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

Planejamento das rotas de manobra dos lotes de vagões em pátios ferroviários visando a redução do tempo total de estadia

Planning of shunting routes for wagon batches in railway yards aiming at reducing total dwell time

Diesther Campos Moreira Silvares[1], **Rodrigo de Alvarenga Rosa**[1]

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

Contato: diesther.silvares@vale.com, (DCMS); rodrigo.a.rosa@ufes.br, (RAR)

Recebido:
16 de maio de 2023
Revisado:
28 de dezembro de 2023
Aceito para publicação:
2 de abril de 2024
Publicado:
15 de maio de 2024
Editor de Área:
Renato da Silva Lima, Universidade Federal de Itajubá, Brasil

Palavras-chave:
Pátios ferroviários.
Manobra ferroviária.
Vagões.
MRCPSP.

Keywords:
Railway yards.
Railway maneuvering.
Railcars.
MRCPSP.

DOI: 10.58922/transportes.v32i2.2921

OPEN ACCESS
CC BY

RESUMO

Os pátios de manobra desempenham um papel importante na ferrovia. As atividades de deslocamento dos lotes no pátio levam de 10% a 50% do tempo de trânsito dos trens. O planejamento de atividades em pátio ferroviário objetiva reduzir o tempo de estadia dos lotes de vagões e melhorar a utilização dos recursos. Para planejar as atividades do pátio e identificar gargalos esse artigo propõe um modelo matemático inspirado no *Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem* (MRCPSP). O MRCPSP atua no sequenciamento de atividades considerando a restrição de alocação de recursos, reduzindo o tempo entre o início e o fim destas atividades. O modelo foi validado com dados reais do Pátio de Tubarão utilizando o IBM CPLEX 12.8. Em todas as instâncias, o tempo total de manobra calculado pelo CPLEX foi inferior ao tempo programado pela equipe do pátio, com reduções de até 2 horas em cada turno de 6 horas.

ABSTRACT

Railway marshaling yards operations play a crucial role in railway systems. The shuffling activities of railcar lots within the yard account for 10% to 50% of train transit time. The planning of railway yard activities aims to minimize the dwell time of railcar lots and enhance resource utilization. To address this, the present study proposes a mathematical model inspired by the Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem (MRCPSP). The MRCPSP focuses on sequencing activities while considering resource allocation constraints, thereby reducing the time between the initiation and completion of these activities. The model's validation utilized real data from the Tubarão Yard, employing IBM CPLEX 12.8. In all instances, the total maneuvering time calculated by CPLEX was lower than the time scheduled by yard operations staff, resulting in reductions of up to 2 hours per 6-hour shift.

1. INTRODUÇÃO

As ferrovias brasileiras ampliaram significativamente o volume de cargas transportado, em 2018 atingiram o recorde de 569 milhões de toneladas úteis, representando um aumento de 125% desde 1997 (CNT, 2019). Boysen et al. (2012) afirmaram que estudos voltados para redução do tempo de estadia dos vagões nestes pátios podem resultar em uma redução significativa de

custos e ganhos de produtividade e eficiência. Os pátios de manobra são de grande importância na operação ferroviária, pois os vagões dispendem nestes pátios cerca de 10% a 50% de sua vida útil.

O material rodante (compostos pelos veículos ferroviários que circulam na ferrovia, e.g., vagões, locomotivas, máquinas de via etc.), sobretudo, os vagões, passam cerca de metade de sua vida útil em pátios ferroviários (Rosa, 2016). 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). As rotas são planejadas para os lotes. Cada rota é uma sequência de trechos de linha férrea a serem percorridos pelo lote mais o trecho de linha férrea onde está instalado o equipamento de descarga, o virador de vagões (VV). 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 percurso que o lote deverá percorrer desde o local onde foi estacionado, no momento de sua chegada ao pátio ferroviário até ao equipamento de descarga, considerando 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 um *layout* de pátio. Os trechos t1 a t8 são segmentos de linha ferroviária separados por Aparelhos de Mudança de Via (AMV). O VV01 e o VV02 são os viradores de vagões onde os lotes serão descarregados. Os trechos t4 e t5 são conhecidos como travessão, servindo para conectar dois trechos (Rosa, 2016). O trecho t4 conecta o trecho t6 ao t2, e o trecho t5 conecta o trecho t2 ao t8. Na Figura 2, pode-se ver em azul uma rota formada pelos trechos t1, t2 e t3 na qual um lote deve percorrer para sair do trecho t1, onde está estacionando, e seguir até o VV01, onde será descarregado.

