LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
Limeira–SP, 02 a 06 de setembro de 2019

MODELO MATEMÁTICO MULTI-PRODUTOS PARA PLANEJAMENTO DE ALOCAÇÃO DE PILHA DE MINÉRIO

Marcos Wagner Jesus Servare Junior
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo
Av. Fernando Ferrari, 514 – Goiabeiras, Vitória, ES, 29075-910 - Brasil
marcoswjunior@gmail.com

Helder Roberto de Oliveira Rocha
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo
Av. Fernando Ferrari, 514 – Goiabeiras, Vitória, ES, 29075-910 - Brasil
helder.rocha@ufes.br

José Leandro Félix Salles
Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo
Av. Fernando Ferrari, 514 – Goiabeiras, Vitória, ES, 29075-910 - Brasil
jleandro@ele.ufes.br

RESUMO

Pátios de estocagem em áreas portuárias são importantes na gestão da cadeia de suprimentos, devido a agregação de custos logísticos. O seu objetivo é realizar o carregamento dos navios de acordo com a sua capacidade, especificação da característica de minério e, ainda, da maneira mais rápida possível. Para granéis sólidos ocorrem a alocação das pilhas de produtos ao longo dos pátios de estocagem, juntamente ao sistema de recebimento e movimentação, além de misturas e recuperação de pilhas para abastecimento de navios. Na otimização deste sistema existem fatores que apontam uma variedade de fluxos e produtos (tipos de minério) demandados, aumentando a complexidade do sistema. Sendo assim, este artigo tem como objetivo apresentar um modelo matemático multi-produto para alocação de pilhas com diferentes características de minério, considerando instalações e equipamentos utilizados nessa movimentação e analisar a eficiência deste em um conjunto de cenários simulados a partir do solver comercial CPLEX.

PALAVRAS CHAVE. Problema de Alocação de Pilhas, Modelagem Matemática, Programação de Pátios.
Tópicos (POI – PO na Indústria, PM – Programação Matemática e PO na Administração e Gestão da Produção)

ABSTRACT

Stockyards in port areas are important in supply chain management due to the aggregation of logistics costs. Its purpose is to load the ships according to their capacity, specification of the ore and fastest as possible. For solid bulks, the stockpiles are allocated along the storage yards with the receiving and moving system, as well as mixtures and recovery of ore for supplying ships. In the optimization of this system there are factors that point to a variety of flows and products (types of ore) demanded, increasing the complexity of the system. Thus, this article aims to present a multi-product mathematical model for allocation of stockpiles with different ore characteristics, considering facilities and equipment used in this movement and analyze the efficiency of this in a set of simulated scenarios from the commercial solver CPLEX.

KEYWORDS. Stockyard Allocation Problem, Mathematical Modeling, Stockyards Programming.
Paper topics (Operations Research in Industry, Mathematical Programming, Operations Research in the Business and Production Management)

1. Introdução

Os pátios de estocagem em portos são elos importantes da cadeia logística a que pertencem, influenciando de forma significativa no seu desempenho [Servare Junior et al. 2018]. Especificamente, quando se trata de granéis sólidos, como o carvão e o minério de ferro, o planejamento de alocação das pilhas e sequenciamento da utilização dos recursos ao longo da extensão destes pátios, impactam diretamente no desempenho dos processos portuários e, de acordo com a gravidade da situação, pode até interromper o processo de fornecimento por um período. Ainda, podem ser geradas penalizações como, por exemplo, um navio que tenha sua partida atrasada pela ineficiência no processo pode resultar uma multa contratual oriunda do proprietário da embarcação.

Por outro lado, se a alocação for eficiente irá proporcionar maiores capacidades utilizada de recursos, menores custos e melhor resultado global desta cadeia de abastecimento. No entanto, devido à complexidade do sistema de produção e a flexibilidade exigida, utilizar métodos empíricos não garante um sistema otimizado e pode gerar custos e desperdícios no processo produtivo.

Uma solução otimizada pode resultar em economias significativas por meio de melhor utilização da capacidade. Além deste benefício econômico, outras considerações a respeito do sistema devem ser usadas para garantir outras situações relacionadas ao problema, tais como, redução dos impactos ambientais, de gastos com energia, controle de violações de regulamentações e utilização de incertezas, tanto na produção quanto nos pedidos dos clientes.

