											
Lote 2			11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96										
Lote 3				11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96									
Lote 4					11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96								
Lote 5						11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96							
Lote 6							11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96						
Lote 7								11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96					
Lote 8									11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96				
Lote 9										11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96			
Lote 10											11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96		
Rota 37						Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga																					

Fonte: Elaborado pelo autor 2

Assim como na Instância 36, a Instância 37, Figura 31, constatou-se também que a paralisação do VV5 (VV integrante da rota 2, rota de menor tempo de deslocamento) somado ao VV4 afetou diretamente no tempo de estadia dos lotes fazendo com que nessa Instância também o tempo total de deslocamento dos lotes exceda o turno de trabalho (24 UTs). Para essa Instância o CPLEX encontrou FO igual 161 UTs onde os lotes 1, 3, 4, 5 e 7 foram planejados para a rota 37 e os demais lotes para a rota 44. Outro ponto observado foi que não se trata apenas da quantidade de VVs paralisados e sim quais VVs paralisados. Na Instância 34 por exemplo verificou-se que a paralisação dos VVs 1 a 3 simultaneamente não impactou no planejamento dos lotes, porém os VVs 4 e 5 impactou. Esse fato ocorreu devido esses VVs fazerem parte de rotas menores, ou seja, com menor quantidade de trechos a serem percorridos o que impacta diretamente no tempo total de estadia dos lotes.

Figura 31 - Gráfico de Gantt Instância 37

Lote \ UT	Rotas																										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Lote 1		11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96											
Lote 3				11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96									
Lote 4					11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96								
Lote 5						11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96							
Lote 7							11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96						
Lote 2			14	83	30	43	88	90	46	51	56	92	94	63	67	72	97										
Lote 6							14	83	30	43	88	90	46	51	56	92	94	63	67	72	97						
Lote 8									14	83	30	43	88	90	46	51	56	92	94	63	67	72	97				
Lote 9										14	83	30	43	88	90	46	51	56	92	94	63	67	72	97			
Lote 10											14	83	30	43	88	90	46	51	56	92	94	63	67	72	97		
Rota 37						Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga																					
Rota 44						Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga																					

Fonte: Elaborado pelo autor 3



Figura 33 - Gráfico de Gantt Instância 39

Lote \ UT	Rotas																										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Lote 2				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100														
Lote 4				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100														
Lote 10										2	17	33	85	49	54	59	64	69	100								
Lote 1		2	17	33	85	51	56	61	66	71	98																
Lote 7							2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 9									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 5					11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96												
Lote 6						11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96											
Lote 3				13	63	29	68	73	83	30	43	89	90	47	53	58	68	73	96								
Lote 8									13	63	29	68	73	83	30	43	89	90	47	53	58	68	73	96			

Legenda	
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e W onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e W onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e W onde foi realizada a descarga
Rota 80	Trechos percorridos ao longo da rota e W onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

As Instâncias de 40 a 50 avaliaram os impactos em disponibilizar para a manutenção mais de um trecho simultaneamente. As Instâncias de 40 a 46 abrangeram os trechos mais próximos aos VVs e as Instâncias 47 a 50 abrangeram os trechos na chegada do pátio.

A Instância 40, Figura 34, avaliou o impacto de disponibilizar para a manutenção os trechos 54 e 55 simultaneamente. O CPLEX encontrou FO igual a 119 UTs e apesar da paralização desses trechos impactar em na paralização de 33 rotas todo planejamento pode ser cumprido dentro do turno de trabalho. O planejamento de rota dos lotes ficou da seguinte forma: lotes 2, 6 e 7 rotas 10, lotes 1, 3 e 5 rotas 52, lotes 8 e 10 rotas 44 e lotes 4 e 9 rotas 53.

Figura 34 - Gráfico de Gantt Instância 40

		Rotas																						
Lote \ UT	UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Lote 2				2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 6								2	17	33	85	51	56	61	66	71	98							
Lote 7									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98						
Lote 1			11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96											
Lote 3					11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96									
Lote 5							11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96							
Lote 8											9	25	38	87	45	91	51	56	61	66	71	98		
Lote 10												9	25	38	87	45	91	51	56	61	66	71	98	
Lote 4						11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97								
Lote 9												11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97		

Legenda	
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 44	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Instância 41, Figura 35, foram avaliados os impactos causados por disponibilizar para a manutenção os trechos 55 e 56. Ao paralisar esses 2 trechos 59 rotas ficam indisponíveis. O CPLEX encontrou FO igual a 161 UTs e o planejamento excedeu o turno de trabalho. Constatou-se que disponibilizar para manutenção esses dois trechos juntos afeta diretamente no tempo de estadia dos lotes. Os lotes 1, 3, 4, 5 e 7 foram planejados para a rota 37 e os demais lotes para a rota 44.