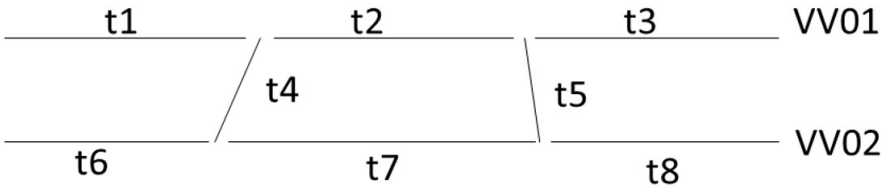


Figura 1. Layout de Pátio.

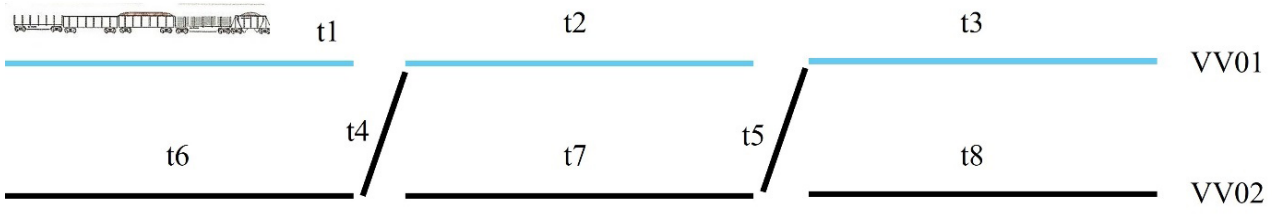


Figura 2. Rota 1- Trecho t1 até VV01.

Para resolver o problema anteriormente descrito, este artigo propõe um modelo matemático inspirado no *Multi-Mode Resource Constrained Project Scheduling Problem* (MRCPSP) (Gen, Cheng e Lin, 2010). O MRCPSP é uma extensão do modelo *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP). O RCPSP considera que existe um único tipo de recurso e o

MRCPSP considera que existem vários tipos de recurso (Gen, Cheng e Lin, 2010). Em relação ao MRCPSP não foi encontrado nenhum artigo na literatura científica que abordasse o problema de planejamento da operação ferroviária. Pimenta e Rosa (2017) trataram o problema em questão, porém de uma forma mais simplificada utilizando o RCPSP. No artigo, os autores utilizaram o RCPSP para planejar o uso dos recursos para carregar e descarregar os lotes de vagões em um terminal ferroviário sem considerar a elaboração das rotas a serem percorridas pelos lotes de vagões. O presente artigo foi inspirado no artigo citado, considerando não só recursos, mas também planejando as rotas a serem percorridas pelos lotes desde a sua área de estacionamento na chegada ao pátio até o virador de vagões onde ocorrerá a descarga da carga do lote manobrado.

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 a operação do equipamento de descarga; cada recurso representa um trecho da ferrovia ou um Virador de Vagão (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).

Na Seção 2, têm-se o referencial teórico que compreende as publicações a respeito de planejamento de operações em pátios ferroviários. Na Seção 3 são apresentadas a descrição do problema, as instâncias de teste e as instâncias de operação do pátio. Na Seção 4 é apresentado o modelo matemático proposto. Na Seção 5 são realizadas as análises dos resultados. Na Seção 6 são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Como o presente artigo trata do problema planejamento de rota em pátio ferroviário utilizando modelo inspirado no MRCPSP, essa seção apresenta uma revisão bibliográfica acerca das publicações sobre planejamento e 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 uma área plana composta por um conjunto de trechos, onde são realizadas as seguintes atividades com os trens: desmembramento, formação, 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. Em 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). As principais referências bibliográficas em relação planejamento de atividades em pátios ferroviários são apresentadas a seguir.