Devido à ampla gama de problemas de programação de produção, várias abordagens foram desenvolvidas. Nestas incluem programação manual suportada por computador (como, gráficos de Gantt interativos), sistemas especialistas, programação matemática (Programação Linear – LP, Programação Linear Inteira Mista – MILP – e Programação Não-Linear Inteira Mista – MINLP), várias heurísticas, algoritmos evolutivos e diferentes métodos de inteligência artificial (IA) (veja [Floudas e Lin 2004], [Méndez et al. 2006], [Li e Ierapetritou 2008a], [Li e Ierapetritou 2008b], [Ribas et al. 2010], [Phanden et al. 2011], [Maravelias 2012], [Lopes et al. 2018]).

Uma característica importante deste problema é que o espaço disponível no pátio seja capaz de acomodar os lotes de minério que chegam dos trens e permita mudanças de planos alternativos em caso de falhas do equipamento, garantindo assim um planejamento otimizado de pilhas no pátio. São poucos os problemas discutidos na literatura semelhantes ao problema de planejamento de um pátio estudado neste artigo.

Além de todos os trabalhos já citados, cabe destacar que em situações reais novas considerações, equipamentos ou participantes devem ser considerados, tais como, o fluxo entre os equipamentos, quantidade de carga carregada nos navios e quantidade de navios atendidos, aumentando a complexidade. Um planejamento do sistema pátio-porto considerando uma variedade de produtos apresenta maior complexidade devido a inclusão de novas demandas e novos fluxos.

Assim, o presente artigo tem por objetivo apresentar um modelo matemático para um sistema de armazenamento de minério em pátios de portos, sua movimentação interna e abastecimento com diferentes tipos de minério, que busca maximizar a quantidade de navios em um horizonte de planejamento, se aproximando assim da realidade observada nas empresas.

Este artigo foi estruturado da seguinte forma: a seção 2 apresenta uma revisão de literatura acerca do Problema de Alocação e Programação das Pilhas. Na seção 3 é apresentada a descrição do problema e o modelo matemático proposto neste trabalho. Na secção 4 são apresentadas as instâncias deste estudo, bem como os resultados experimentais do modelo de programação linear inteira mista. Na seção 5, por fim, são apresentadas as considerações finais.

2. Problema de Alocação e Programação de Pilhas

A adequada gestão de pátios de estocagem é fundamental para garantir um desempenho global equilibrado entre custos, volume e produtividade na cadeia logística em que estes pátios estão inseridos. Principalmente nos tempos atuais em que o preço do minério de ferro apresenta uma tendência de ficar em patamares bem abaixo dos alcançados em passado recente e se projeta um aumento significativo de volume para os próximos anos com o mínimo de investimento em novas instalações, a demanda por otimização dos pátios de estocagem passa a figurar não mais como uma possibilidade ou estudo, mas sim como uma exigência das empresas mineradoras para suportar a diretriz de fazer mais com menos. Ou seja, a ordem nestes tempos é extrair o máximo dos ativos existentes alcançando com isto melhores resultados sem necessidade de dispêndios em novos equipamentos e instalações. Neste ambiente, o uso de ferramentas e técnicas de otimização torna-se uma excelente opção para gerar soluções de baixo custo e plenamente adequadas aos problemas existentes.

A solução do problema planejamento de alocação de pilhas e sequenciamento não é trivial, exigindo uma pesquisa detalhada para identificar as alternativas existentes, de tal forma a propor e construir as de maior efetividade e potencial de utilização. Dado o grau de complexidade verificado, este problema pode ser classificado como NP-hard, ou seja, os que requerem tempo exponencial para obtenção de solução ótima global [Voudouris 1997]. Assim, além da busca pela solução ótima, é importante que se busque alternativas com soluções locais de boa qualidade que possam ser utilizadas pelos operadores e gestores do pátio no processo de tomada de decisão.

De acordo com [Menezes et al. 2017], o problema de Planejamento e Sequenciamento são problemas de otimização em um horizonte de médio e curto prazos, considerando as quantidades a serem produzidas, preços e demandas, de acordo com o atingimento de metas definidas por níveis superiores. A técnica utilizada para solução do problema foi o *Branch and Price* com Geração de Colunas (CG).