Figura 35 - Gráfico de Gantt Instância 41

		Rotas																								
Lote \ UT	UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Lote 1			11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96									
Lote 3					11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96							
Lote 4						11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96						
Lote 5							11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96					
Lote 7									11	81	40	88	46	52	57	62	63	64	67	72	97	73	96			
Lote 2				14	83	30	43	88	90	46	51	56	92	94	63	67	72	97								
Lote 6								14	83	30	43	88	90	46	51	56	92	94	63	67	72	97				
Lote 8										14	83	30	43	88	90	46	51	56	92	94	63	67	72	97		
Lote 9											14	83	30	43	88	90	46	51	56	92	94	63	67	72	97	
Lote 10												14	83	30	43	88	90	46	51	56	92	94	63	67	72	97

Rota 37	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 44	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 42, Figura 36, avaliou os impactos em disponibilizar para a manutenção os trechos 55, 56 e 57. Assim como na Instância 41, concluiu-se que disponibilizar para manutenção esses três trechos juntos afeta diretamente no tempo

de estadia dos lotes. Todos os lotes foram planejados para a rota 23. Para essa Instância o CPLEX encontrou FO igual a 161 UTs.

Figura 36 - Gráfico de Gantt Instância 42

		Rotas																										
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	
Lote 1		11	81	40	88	46	52	54	62	63	64	67	72	97	73	96												
Lote 2			11	81	40	88	46	52	54	62	63	64	67	72	97	73	96											
Lote 3				11	81	40	88	46	52	54	62	63	64	67	72	97	73	96										
Lote 4					11	81	40	88	46	52	54	62	63	64	67	72	97	73	96									
Lote 5						11	81	40	88	46	52	54	62	63	64	67	72	97	73	96								
Lote 6							11	81	40	88	46	52	54	62	63	64	67	72	97	73	96							
Lote 7								11	81	40	88	46	52	54	62	63	64	67	72	97	73	96						
Lote 8									11	81	40	88	46	52	54	62	63	64	67	72	97	73	96					
Lote 9										11	81	40	88	46	52	54	62	63	64	67	72	97	73	96				
Lote 10											11	81	40	88	46	52	54	62	63	64	67	72	97	73	96			
		Rota 23					Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga																					

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Instância 43, Figura 37, foram avaliados os impactos causados por disponibilizar para a manutenção os trechos 55 e 57. Ao paralisar esses 2 trechos 50 rotas ficam indisponíveis, porém foi possível manter o planejamento dentro do turno de trabalho. Para essa Instância o CPLEX encontrou FO igual a 161 UTs. Os lotes 1, 3, 4, 5 e 7 foram planejados para a rota 37 e os demais lotes para a rota 44.

O planejamento de rota dos lotes ficou da seguinte forma: lotes 1, 4 e lote 8 na rota 8, lotes 2, 7 e 9 rota 10, lotes 5 e 10 rota 52 e por fim lotes 3 e 6 rota 80.

Figura 37 - Gráfico de Gantt Instância 43

Lote \ UT	Rotas																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lote 1		2	17	33	85	49	54	59	64	59	64	69	100											
Lote 4					2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 8									2	17	33	85	49	54	59	64	69	100						
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98												
Lote 7							2	17	33	85	51	56	61	66	71	98								
Lote 9									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98						
Lote 5						11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96								
Lote 10												11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96		
Lote 3				13	63	29	68	73	83	30	43	89	90	47	53	58	63	68	73	96				
Lote 6							13	63	29	68	73	83	30	43	89	90	47	53	58	63	68	73	96	

Legenda	
Rota 8	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 80	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 44, Figura 38, avaliou o impacto causado em disponibilizar para a manutenção os trechos 58 e 59. Ao paralisar esses 2 trechos 32 rotas ficam indisponíveis, porém foi possível manter o planejamento dentro do turno de trabalho. Para essa Instância o CPLEX encontrou FO igual a 112 UTs. O planejamento de rota dos lotes ficou da seguinte forma: lotes 1, 5, 6 e lote 8 na rota 24, lotes 2, 3 e 7 rota 10 e por fim, lotes 4 e 9 rota 53.