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. Zhou et al. (2014) utilizaram algoritmo genético para planejar as atividades de um pátio de manobras visando minimizar o tempo de estadia dos lotes. Khaled et al. (2015) utilizaram heurística para avaliar o atraso da realização de atividades de uma ferrovia levando em consideração o congestionamento em pátios ferroviários e na circulação. Shi e Zhou (2015) descreveram em seu artigo, uma revisão bibliográfica sobre modelos matemáticos aplicados a pátios ferroviários.

Shi e Zhou (2015) discorreram sobre diversos modelos de programação inteira mista a fim de planejar as atividades que ocorrem em um pátio ferroviário. Adlbrecht et al. (2015) em sua pesquisa utilizaram programação inteira mista para planejar as rotas em um pátio de classificação de vagões. Saeednia, Bruckmann e Weidmann (2015) estudaram como minimizar o custo de manobra por meio de redução do tempo de operação em pátio, porém, não avaliaram a capacidade da via, limitações de recursos e atividade de descarga.

Bohlin et al. (2016) analisaram o problema de formação de trens em um pátio ferroviário. Utilizaram programação inteira simples e heurística baseada em coloração de grafos Pimenta et al. (2016) propuseram um modelo matemático para planejamento operacional de manobras em um terminal ferroviário onde levaram em consideração os recursos necessários. Pimenta (2017) expandiu o modelo que passou a considerar a retenção de recursos e tempo de setup limitando-se somente a planejamento de recursos das atividades do terminal não abordando o planejamento de rotas.

Dotoli et al. (2017) utilizaram programação linear inteira para planejar o carregamento de trens de um terminal intermodal de contêineres na Itália. O modelo elaborado tinha como objetivo maximizar o carregamento levando em conta aspectos tais como peso, valor, tipos de carga dos contêineres. 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. 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.

Haahr, Lusby e Wagenaar (2017) compararam as diferentes formas de abordagem para resolver o problema de planejamento de trens em um pátio ferroviário. Os métodos utilizados foram *Constrain Programming Method* (CPM), *Colum 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. Yan e Goverde (2019) os autores utilizaram Programação Linear Inteira para otimizar o fluxo ferroviário de Xangai.

Após a revisão bibliográfica, pode-se dizer que a proposta deste artigo que propõe uma solução para o setor de transporte ferroviário, especificamente o planejamento de rotas de lotes de trens em pátios ferroviários, que ainda não havia sido proposta. O modelo proposto propõe pela primeira vez resolver o problema de planejamento de rotas em pátios ferroviários por meio da utilização de uma adaptação do MRCPSP englobando a definição do local de estacionamento na chegada e o VV que será usado para descarregar o lote de vagões, considerando eventuais restrições operacionais.

3. ESTUDO DE CASO E GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS

O pátio ferroviário de Tubarão é formado por trechos de linha férrea destinados a recepção e manobra. Possui 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 (VVs) 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 ele 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 trecho, ele 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.

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, 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 desde o 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.

Após validar o modelo com as instâncias de teste foram elaboradas várias instâncias para identificar os pontos de gargalo do pátio. Identificou-se que a operação do pátio é impactada quando se disponibiliza para a manutenção vários trechos ou VVs simultaneamente. Serão apresentadas as instâncias de maior relevância. Sendo assim, as instâncias foram divididas em 3 grupos. O grupo A é composto pela instância inicial onde é avaliada a capacidade do modelo em planejar um turno comum de trabalho. O grupo B avalia o impacto de se disponibilizar para a manutenção mais de um VV simultaneamente e por fim o grupo C 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 1. 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 rota que o equipamento que está em manutenção faz parte.

Tabela 1: Instâncias.