Em [Abdekhodaee et al. 2004] a análise do planejamento de um pátio de granéis sólidos é realizada para a cadeia de carvão na Austrália, com um foco direcionado a programação de trem em que os dois problemas foram separados em vários módulos resolvendo cada um deles através de uma heurística gulosa. [Boland et al. 2012] desenvolveram uma técnica de planejamento de pátios de carvão baseada em uma construção gulosa aprimorada com a utilização da programação inteira com intuito de aumentar o fluxo de matérias primas e diminuir o tempo médio dos navios no berço.

[Pimentel 2011] pratica uma abordagem global da otimização da cadeia logística do minério, sendo que as análises efetuadas na gestão de pátios das minas são feitas de maneira simplificada desconsiderando os aspectos de rotas e manutenções de equipamentos. Em conjunto com o modelo matemático, foi adotada a abordagem de Programação por Metas proposta por [Ignizio, 1978] para lidar com o aspecto de conflito de objetivos de cada etapa ou parte do processo. Por sua vez, a solução adotada por [Almeida e Pimentel 2010] utilizou-se de um modelo de programação inteira mista para resolver o problema de programação de curto prazo de produção, processamento e expedição de minério.

Em [Nóbrega 1996] o problema do ponto de vista da cadeia também é observado, sendo que na etapa de pátios de estocagem aborda-se somente as pilhas que são formadas e recuperadas sem haver preocupação de localização, dimensões ou geometria das mesmas. Este autor resolve o problema usando-se programação inteira e programação linear.

[Bittencourt e Matede 2009] trabalham em uma análise de pátios de estocagem de bobinas de aço de uma forma simplificada, considerando somente as movimentações internas de bobinas e formatos resultantes dos empilhamentos destes produtos. Este artigo utiliza um algoritmo de evolução diferencial para solução do problema.

[Amorim Júnior 2006] analisa a estocagem de bobinas de aço com objetivo de acelerar o processo de despachos realizado em um período de planejamento pré-estabelecido. [Lopes et al. 2018] apresentam uma construção gulosa para determinar o fluxo, movimentação e direcionamento de navios em cada berço para determinar onde cada navio será atendido com objetivo minimizar o

tempo máximo de ocupação dos berços, para que se tenha uma ocupação homogênea dos berços e o atendimento da demanda de toda frota em um tempo mínimo.

Por fim, [Servare Junior et al. 2018] apresentam um modelo matemático de programação linear inteira mista bi-objetivo para determinar os navios que serão atendidos por cada berço em uma determinada fila de clientes. Os autores deste artigo utilizam funções objetivo separadamente e avaliam o comportamento das mesmas nos cenários estudados. Em linhas gerais, foi observado que pelas suas características do problema, os trabalhos utilizam como técnicas de solução a modelagem matemática, heurísticas e meta heurísticas.

3. Modelo Matemático

No sistema de pátio-porto encontram-se os terminais de descarga (viradoras), pátios de estocagem, empilhadeiras, recuperadoras e berços para os navios. O sistema objeto deste estudo se inicia com o envio do minério de ferro retirado das minas a partir de linhas férreas. Este material é transportado até os em terminais de descarga onde os vagões carregados de minérios são girados para descarregamento do seu conteúdo em correias transportadoras, sendo que este material é transportado para as empilhadeiras e em seguida são empilhadas no pátio de estocagem pelas empilhadeiras.

Nos pátios de estocagem, o minério é depositado em pilhas, que são divididas a partir da separação de posições no pátio para estocagem, conforme apresenta a Figura 1. A construção de todas as pilhas para atender a um único navio pode demorar diversos dias. Uma pilha do pátio é recuperada (ou removida) usando uma recuperadora de roda de balde e a carga recuperada é enviada imediatamente aos navios.