Figura 38 - Gráfico de Gantt Instância 44

Lote \ UT	Rotas																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99													
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99									
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 8									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 9											6	22	86	48	50	55	60	65	70	99				
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98												
Lote 3				2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 7								2	17	33	85	51	56	61	66	71	98							
Lote 4					11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97									
Lote 9								11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97						

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Instância 45, Figura 39, foram avaliados os impactos causados por disponibilizar para a manutenção os trechos 65 e 66. Ao paralisar esses 2 trechos 35 rotas ficam indisponíveis. Porém, mesmo com uma quantidade de rotas paralisadas menor em relação a Instância anterior constatou-se que não possível manter o planejamento dentro do turno de trabalho. Nessa Instância o CPLEX planejou para 5 lotes a rota 80. A rota 80 tem uma quantidade maior de trechos a serem percorridos, fato que impacta diretamente no tempo total de estadia dos lotes. Para essa Instância o CPLEX encontrou FO igual a 142 UTs. Assim como foi já constatado na análise para disponibilizar para a manutenção os VVs simultaneamente, o que mais impacta em tempo de estadia do lote não é a quantidade de trechos ou VVs paralisados, bem como a quantidade de rotas paralisadas. O que mais impacta é paralisar as rotas mais rápidas ou seja com menor quantidade de trechos. O planejamento de rota dos lotes ficou da seguinte forma: lotes e, 4 e 10 rota 2, lotes 1, 7, 9, 3 e 8 rota 80 e por fim, lotes 5 e 6 rota 52.

Figura 39 - Gráfico de Gantt Instância 45

Lote \ UT	Rotas																										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Lote 2				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100														
Lote 4					2	17	33	85	49	54	59	64	69	100													
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100							
Lote 1		13	63	29	68	73	83	30	43	89	90	47	53	58	68	73	96										
Lote 7								13	63	29	68	73	83	30	43	89	90	47	53	58	68	73	96				
Lote 9									13	63	29	68	73	83	30	43	89	90	47	53	58	68	73	96			
Lote 3				13	63	29	68	73	83	30	43	89	90	47	53	58	68	73	96								
Lote 8									13	63	29	68	73	83	30	43	89	90	47	53	58	68	73	96			
Lote 5						11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96											
Lote 6							11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96										

Legenda	
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 80	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância que avaliou os impactos em paralisar mais de um trecho nas proximidades dos VVs foi a rota 46, Figura 40. Essa Instância avaliou o impacto em disponibilizar para manutenção os trechos 66 e 67. Ao paralisar esses 2 trechos 33 rotas ficam indisponíveis, porém foi possível manter o planejamento dentro do turno de trabalho. Para essa Instância o CPLEX encontrou FO igual a 112 UTs. O planejamento de rota dos lotes ficou da seguinte forma: lotes 1, 6, 7, 9 e lote 10 pela rotas 24, lotes 2, 4 e 5 na rota 10 e por fim, lotes 3 e 8 pela rota 52.

Figura 40 - Gráfico de Gantt Instância 46

Lote \ UT	Rotas																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99														
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99									
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 9										6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 10											6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 2			2	17	33	85	49	54	59	64	69	100													
Lote 4					2	17	33	85	49	54	59	64	69	100											
Lote 5						2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 3			11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96												
Lote 8									11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96						

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

As Instâncias 47 a 50 avaliaram os impactos em disponibilizar para a manutenção mais de um trecho localizado na chegada do pátio. Na Instância 47, foi avaliado o impacto em disponibilizar para a manutenção os trechos 16, 17 e 18. Ao paralisar esses 3 trechos 24 rotas ficam indisponíveis, porém foi possível manter o planejamento dentro do turno de trabalho. Para essa Instância o CPLEX encontrou FO igual a 115 UTs. O planejamento de rota dos lotes ficou da seguinte forma: lotes 1, 5, 8, 9 e 10 rotas 24, lote 6 pela rota 53, lotes 3 e 4 rota 26 e por fim lotes 2 e 7 rota 52.