Grupo	Instância	Tipo de Equipamento em manutenção	Número do Equipamento em manutenção	Quantidade de Rotas paralisadas
A	1	-	-	
	2	VV	VV1, VV2	29
	3	VV	VV1, VV3	39
	4	VV	VV1, VV2, VV3	58
	5	VV	VV2, VV3, VV4	51
B	6	VV	VV4, VV5	27
	7	VV	VV3, VV4, VV5	27
	8	VV	VV1, VV3, VV5	83
	9	VV	VV2, VV4	32
	10	Trecho	54, 55	33
	11	Trecho	55, 56	59
	12	Trecho	55, 56, 57	67
	13	Trecho	55, 57	50
	14	Trecho	58, 59	32
C	15	Trecho	65,66	35
	16	Trecho	66, 67	33
	17	Trecho	16, 17, 18	24
	18	Trecho	4, 5, 6, 7, 8, 9	38
	19	Trecho	10, 11, 12	13
	20	Trecho	13,14, 15	15

4. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

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.

Na introdução desse artigo, 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 consequentemente uma rota por vez. Sendo assim, poderá haver conflito para disponibilizá-los, o que pode vir a gerar atrasos para o percurso da rota, consequentemente, para a estadia do lote.

Define-se que nn é o número de atividades, 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 nesse artigo 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, $J = \{1, ..., nn\}$;
K	conjunto de recursos, $K = \{1, ..., ntm\}$;
M	conjunto de rotas, $M = \{1, ..., nmo\}$;
P	conjunto de lotes, $P = \{1, ..., np\}$;
T	unidades de tempo (15 minutos), t $\in \{1, ..., ht\}$;

Parâmetros	
tp_j	Tempo de processamento de qualquer lote para executar a atividade j;
qtm_k	Quantidade de recursos disponíveis k;
s_p	Momento em que o lote p chegará ao pátio;
$r_{j,k}$	Quantidade de recurso k necessário para realizar a atividade j;
$ap_{m,j}$	Tem o valor 1 quando a atividade j é executada na rota m e zero, caso contrário;
$ail_{p,j}$	Determina o trecho j onde o lote p inicia a rota e zero, caso contrário;
$afl_{p,j}$	Determina o VV j onde o lote p será descarregado e zero, caso contrário;
$pr_{m,j,h}$	Tem o valor 1 quando a atividade *h* é predecessora da atividade *j* na rota m 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 termina a atividade j na rota m no instante t e 0, caso contrário;
$mp_{p,m}$	variável binária que assume o valor 1 se o lote p é deslocado na rota m e 0, caso contrário;
$pim_{p,j,m}$	variável binária que assume o valor 0 se o lote p inicia o deslocamento no trecho j na rota m e 1, caso contrário;
$pfm_{p,j,m}$	variável binária que assume o valor 0 se o lote p encerra o deslocamento no VV j a rota m e 1, caso contrário;

A seguir são apresentadas a Função Objetivo (FO) e as restrições do modelo proposto.

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

Sujeito a:

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

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

$$x_{p,j,m,t}=0 \qquad \forall\, j\in J,p\in P,m\in M,t\in T \mid t\leq s_p+tp_j-2 \quad (4)$$

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

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

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

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

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

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

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

$$pim_{p,m,j}\leq lM\left(2-ail_{p,j}-ap_{m,j}\right) \qquad \forall\, p\in P,m\in M,j\in J \quad (12)$$

$$pim_{p,m,j}\geq lm\ (2-ail_{p,j}-ap_{m,j}) \qquad \forall\, p\in P,m\in M,j\in J \quad (13)$$

$$mp_{p,m}\leq\sum 1-pim_{p,j,m} \qquad \forall p\in P,m\in M \quad (14)$$

$$pfm_{p,m,j}\leq lM\left(2-afl_{p,j}-ap_{m,j}\right) \qquad \forall p\in P,m\in M,j\in J \quad (15)$$

$$pfm_{p,m,j}\geq lm\left(2-afl_{p,j}-ap_{m,j}\right) \qquad \forall\, pP,m\in M,\ \ j\in J \quad (16)$$

$$mp_{p,m}\leq\sum 1-pfm_{p,j,m} \qquad \forall\, p\in P,m\in M \quad (17)$$

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

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

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

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

A FO, Equação 1, representa a soma da estadia de todos os lotes no pátio. 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, ele 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. As 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.