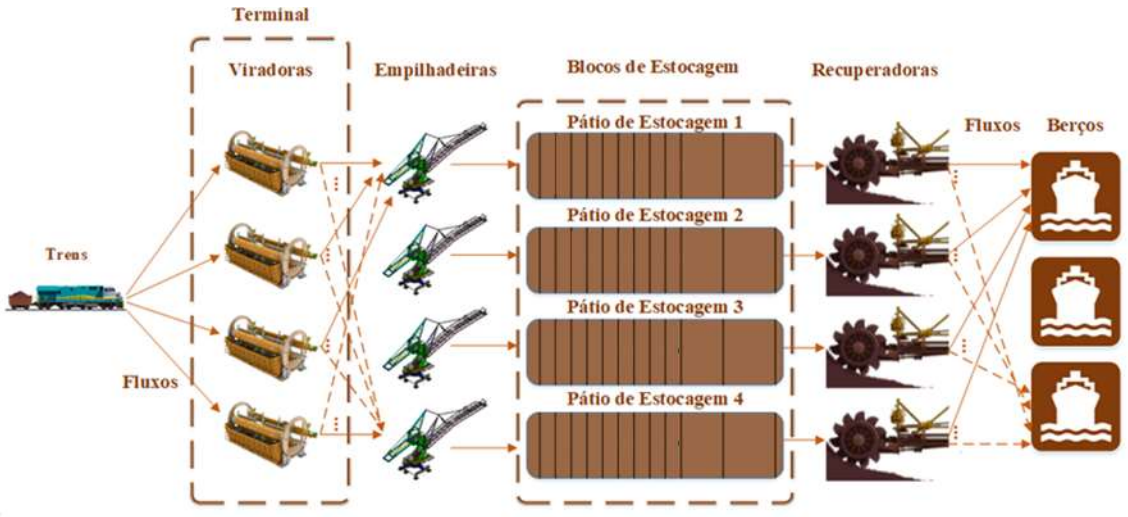


Figura 1 - Esquematização do funcionamento do sistema pátio-porto estudado

As empilhadeiras estão totalmente disponíveis para os pátios de estocagem e as recuperadoras só para os terminais. As empilhadeiras e as recuperadoras movem-se livremente para atender às posições e as pilhas nos pátios de estocagem. Para um bom funcionamento das empilhadeiras e das recuperadoras, estes devem permanecer a uma certa distância para evitar colisões. Neste trabalho considera-se que o movimento das empilhadeiras e recuperadoras são sincronizados, desconsiderando-se a interferência de uma na outra em seu funcionamento.

Para efeitos de aplicação considera-se que ao longo de todo o processo existem diferentes produtos, de acordo com o tipo de minério e cada um desses produtos fica alocado em somente um pátio já determinado. Dessa forma, um produto só pode ser direcionado para o pátio que o abriga.

Com um pedido realizado, são calculados os movimentos do minério e os trens enviados carregados com os lotes ou vagões de minério para os terminais descarga.

Após a chegada dos lotes nos terminais, estes são transferidos para as empilhadeiras que serão empilhadas nos pátios de estocagem, onde permanecerão em repouso até que o navio chegue no berço. Para um dado conjunto de navios que chegam ao porto, atribui-se os primeiros navios nos berços. Um navio não pode chegar no berço antes da sua hora previamente estimada. O tempo de carregamento do navio é diretamente proporcional a quantidade de pilhas recuperadas.

Apesar de se tratar de um modelo bi-objetivo, o modelo proposto por [Servare Junior et al. 2018] pode ser utilizado como base para a proposta deste trabalho considerando um de seus objetivos. Além disso, incluem-se como contribuições a variedade de produtos entre os pátios, mesmo que o nicho de exploração seja o minério de ferro, estes podem ser diferenciados de acordo com níveis de qualidade e pureza exigido pelos clientes, sendo separado em produtos a partir das classificações e diversidades possíveis e alocados em pátios diferentes. A composição de cada produto é feita a partir da combinação (ou *mix*) da matéria-prima oriunda da mina.