Figura 41 - Gráfico de Gantt Instância 47

Lote \ UT	Rotas																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99														
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99										
Lote 8									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 9										6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 10											6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 6							11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96								
Lote 3				11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97											
Lote 4					11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97										
Lote 2			6	22	86	48	85	51	56	61	66	71	98												
Lote 7								6	22	86	48	85	51	56	61	66	71	98							

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 26	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância 48, Figura 42, avaliou o impacto causado em disponibilizar para a manutenção os trechos 4-9. Ao paralisar esses 6 trechos 38 rotas ficam indisponíveis, porém foi possível manter o planejamento dentro do turno de trabalho. Para essa Instância o CPLEX encontrou FO igual a 116 UTs. O planejamento de rota dos lotes ficou da seguinte forma: lotes 1, 4, e lote pela 5 rotas 2, lotes 2, 7 e 9 rota 10, lote 8 rota 9, lote 6 rota 52 e lotes 3 e 10 rota 53.

Figura 42 - Gráfico de Gantt Instância 48

Lote \ UT	Rotas																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Lote 1		2	17	33	85	49	54	59	64	59	64	69	100											
Lote 4					2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 5						2	17	33	85	49	54	59	64	69	100									
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98												
Lote 7								2	17	33	85	51	56	61	66	71	98							
Lote 9										2	17	33	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 8										2	17	33	85	48	50	55	60	65	70	99				
Lote 6							11	81	40	88	47	53	58	63	68	73	96							
Lote 3				11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97										
Lote 10											11	81	40	88	46	52	57	62	67	72	97			

Legenda	
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 52	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 9	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 53	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Instância 49, Figura 43, foram avaliados os impactos causados por disponibilizar para a manutenção os trechos 10,11 e 12. Mesmo paralisando esses 3 foi possível manter o planejamento dentro do turno de trabalho. Para essa Instância o CPLEX encontrou FO igual a 110 UTs resultado idêntico ao da Instância 1 em que nenhum trecho ou VV foi disponibilizado para a manutenção. O planejamento de rota dos lotes ficou da seguinte forma: lotes 1, 5, 6, 7 e 9 rota 24, lotes 2, 4 e 8 rota 10 e lotes 3 e 10 rota 2.

Figura 43 - Gráfico de Gantt Instância 49

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100			

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

A Instância que avaliou os impactos em paralisar mais de um trecho nas na chegada do pátio foi a Instância 50, Figura 44. Essa Instância avaliou o impacto em disponibilizar para manutenção os trechos 13, 14 e 15. Assim como nas demais Instâncias que também avaliam os impactos em se paralisar um conjunto de trechos na entrada do pátio nessa Instância constatou-se que disponibilizar para manutenção, esse grupo de trechos não impacta no tempo de estadia dos lotes. Assim como na Instância 49, o CPLEX encontrou FO igual a 110 UTs resultado idêntico ao da Instância 1 em que nenhum trecho ou VV foi disponibilizado para a manutenção. O planejamento de rota dos lotes ficou da seguinte forma: lotes 1, 5, 6, 7 e 9 rota 24, lotes 2, 4 e 8 rota 10 e lotes 3 e 10 rota 2.

Figura 44 - Gráfico de Gantt Instância 50

Lote \ UT	Rotas																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99											
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99				
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98										
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98								
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98				
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100									
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100		

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme os resultados apresentados, o modelo mostrou-se eficiente em planejar as rotas e também em identificar as rotas e equipamentos críticos para a manutenção.

## 6 CONCLUSÕES

Essa dissertação abordou o problema de planejamento de deslocamento de lotes de vagões em pátios ferroviários com foco em redução do tempo de estadia dos mesmos. Para resolver o problema foi proposto um modelo matemático inspirando no MRCPS para planejar o trecho onde lote seria estacionado no momento de sua chegada ao pátio, a rota a percorrer e o VV onde foi realizada a atividade de descarga. Para validar o modelo, foram utilizados os dados do Pátio Ferroviário de Tubarão. Durante a pesquisa realizada constatou-se que foi eficiente em identificar pontos críticos e gargalos do Pátio Ferroviário de Tubarão. Verificou-se que o pátio que possui grande capacidade operacional. Também foi possível identificar as rotas, trechos e VVs mais críticos para a operação do pátio.