Nas Restrições 12 e 13, o termo $\left(2 - ail_{p,j} - ap_{m,j}\right)$ terá valor igual a zero caso o lote p inicie na atividade j ($ail_{p,j} = 1$) e a atividade j esteja sendo executada no modo m ($ap_{m,j} = 1$). O referido termo poderá ainda ter valor igual 1 ou 2 caso os dois parâmetros sejam iguais a zero ou um seja 0 e o outro 1. Desta forma, quando o termo $\left(2 - ail_{p,j} - ap_{m,j}\right)$ for igual a zero, a variável de decisão $pim_{p,m,j}$ terá valor igual a zero, caso contrário, a referida variável assumirá o valor zero ou 1. Nas Restrições 14, caso a atividade j inicial do lote p tenha sido realizada no modo m ($pim_{p,m,j} = 0$), então, o lote p foi realizado no modo m ($mp_{p,m} = 1$).

As Restrições 15, 16 e 17 são análogas às Restrições 12, 13 e 14, sendo a única diferença é que elas consideram a atividade fim do lote p e, então, em vez de usar o parâmetro $ail_{p,j}$ elas utilizam o parâmetro $afl_{p,j}$ e a variável de decisão $pfm_{p,m,j}$. Os dois conjuntos de restrições 12, 13, 14 e 15, 16, 17 garantem juntas que o lote p inicia seu deslocamento (atividade j inicial, ($ail_{p,j} = 1$)) no modo m e termina sua rota (atividade j final ($afl_{p,j} = 1$)) no mesmo modo m ($mp_{p,m} = 1$).

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.

$y_{p,j,m,t} \leq x_{p,j.m,t}$	$\forall\, p \in P, j \in J,\ \ m \in M\ e\ t \in T$	(22)
$y_{p,j,m,t} \leq pfm_{p,m,j}$	$\forall\, p \in P, j \in J,\ \ m \in M\ e\ t \in T$	(23)
$y_{p,j,m,t} \geq x_{p,j.m,t} + pfm_{p,j.m} - 1$	$\forall\, p \in P, j \in J,\ \ m \in M\ e\ t \in T$	(24)
$y_{p,j,m,t} \in \{0,1\}$	$\forall\, p \in P, j \in J,\ \ m \in M\ e\ t \in T$	(25)

Assim, a FO, Equação 1, é escrita de forma linear conforme a Equação 26.

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

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). Assim, tem-se 5.208.840 variáveis de decisão inteiras.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Para resolver o modelo matemático proposto, foi utilizado o solver IBM® ILOG® CPLEX® Versão 12.8 (IBM, 2019) em um computador com processador Intel ® i7 com 32 GB de memória RAM. Para todas as instâncias o CPLEX encontrou solução ótima, ou seja, o Gap igual 0,00%. Os resultados do CPLEX e dos ganhos operacionais encontram-se na Tabela 2, sendo a coluna (1) o grupo, a coluna (2) se refere ao número da instância, a coluna (3) apresenta a FO, em minutos, e é o tempo total de manobra calculado pelo CPLEX, a coluna (4) apresenta tempo de execução do CPLEX em segundos, a coluna (5) representa o tempo total de manobra informado pela operação do pátio e, por fim a coluna (6) com o a redução de tempo de manobra calculado como a subtração coluna FO menos a coluna TO. Pode-se perceber que para todas as instâncias os valores dos tempos de manobra calculados pelo CPLEX são inferiores ao tempo de manobra realizado pela equipe de operação do pátio.

Tabela 2: Resultados.

Grupo	Instância	FO (min)	Tempo Exec. (s)	TO (min)	Redução de Tempo (min)
A	1	1.650,00	147,83	1.770,00	-120
	2	1.650,00	88,67	1.738,00	-88
	3	1.710,00	86,41	1.821,00	-111
	4	1.770,00	22,00	1.890,00	-120
B	5	1.725,00	149,64	1.782,00	-57
	6	2.415,00	304,08	2.478,00	-63
	7	2.415,00	180.64	2.535,00	-120
	8	2.475,00	144,66	2.563,00	-88
	9	1.860,00	151,05	1.955,00	-95
	10	1.785,00	135,26	1.905,00	-120
	11	2.415,00	148,64	2.503,00	-88
	12	2.415,00	119,30	2.501,00	-86
	13	1.920,00	73,69	2.039,00	-119
	14	1.680,00	100,03	1.795,00	-115
C	15	2.130,00	223,61	2.247,00	-117
	16	1.680,00	92,58	1.795,00	-115
	17	1.725,00	133,2	1.823,00	-98
	18	1.740,00	84,64	1.791,00	-51
	19	1.650,00	125,09	1.766,00	-116
	20	1.650,00	118,27	1.693,00	-43