Assim, com base no proposto na definição do problema e com as relações indicadas na Figura 1, são descritos os conjuntos, parâmetros e variáveis do modelo proposto:

Conjuntos

A	Conjunto de minas
B	Conjunto de Viradores
C	Conjunto de Empilhadeiras, Pátios, Recuperadoras e tipos de produtos
D	Conjunto de Pilhas
F	Conjunto de Berços
N	Conjunto de Navios

Parâmetros

Dem_n	Demanda total do navio n
$Dprod_n^c$	Demanda do navio n pelo produto c
T_n^f	Tempo de carregamento do navio n no berço f
Tm_n^f	Tempo de o de movimentação de equipamentos para carregar o navio n no berço f
$Cape_c$	Capacidade da empilhadeira c
$Capp_{cd}$	Capacidade da pilha d localizada no pátio c
$Capr_c$	Capacidade da recuperadora c
$Capb_f$	Capacidade do berço f

Variáveis

Tp_f	Tempo total gasto pelo berço f para realizar todo o carregamento dos navios designados.
X_f^n	$X_f^n = 1$ caso o navio n seja atendido no berço f, ou 0 caso contrário
P_{ab}	Quantidade de minério transportado da mina a para o virador b
Q_{bc}	Quantidade de minério transportado do virador b para a empilhadeira/pátio c
R_{cd}	Quantidade de minério transportado da empilhadeira/pátio c para a pilha d
S_{dc}	Quantidade de minério do tipo c transportado da pilha d para a recuperadora do pátio c
T_{cf}	Quantidade de minério do tipo c transportado da recuperadora do pátio c para o berço f

De acordo com a notação definida, a seguir é apresentado o modelo matemático para o problema que é objeto de estudo deste trabalho.

Objetivo:
Maximizar a quantidade de navios que é atendida.

$$Maximizar\ Z\ =\ \sum_{f\in F}\sum_{n\in N} X_n^f \tag{1}$$

Restrições:

- Restrições relacionadas aos limites da capacidade de cada equipamento ou espaço do pátio ou porto:

$$\sum_{b\in B} P_{ab} \le\ Capm_a \quad \forall \quad a\in A \tag{2}$$

$$\sum_{c\in C} Q_{bc} \le\ Capv_c \quad \forall \quad b\in B \tag{3}$$

$$\sum_{d\in D} R_{cd} \le\ Cape_c \quad \forall \quad c\in C \tag{4}$$

$$\sum_{d\in D} S_{dc} \le\ Capr_c \quad \forall \quad c\in C \tag{5}$$

$$\sum_{c\in C} T_{cf} \le\ Capb_f \quad \forall \quad f\in F \tag{6}$$

$$R_{cd} \le\ Capp_{cd} \quad \forall \quad c\in C, \quad \forall \quad d\in D \tag{7}$$

- Restrições de fluxos que garantem que tudo que chega a um equipamento, estação ou pátio vai ser igual ao que sai deles:

$$\sum_{a\in A} P_{ab} = \sum_{c\in C} Q_{bc} \quad \forall \quad b\in B \tag{8}$$

$$\sum_{b\in B} Q_{bc} = \sum_{d\in D} R_{cd} \quad \forall \quad c\in C \tag{9}$$

$$R_{cd} \le S_{dc} \quad \forall \quad c\in C, \quad \forall \quad d\in D \tag{10}$$

$$\sum_{d\in D} S_{dc} = \sum_{f\in F} T_{cf} \quad \forall \quad c\in C \tag{11}$$

$$\sum_{c\in C} T_{cf} \ =\ \sum_{n\in N} Dem_n X_f^n \quad \forall \quad f\in F \tag{12}$$

- Garante que a demanda de cada produto de cada navio seja atendida.

$$\sum_{f\in F} T_{cf} = \sum_{f\in F}\sum_{n\in N} Dprod_n^c X_f^n \quad \forall \quad c\in C \tag{13}$$

- Restrição que garanta que cada navio será atendido uma única vez, ou seja, por no máximo um berço:

$$\sum_{f\in F} X_f^n \le 1 \quad \forall \quad n\in N \tag{14}$$

- Restrição de Natureza das Variáveis

$$X_f^n \in \{0,1\} \quad \forall \quad n\in N, \quad \forall \quad f\in F \tag{15}$$

$$P_{ab}, Q_{bc}, R_{cd}, S_{dc}, T_{cf}, Tp_f \in R^+ \quad \forall a\in A, \forall b\in B, \forall c\in C, \forall d\in D, \forall f\in F \tag{16}$$

O modelo em questão se trata de um modelo de programação linear inteira mista (do inglês, Mixed Integer Linear Programming – MILP) desenvolvido para descrever objeto de estudo.