As Instâncias que avaliaram o impacto de se disponibilizar para a manutenção individualmente 25 trechos que tornariam indisponíveis até 38 rotas e as Instâncias que avaliaram o impacto de se disponibilizar para a manutenção os VVs individualmente que tomariam indisponíveis até 20 rotas. Nessas instâncias detectou-se que o que mais impactou não é a grande quantidade de rotas paralisadas simultaneamente e sim paralisar trechos e VVS que fazem parte das rotas mais rápidas.

O que torna as rotas mais rápidas é quantidade de trechos, dentre as rotas menores destaca-se a rota 2 que direciona do trecho 2 ao VV5, rota com 30 minutos a menos que as demais. O tempo de estadia dos lotes em todos os momentos onde se disponibilizou para manutenção trechos dessa rota e o VV5. Desta forma, identificou-se que essa é a rota mais crítica do pátio cabendo as equipes de manutenção e operação atenção especial para com a mesma. Sendo assim, toda e qualquer tomada decisão que opte por disponibilizar essa rota para uma grande parada de manutenção ou até mesmo desativar essa rota deve ser realizada com muito critério visto que a indisponibilidade da mesma pode colocar em risco a operação do pátio e também não permitir atender a um possível aumento de demanda do mercado.

Ao se avaliar os trechos sendo disponibilizados simultaneamente para manutenção, constatou-se que os trechos que estão localizados próximos aos VVs impactam mais na operação que os trechos da chegada do pátio. Sendo assim, as grandes

manutenções na entrada do pátio podem ser realizadas em mais de um trecho simultaneamente sem perdas para operação maximizando os recursos para esse fim. Porém, esse tipo de estratégia não pode ser adotado para os trechos que estão próximos aos VVs.

No que tange a disponibilizar para a manutenção mais de um VV simultaneamente em manutenção observou-se que os VVs 4 e 5 são críticos, visto que os mesmos fazem parte das rotas mais rápidas ou seja as rotas menores (com menor quantidade de trechos). Em virtude de sua importância operacional os mesmos devem ser disponibilizados para a manutenção mediante critério rigoroso e ações que garantam sua disponibilidade operacional são de fundamental importância.

Sendo assim, conclui-se que o Pátio de Tubarão possui grande capacidade operacional destacando-se como pontos chave a rota 2 (com seus trechos e VV5), os VVs 4 e 5 como pontos que devem receber atenção especial na tomada de decisão em disponibilizar para manutenção bem como esforços voltados para garantir a disponibilidade operacional. Os trechos próximos aos VVs também se destacaram visto que decisões levando em consideração disponibilizar mais de um trecho simultaneamente para manutenção pode impactar diretamente no tempo de estadia dos lotes. No entanto, quando se trata de disponibilizar para a manutenção mais de um trecho localizado na chegada do pátio simultaneamente observou-se que os impactos podem ser menores e/ou inexistentes dependendo do tempo em que os trechos ficarão parados.

Como recomendação para trabalhos posteriores, sugere-se o desenvolvimento de uma meta-heurística para resolver instâncias de maior porte e avaliar o ganho financeiro sobre a redução do tempo de estadia dos lotes.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR:14724**. Rio de Janeiro, 2011. 11 p.
- ADLBRECHT, J.; HÜTTLER, B.; ZAZGORNİK, J.; GRONALT, M. (2015). **The train marshalling by a single shunting engine problem**. *Transportation Research Part C*, 58, 56-72.
- AHNER, L.P.L.; RABELLO, A. V.; ROSA, R. A.; SILVARES, D.C.M.; **Modelo Matemático Aplicado ao Planejamento da Atracação de Navios Integrado a alocação de rotas de transportadores de navios**. LI Congresso SBPO, SBPO, Limeira, SP.
- ANTF. Associadas - Vale, EFVM. Brasília: **Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários**. Disponível em: <<http://www.antf.org.br/index.php/associadas/vale/efvm/apresentacao>>. Acesso em: 31 outubro 2019.
- ARTIGUES, C.; MICHELON, P.; REUSSER, S. (2003). **Insertion techniques for static and dynamic resource-constrained project scheduling**. *European Journal of Operational Research*, 149, 249-267.
- ARTIGUES, C. (2017). **On the strength of time-indexed formulations for the resource-constrained project scheduling problem**. *Operations Research Letters*, 45, 154-159.
- BLASUM, U.; BUSSIECK, M. R.; HOCHSTÄTTLER, W.; MOLL, C.; SCHEEL, H. H.; WINTER, T. (1999). **Scheduling trams in the morning**. *Mathematical Methods of Operations Research*.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; JAEHN, F.; PESCH, E. (2012). **Shunting yard operations: Theoretical aspects and applications**. *European Journal of Operational Research*, 220, 1–14.
- BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; JAEHN, F.; PESCH, E. (2013). **A Survey on Container Processing in Railway Yards**. *Transportation Science*, pp. 312–329.
- Bohlin, M.; Gestrelus, S.; Dahms, F.; Mihalak, M.; Flier, H (2015). **Optimization Methods for Multistage Freight Train Formation**. *Transportation Science*, 823-840
- BRUCKER, P.; KNUST, S. (2012) **Complex Scheduling**. Springer-Verlag, Berlim.
- CNT. Disponível em: <[cnt.org.br/imprensa/noticia/volume-cargas-transportadas](http://cnt.org.br/imprensa/noticia/volume-cargas-transportadas)>. Acesso em 10/10/2019.
- Chen, X.; He, S.; Li, T.; Li, Y. (2018). **A Simulation Platform for Combined Rail/Road Transport in Multiyards Intermodal Terminals**. *Journal of Advanced Transportation*.
- CORDEAU, J. F.; TOTH, P.; VIGO, D. (1998). **A survey of optimization models for train routing and scheduling**. *Transportation Science*, 32(4), 380–404.