Analisando as Instâncias 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13 e 15, pode-se perceber que alguns lotes terminaram seu deslocamento após o término do turno. A Figura 3 apresenta o gráfico de *Gantt* da instância, que considera todos os trechos e VVs disponíveis para a operação, para demonstrar que as rotas foram geradas respeitando a restrição de que somente um lote pode estar utilizando um trecho ou um VV em cada unidade de tempo. O CPLEX utilizou 3 rotas, 2, 10 e 24 para deslocar os lotes no pátio e o tempo total de estadia dos lotes foi de 110 UTs ou 1.650 minutos.

Os lotes 1, 5, 6, 7 e 9 utilizaram a rota 24, cor amarela, composta pelos trechos 6-22-86-48-50-55-60-65-70 e VV 4. Os lotes 2, 4 e 8 utilizaram a rota 10, cor rosa, composta pelos trechos 2-17-33-85-51-56-61-66-71 e VV 3. Os lotes 3 e 10 utilizaram a rota 2, cor azul, composta pelos trechos 2-17-33-85-49-54-59-64-69 e VV 5.

Na solução do CPLEX, o lote 1 chegou na UT igual a 2 e foi para o trecho 6 na mesma UT e depois seguiu pelos trechos da rota 2 finalizando no VV4 na UT igual a 11. Analogamente a essa explicação todos outros lotes iniciaram no seu momento de chegada e percorreram as rotas designadas pelo CPLEX, sem interrupções e atrasos.

Rotas																						
UT / Lote	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	vv4											
Lote 5						6	22	86	48	50	55	60	65	70	vv4							
Lote 6							6	22	86	48	50	55	60	65	70	vv4						
Lote 7								6	22	86	48	50	55	60	65	70	vv4					
Lote 9									6	22	86	48	50	55	60	65	70	vv4				
Lote 2			2	17	33	85	51	56	61	66	71	vv3										
Lote 4					2	17	33	85	51	56	61	66	71	vv3								
Lote 8									2	17	33	85	51	56	61	66	71	vv3				
Lote 3				2	17	33	85	49	54	59	64	69	vv5									
Lote 10											2	17	33	85	49	54	59	64	69	vv5		

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

Figura 3. Gráfico *Gantt* Instância 1.

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. Dentre os resultados encontrados destacam-se as Instâncias 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13 e 15 onde foi possível identificar os pontos gargalos do pátio.

A Instância 6 avaliou os impactos causados pela manutenção dos VVs 4 e 5 simultaneamente. Nessa instância constatou-se que a paralisação do VV5 (VV integrante da rota 2, rota de menor tempo de deslocamento) somado a outros 2 VVs parados simultaneamente afetou diretamente no tempo de estadia dos lotes fazendo com que o tempo total de deslocamento dos lotes tenha sido superior a 1 turno de trabalho. Para essa instância o CPLEX encontrou FO igual a 1680 min.

Assim como na Instância 6, a Instância 7, 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 também excedesse o turno de trabalho. Para essa instância o CPLEX encontrou FO igual 1725 min. Outro ponto observado foi que não se trata apenas da quantidade de VVs paralisados e sim quais VVs paralisados. A Instância 8, avaliou os impactos causados pela manutenção dos VVs 1, 3 e 5 simultaneamente e não foi possível planejar todos os lotes dentro no turno de trabalho.

Na Instância 11, 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 2415 min e o planejamento também excedeu o turno de trabalho. Constatou-se que disponibilizar para manutenção esses dois trechos juntos afeta diretamente no tempo de estadia dos lotes. Na Instância 12, foi avaliado o impacto em disponibilizar para a manutenção os trechos 55, 56 e 57. Assim como na Instância 41, concluiu-se que que disponibilizar para manutenção esses três trechos juntos afeta diretamente no tempo de estadia dos lotes. Esse fato aconteceu devido os trechos paralisados fazerem parte da rota mais rápida do pátio, a rota 2. Assim como na Instância 11, o CPLEX encontrou o tempo de permanência total dos lotes igual a 2415.