4. Experimentos Computacionais

Para o procedimento de verificação e validação do modelo proposto neste estudo, foram realizados experimentos computacionais com o auxílio do *solver* comercial CPLEX [IBM 2012]. Sem que pudessem ser disponibilizados valores reais para que os cenários tivessem seu comportamento real observado, utilizaram-se valores aleatórios para definir a demanda de cada navio e criar instâncias simuladas.

O computador utilizado nos experimentos computacionais foi um *Intel Core i5* de 2,5 GHz com 4Gb de memória RAM. Na Tabela 1 e 2 encontram-se as informações relativas aos parâmetros utilizados e os conjuntos de cada instância criada para efeito de comparação entre elas.

Tabela 1 – Distribuição uniforme dos parâmetros do modelo para geração das instâncias simuladas

Parâmetro	Mínimo	Máximo
Demanda	4	9
Demanda de Produto	0	Demanda
Capacidade do Berço	100	200
Capacidade de Recuperação	35	60
Capacidade de Empilhamento	25	60
Capacidade da Pilha	1	2
Capacidade do Virador	40	60
Capacidade da Mina	150	200

Os valores máximos e mínimos foram elaborados com base em uma escolha randômica uniforme para atribuição do parâmetro naquele intervalo, cada parâmetro de cada uma das instâncias que foram objeto de estudo desse trabalho se encontra nessa faixa de valores. Por sua vez, as instâncias foram definidas com base no tamanho do problema. Aumentando a quantidade de equipamentos e possibilidades de navios e berços para atracação espera-se que a complexidade seja aumentada e possa ser um plano de avaliação até quando a metodologia seja utilizável.

Na Tabela 2 ainda se observa a separação das instâncias em grupos, de acordo com o tamanho das instâncias. No primeiro grupo, as instâncias de 1 a 5, a mudança de cenário foca no crescimento de número de viradores e número de pátios (produtos), por sua vez, nas instâncias de 6 a 10, que apresentam atributos maiores, a variação ocorre na quantidade de produto disponibilizado (aumento do número de minas) e no aumento no tamanho do pátio, bem como a quantidade de navios que poderá ser atendido pelo sistema. Por fim, nas instâncias de 11 a 15 o aumento ocorre em todos os conjuntos para que seja avaliado até qual instância e seu tamanho o modelo é capaz de resolver.

Tabela 2 - Instâncias modeladas para o problema.

(continua)

Instância	A	B	C	D	F	N
1	1	1	1	10	1	10
2	1	2	2	10	1	10
3	1	5	2	10	1	10
4	1	5	5	10	1	10
5	2	10	10	10	1	10

Tabela 3 - Instâncias modeladas para o problema.

(continuação)

6	3	10	10	15	1	15
7	8	15	10	20	1	20
8	10	15	10	30	1	50
9	10	15	10	30	2	50
10	10	15	10	50	2	80
11	10	15	10	50	8	100
12	10	20	10	50	10	100
13	15	20	10	50	15	100
14	20	20	15	75	20	150
15	25	20	20	75	20	200

A partir dessa análise e considerando as expressões (1)-(16), foram utilizadas as informações contidas nas Tabelas 1 e 2 para criação do modelo matemático. Para tanto, foi desenvolvido um código na linguagem de programação Python para que os dados fossem gerados, o modelo escrito no formato que o CPLEX [IBM 2012] realize a sua leitura e, por fim, pudesse realizar a otimização de cada um dos cenários.

Na Tabela 3 encontram-se os resultados computacionais da implementação das instâncias, com o esforço computacional medido em segundos (ou fração de segundos) para que o *solver* CPLEX [IBM 2012] indicasse a solução ótima (Função Objetivo – FO) para a instância em questão.

Tabela 4 - Resultados obtidos (*CPLEX parou por falta de memória)

Instância	**FO**	**Tempo (s)**
1	3	0,03
2	5	0,03
3	5	0,03
4	7	0,03
5	9	0,03
6	15	0,03
7	20	0,03
8	50	0,05
9	49	0,06
10	66	0,09
11	59	1,19
12	64	1,61
13	69	7,08
14	98	77,44
15	-	329*

Considerando um horizonte de planejamento restrito limitado ao número de navios e capacidade de equipamentos, o modelo matemático foi suficiente para resolver o problema de maneira ótima pelo CPLEX 12.5 [IBM 2012] nas instâncias 1 a 14. Embora casos reais apresentem

maior horizonte de planejamento e quantidade de navios, o modelo matemático poderá ser empregado para esse tipo de programação.