DAHLHAUS, E.; HORAK, P.; MILLER, M.; RYAN, J. F. (2000). **The train marshalling problem**. *Discrete Applied Mathematics*, 103, 41–54.

D'ARIANO, A.; PACCIARELLI, D.; PRANZO, M. (2007). **A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network**. *European Journal of Operational Research*. 183/643-657

DOTOLI, M.; EPICOCO, N.; FALAGARIO, M.; SEATZU, C.; TURCHIANO, B. (2017). **A Decision Support System for Optimizing Operations at Intermodal Railroad Terminals**. *Ieee transactions on systems, man, and cybernetics: systems*, vol. 47, no. 3.

DREXL, A.; NISSEN, R.; PATTERSON, J.; SALEWSKI, F. (2000) ProGen/πx - **An instance generator for resource-constrained project scheduling problems with partially renewable resources and further extensions**. *European Journal of Operational Research*. 125/59-72

GEN, M.; CHENG, R.; LIN, L. (2010) **Network Models and Optimization: Multiobjective Genetic Algorithm Approach**. Springer, London.

Gestrelus, S.; Aronsson, M.; Joborn, M.; Bohlin, M.(2017). **Towards a comprehensive model for track allocation and roll- time scheduling at marshalling yards**. *Journal of Rail Transport Planning & Management* 7, 157-170.

HANSMANN, R.; RIEGER, T.; ZIMMERMANN, U. (2014) **Flexible job shop scheduling with blockages**. *Mathematical Methods of Operations Research*. 79. 135-161.

HARTMANN, S.; BRISKORN, D. (2010) **A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem**. *European Journal of Operational Research*. 207/1-14

HILLIER, F., LIEBERMAN, G. (2006) – **Introdução à Pesquisa Operacional** – Editora McGraw Hill.

IBM. **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6**. Disponível em: <ibm.com>. Acesso em: 20 nov. 2019.

KELLENBRINK, C.; HELBER S. (2015). **Scheduling resource-constrained projects with a flexible project structure**. *European Journal of Operational Research*, 246 (2), 379–391.

KHALED, A.; JIN, M.; CLARKE, D.; HOQUE, M. (2015). **Train design and routing optimization for evaluating criticality of freight railroad infrastructures**. *Transportation Research Part B*, 71: 71-84.

KHOSHNIYAT, F. (2012) **Simulation of Planning Strategies for Track Allocation at Marshalling Yards**. Tese de Dissertação de Mestrado em Ciências. Division of Traffic and Logistics, Railway group. KTH Royal Institute of Technology. Estocolmo. (2012)

KOPANOS, G.; KYRIAKIDIS, T.; GEORGIADIS, M. (2014) **New continuous-time and discrete-time mathematical formulations for resource-constrained project scheduling problems**. *Computers and Chemical Engineering*. 68, 96-106.

KRETER, S.; RIECK, J.; ZIMMERMANN, J. (2016) **Models and solution procedures for the resource-constrained scheduling problem with general temporal constraints and calendars**. European Journal of Operational Research. 251: 387-403.