A Instância 13, avaliou 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 1920 min.

E por fim, a Instância 15 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 algumas instâncias já mencionadas anteriormente constatou-se também 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 2130 min.

Além dos resultados apresentados anteriormente a Instância 1 representa um caso real da EFVM. Assim, os resultados encontrados pelo CPLEX foram comparados aos resultados encontrados pela equipe de planejamento da EFVM. O CPLEX encontrou a soma total no tempo de estadia dos lotes inferior em 2 UTs (30 minutos) em relação a instância original. Esse resultado se devido 2 lotes terem sido descolados por 1 rota diferente da rota planejada pela equipe da EFVM. Desta forma, o modelo é uma ferramenta útil e aderente ao planejamento que é realizado pela VALE e pode eventualmente em alguns cenários apresentar ganhos operacionais para a EFVM.

Conforme os resultados apresentados, o modelo mostrou-se eficiente em planejar as rotas visando a redução total do tempo de estadia dos lotes em relação ao planejamento realizado pela equipe do Pátio sendo as Instâncias 4, 7 e 10 com uma redução no tempo de estadia de 120 min. Observou-se também com sua utilização é possível identificar as rotas e equipamentos críticos para a operação do pátio, ou seja, equipamentos que impactam o tempo total de estadia de todos os lotes. Constatou-se que, o que mais impacta no tempo de estadia do lote não é a quantidade de trechos ou VVs paralisados e sim paralisar trechos ou VVs que fazem parte das rotas mais rápidas, ou seja, com menor quantidade de trechos a serem percorridos. Vale ressaltar que o modelo matemático proposto pode ser utilizado em qualquer ferrovia e pátio ferroviário com características semelhantes da EFVM.

6. CONCLUSÕES

Esse artigo abordou o problema de planejamento de deslocamento de lotes de vagões em pátios ferroviários com foco em redução do tempo de estadia. Para resolver o problema foi proposto um

modelo matemático inspirando no MRCPSP 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 e foi possível identificar as rotas, trechos e VVs mais críticos para a operação do pátio.

As instâncias do Grupo C avaliaram 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 para a manutenção, as instâncias do Grupo B, demonstraram que os VVs 4 e 5 são críticos, visto que eles fazem parte das rotas mais rápidas, ou seja, as rotas menores (com menor quantidade de trechos). Em virtude de sua importância operacional eles 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 mais impactou foi 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. Desta forma, identificou-se que essa é a rota mais crítica do pátio cabendo as equipes de manutenção e operação atenção especial para com ela. Sendo assim, toda e qualquer tomada decisão que opte por disponibilizar trechos e o VV dessa rota para uma grande parada de manutenção ou até mesmo desativá-la deve ser realizada com muito critério visto que a indisponibilidade dela pode colocar em risco a operação do pátio e não permitir atender a um possível aumento de demanda do mercado.

Conclui-se também 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.

O modelo proposto não considera a possibilidade de uma atividade de um lote ser interrompida para que outro lote possa operar no mesmo trecho e ou no mesmo virador. Assim, sugere-se como trabalho futuro a incorporação de preempção nas restrições do modelo matemático proposto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPES (75528452/2016), ao CNPq (305795/2023-6) e a Vale S/A e EFVM pelas informações fornecidas.

REFERÊNCIAS

Adlbrecht, J.; B. Hüttler; J. Zazgornik et al. (2015) The train marshalling by a single shunting engine problem, *Transportation Research Part C, Emerging Technologies*, v. 58, p. 56-72. DOI: 10.1016/j.trc.2015.07.006.

Boysen, N.; M. Fliedner; F. Jaehn et al. (2012) Shunting yard operations: theoretical aspects and applications, *European Journal of Operational Research*, v. 220, n. 1, p. 1-14. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.01.043.

Boysen, N.; M. Fliedner; F. Jaehn et al. (2013) A survey on container processing in railway yards, *Transportation Science*, v. 47, n. 3, p. 312-29. DOI: 10.1287/trsc.1120.0415.