Já a instância 15, o *solver* comercial não foi capaz de encontrar uma solução por falta de memória, sendo recomendado que utilize uma máquina mais robusta para obtenção dessa solução ou que sejam adaptadas outras técnicas que possam indicar uma solução dos problemas para esse caso e para possíveis instâncias ainda mais complexas.

Como forma de representação, de acordo com as características apresentadas na Tabelas 2 e 3, a esquematização do problema da Instância 3 está na Figura 2 e a solução encontrada é mostrada na Figura 2.

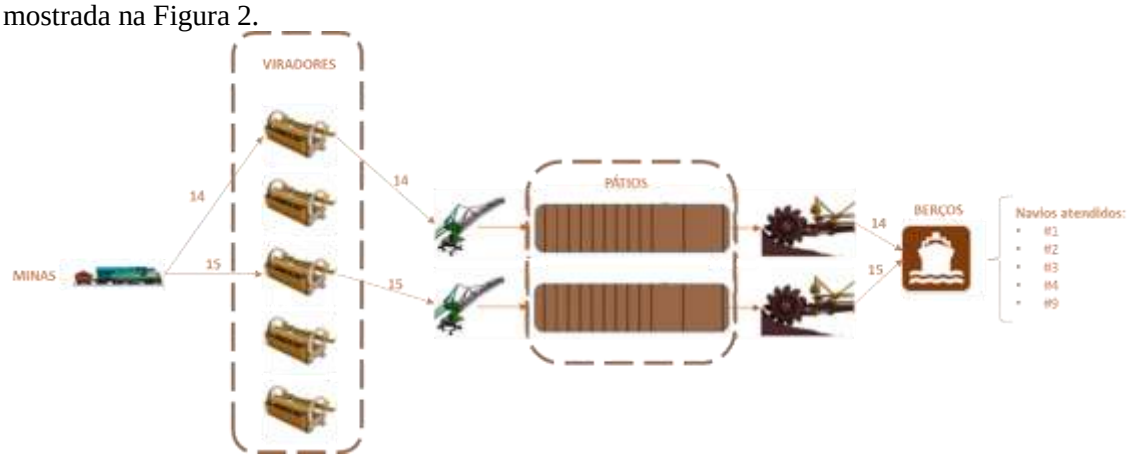


Figura 2- Representação gráfica da solução da Instância 3

De maneira mais específica, a movimentação de minério entre os pátios que a solução da Instância 3 indica é visualizada na Figura 3. Assim, consegue-se observar as diferentes pilhas que são usadas, os seus tamanhos e o fluxo delas.