HAAHR, J. T.; LUSBY, R. M.; WAGENAAR, J. C. (2017) **Optimization methods for the Train Unit Shunting Problem**. European Journal of Operational Research 262 981–995.

HARTMANN, S. (1999). **Project Scheduling under Limited Resources Models, Methods, and Applications**. University of Kiel Institut für Betriebswirtschaftslehre Olshausenstr.40 24118 Kiel, Germany, 219.

HARTMANN, S.; BRISKORN, D. (2010) **A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem**. European Journal of Operational Research. 207/1-14

HE, S.; SONG, R.; CHAUDHRY, S. S. (2000). **Fuzzy dispatching model and genetic algorithms for railyards operations**. European Journal of Operational Research.

HE, S.; SONG, R.; CHAUDHRY, S. S. (2003). **An integrated dispatching model for rail yards operations**. Computers and Operations Research. 30: 939-966.

Li, B.; Liu, S.; Lin, R.; Wang, J.; Sun, M.; Wang, X.; Liu, C.; Wu, J.; Xiao, J.(2019). **The location-allocation model for multi-classification-yard location problem**. Transportation Research Part E 122 283–308.

LAURENT, A.; Deroussi, L.; Grange N.; Norre S. (2017) **A new extension of the RCPSP in a multi-site context: Mathematical model and metaheuristics**. Computers & Industrial Engineering 112 (2017) 634–644 Contents.

LIU, S.; KOZAN, E. (2009) **Scheduling trains as a blocking parallel-machine job shop scheduling problem**. Computers and Operations Research, 36 p. 2840-2852.

Liu, J.; He, S.; Zhang, M. (2020). **Study on Cargo Products' Layout Optimization of Truck Railway Line**. Hindawi.

MARINOV, M.; VIEGAS, J. (2011) **Analysis and Evaluation of Double-Ended Flat-Shunted Yard Performance Employing Two Yard Crews**. Journal of Transportation Engineering. 137 (5): 319-326.

MIKA, M.; WALIGÓRA, G.; WEGLARZ, J. (2008) **Tabu search for multi-mode resource constrained project scheduling with schedule-dependent setup times**. European Journal of Operational Research 187 (3) 1238–1250.

MOHAMED, A.; QIYUAN, P (2011) **Optimization model of freight trains stations: extend hub-and-spoke system**. School of Transportation and Logistics.

NABER, A. (2017) **Resource-constrained project scheduling with flexible resource profiles in continuous time**. Computers and Operations Research, 84 p. 33-45.

OKUBO, H.; MIYAMOTO, T.; YOSHIDA, S.; MORI, K.; KITAMURA, S.; IZUI, Y. (2015) **Project scheduling under partially renewable resources and resource consumption during setup operations**. Computers & Industrial Engineering, p. 91-99.

PIMENTA, L.; ROSA, R.; ZANOTTI, L.; ARRIVABENI, B.; LOUZADA, P.; VIEIRA, J. (2016). **Modelo matemático para o planejamento de manobras de lotes de vagões em um terminal ferroviário**. XXX Congresso ANPET, ANPET 2016, Rio de Janeiro.

PIMENTA, L.; ROSA, R. (2017). **Planejamento da sequência das atividades e a utilização dos recursos para atendimento aos vagões em terminais ferroviários**. XXXI Congresso ANPET, ANPET, 2017, Recife.4

PIMENTA, L. **Planejamento das atividades e da utilização dos recursos na operação de vagões em terminais ferroviários**. (2017). 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2017.

PRITSKER, A.; WATTERS, L.; WOLFE, P. (1969) **Multiproject Scheduling with Limited Resources: A Zero-One Programming Approach**. Management Science, Vol. 16, p. 93-108.

REIS JUNIOR, W.; LOPES, R. (2003) **Um otimizador branch & bound paralelo para manobras em pátios ferroviários**. XXXV Congresso SBPO, SBPO, Natal.

ROSA, R. A. **Operação Ferroviária**. Rio de Janeiro: Ed. LTC, v.01, 2016.

SABINO, J. A.; LEAL, J. E.; STÜTZLE, T.; BIRATTARI, M. (2010). **A multi-objective ant colony optimization method applied to switch engine scheduling in railroad yards**. Pesquisa Operacional (Impresso), v. 30, p. 487-514.