Boysen, N.; S. Emde and M. Fliedner (2016) The basic train makeup problem in shunting yards, *OR-Spektrum*, v. 38, n. 1, p. 207-33. DOI: 10.1007/s00291-015-0412-0.

Bohlin, M.; S. Gestrelius; F. Dahms et al. (2016) Optimization methods for multistage freight train formation, *Transportation Science*, v. 50, n. 3, p. 823-40. DOI: 10.1287/trsc.2014.0580.

CNT (2019) *Volume de Cargas Transportadas*. Disponível em: <cnt.org.br/imprensa/notícia/volume-cargas-transportadas> (acesso em: 10/10/2019).

Chen, X.; S. He; T. Li et al. (2018) A simulation platform for combined rail/road transport in multiyards intermodal terminals, *Journal of Advanced Transportation*, v. 2018, p. 1-19. DOI: 10.1155/2018/5812939.

Dotoli, M.; N. Epicoco; M. Falagario et al. (2017) A decision support system for optimizing operations at intermodal railroad terminals, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Systems*, v. 47, n. 3, p. 487-501. DOI: 10.1109/TSMC.2015.2506540.

Gen, M.; R. Cheng and L. Lin (2010) *Network Models and Optimization: Multiobjective Genetic Algorithm Approach.* London: Springer.

Gestrelius, S.; M. Aronsson; M. Joborn et al. (2017) Towards a comprehensive model for track allocation and roll- time scheduling at marshalling yards, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, v. 7, n. 3, p. 157-70. DOI: 10.1016/j.jrtpm.2017.06.002.

Haahr, J.T.; R.M. Lusby and J.C. Wagenaar (2017) Optimization methods for the train unit shunting problem, *European Journal of Operational Research*, v. 262, n. 3, p. 981-95. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.03.068.

IBM (2019). *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6*. Disponível em: <https://www.ibm.com/br> (acesso em: 20/11/2019).

Khaled, A.; M. Jin; D. Clarke et al. (2015) Train design and routing optimization for evaluating criticality of freight railroad infrastructures, *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 71, p. 71-84. DOI: 10.1016/j.trb.2014.10.002.

Pimenta, L.; R. Rosa; L. Zanotti et al. (2016) Modelo matemático para o planejamento de manobras de lotes de vagões em um terminal ferroviário. In *Anais do XXX Congresso ANPET*. Rio de Janeiro: ANPET.

Pimenta, L. and R. Rosa (2017) Planejamento da sequência das atividades e a utilização dos recursos para atendimento aos vagões em terminais ferroviários. In *Anais do XXXI Congresso ANPET*. . Rio de Janeiro: ANPET.

Pimenta, L. (2017) *Planejamento das Atividades e da Utilização dos Recursos na Operação de Vagões em Terminais Ferroviários*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/handle/10/9508> (acesso em: 10/10/2019).

Rosa, R.A. (2016) *Operação Ferroviária* (v. 1). Rio de Janeiro: LTC.

Saeednia, M.; D. Bruckmann and U. Weidmann (2015) *Event-Based Model for Optimizing Shunting Yard Operations.* Transportation Research Board, Washington, p. 90-94. DOI: 10.3141/2475-11.

Shi, T. and X. Zhou (2015) A mixed integer programming model for optimizing multi-level operations process in railroad yards, *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 80, p. 19-39. DOI: 10.1016/j.trb.2015.06.007.

Wang, Z. and A. Ceder (2017) Efficient design of freight train operation with double-hump yards, *The Journal of the Operational Research Society*, v. 68, n. 12, p. 1600-19. DOI: 10.1057/s41274-017-0187-6.

Yan, F. and R.M.P. Goverde (2019) Combined line planning and train timetabling for strongly heterogeneous railway lines with direct connections, *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 127, p. 20-46. DOI: 10.1016/j.trb.2019.06.010.

Zhou, W.; X. Yang; J. Qin et al. (2014) Optimizing the long-term operating plan of railway marshalling station for capacity utilization analysis, *The Scientific World Journal*, v. 2014, p. 251315. DOI: 10.1155/2014/251315. PMid:25525614.