Saeednia, M.; Bruckmann, D.; Weidmann, U. (2015). **Event-Based Model for Optimizing Shunting Yard Operations**. Transportation Research Board, Washington, pp. 90–94.

SILVA, E.; MENEZES, E. (2005). **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed., Florianópolis: UFSC. 138 p.

SHI, T.; ZHOE, X. (2015) **A mixed integer programming model for optimizing multi-level operations process in railroad yards**. Transportation Research Part B, 80, p. 19-39.

VANHOUCKEA, M.; COELHO, J. (2015) **An approach using SAT solvers for the RCPSP with logical constraints**. European Journal of Operational Research 249 (2016) 577–591 .

VERGARA, S. C. (2011). **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 13. ed. São Paulo: Atlas.

VALE. **Sobre a Vale**. Notícias. EFVM. Rio de Janeiro: Site institucional da Vale S.A.. Disponível em: < <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/trem-passageiros-estrada-ferro-vitoria-minas-tem-pagina-reformulada.aspx>>. Acesso em: 31 outubro 2019.

WANG, Z.; & CEDER A. (2017). **Efficient design of freight train operation with double-hump yards.** Journal of the Operational Research Society 68, 1600–1619

WINTER, T.; ZIMMERMANN, U. T. (2000). **Real-time dispatch of trams in storage yards.** Annals of Operations Research, 96, 287–315.

ZHANG, Z. ZHONG, X. (2018). **Time resource trade-off in the robust optimization of resource-constraint project scheduling problem under uncertainty.** Journal of Industrial and Production Engineering, VOL. 35, NO. 4, 243–254.

Zahrani, H. K.; Shahrak, M. H. N.; Sayarshad, H. R. (2020). **An intelligent social-based method for rail-car fleet sizing problem.** Journal of Rail Transport Planning & Management

YAN, F.; GOVERDE, R. M.P. (2019). **Combined line planning and train timetabling for strongly heterogeneous railway lines with direct connections.** Transportation Research Part B 127 20–46.

## APÊNDICE A

Figura 45 - Gráfico de Gantt Instância 9

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100			

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE B

Figura 46 - Gráfico de Gantt Instância 10

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100			

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE C

Figura 47 - Gráfico de Gantt Instância 11

Lote \ UT	Rotas																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99											
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99				
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98										
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98								
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98				
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100									
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100		

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor 4

## APÊNDICE D

Figura 48 - Gráfico de Gantt Instância 12

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100			

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor 5

## APÊNDICE E

Figura 49 - Gráfico de Gantt Instância 13

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99	Lote 1											
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99	Lote 5							
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99	Lote 6						
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99	Lote 7					
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99	Lote 9				
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98	Lote 2										
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98	Lote 4								
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98	Lote 8				
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100	Lote 3									
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100	Lote 10		

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE F

Figura 50 - Gráfico de Gantt Instância 14

		Rotas																						
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99	Lote 1												
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99	Lote 5								
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99	Lote 6							
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99	Lote 7						
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99	Lote 9					
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98	Lote 2											
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98	Lote 4									
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98	Lote 8					
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100	Lote 3										
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100	Lote 10			

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE G

Figura 51 - Gráfico de Gantt Instância 15

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100			

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE H

Figura 52 - Gráfico de Gantt Instância 16

Lote \ UT	Rotas																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99											
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99				
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98										
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98								
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98				
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100									
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100		

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE I

Figura 53 - Gráfico de Gantt Instância 25

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100			

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE J

Figura 54 - Gráfico de Gantt Instância 26

		Rotas																					
Lote \ UT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99												
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99								
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98											
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98									
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98					
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100										
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100			

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE K

Figura 55 - Gráfico de Gantt Instância 27

Lote \ UT	Rotas																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99											
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99				
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98										
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98								
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98				
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100									
Lote 10												2	17	33	85	49	54	59	64	69	100	
<b>Legenda</b> Rota 24 Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga Rota 10 Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga Rota 2 Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga																						

Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE L

Figura 56 - Gráfico de Gantt Instância 28

Lote \ UT	Rotas																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Lote 1		6	22	86	48	50	55	60	65	70	99											
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	99							
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	99						
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	99					
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	99				
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	98										
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	98								
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	98				
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	100									
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	100		

Legenda	
Rota 24	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 10	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga
Rota 2	Trechos percorridos ao longo da rota e VV onde foi realizada a descarga

Fonte: Elaborado pelo autor