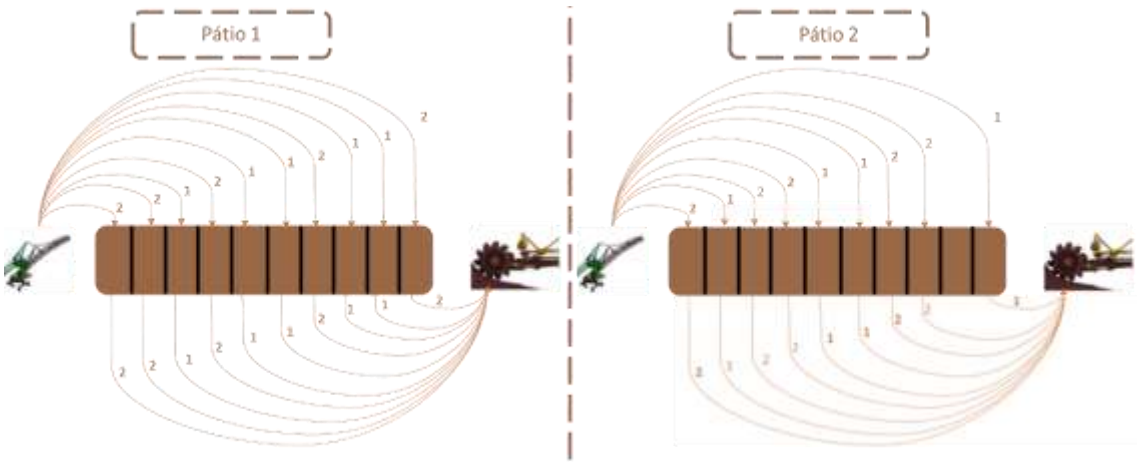


Figura 3 - Representação gráfica da movimentação no pátio

O crescimento da Função Objetivo (número de navios atendidos) é explicado pelo aumento do número de equipamentos, demanda de clientes e/ou disponibilidade de produtos (minas), bem como um maior fluxo entre os equipamentos. Também é observado que o tempo de execução da ferramenta não ultrapassa os 78 segundos nas instâncias que foi possível encontrar solução.

Embora os 77,44 segundos de execução da instância 14 são muito maiores que os medidos nos primeiros grupos (instâncias 1 a 10) é importante notar que é um tempo satisfatório para tomada de decisão em relação a escolha de atendimentos, movimentação e fluxo de minério

entre os equipamentos, uma vez que o abastecimento e carregamento dos porões de um navio pode durar dias.

Nas Instâncias 8 e 9 a quantidade de navios atendidos apresentou uma redução, contrário do que se imagina ao disponibilizar outro berço para atendimento de navios. Para identificar a causa desta variação, constatou-se que a Instância 8 possuía uma quantidade maior de navios com demanda menores e, assim, puderam ser atendidos mais navios na Instância 8. Esse fenômeno se deu pela aleatoriedade dos dados e não interfere na validação do modelo, uma vez que com o aumento do tamanho do modelo e, por consequência, de sua complexidade o modelo continuou viável e mantendo suas interações lógicas.

De maneira geral, a análise da utilização da modelagem matemática considera a possibilidade de a empresa realizar planejamentos e replanejamentos em um horizonte de tempo reduzido para que se tenha uma solução ótima a todo momento mediante a consideração de eventuais mudanças que possam ocorrer durante um período de planejamento mais extenso.

5. Considerações Finais

Devido a importância de se definir o planejamento e sequenciamento de atividades para um sistema pátio-porto de granéis sólidos com tipos de minério com diferentes características, este artigo apresentou um modelo de programação linear inteira mista para resolver esse tipo de problema, com uma configuração de equipamentos e abordagem que não haviam sidos considerados por outros autores.

Além disso, o modelo suporta um planejamento de abastecimento e carregamento de navios, os direcionando para os berços que realizarão os atendimentos. Para que a complexidade do problema fosse considerada foram abordadas as variações entre as instâncias, com o aumento do número de origens (minas), destinos (navios), equipamentos e tamanho do pátio para o problema estudado. A performance da técnica exata foi avaliada a partir da comparação entre esses diferentes tamanhos de instâncias.

Em alguns casos (instâncias 1 a 14), *solvers* comerciais como o CPLEX 12.5 [IBM 2012] são capazes de resolver o problema em um tempo (esforço) computacional satisfatório, considerando a complexidade da tomada de decisão que deverá ser feita. Entretanto, para problemas maiores (instância 15) poderá ser resolvida utilizando técnicas especificas já que o processo do CPLEX foi interrompido por falta de memória. Nestes casos serão indicadas técnicas como heurísticas e metaheurísticas ou, ainda, utilizar um computador com mais memória e processador mais robusto para que forneça soluções adequadas para o problema.

Assim, este trabalho apresentou o modelo matemático como uma ferramenta viável que auxilie o agente tomador de decisão a encontrar uma solução ótima de maneira rápida com as informações acerca do sistema pátio porto. Além disso, na literatura dos problemas de alocação de pilhas no pátio não existem trabalhos com as mesmas características que o sistema pátio-porto do minério de ferro.

Pesquisas futuras poderão ser realizadas com objetivo de descrever modelos ainda mais robustos que considerem a mudança dos objetivos organizacionais durante a jornada da empresa e considerando importantes características como giro de estoque, além de acrescentar ao modelo *mix* de minérios de origem na mina para formar os diferentes produtos (tipos de minério) no pátio.

Em adição, considerar a incerteza da demanda, com uma abordagem multi-período, multi-produto e multi-objetivo promovendo uma pesquisa de interesse empresarial e relevância prática. Ainda, heurísticas e metaheuristicas como o Simulated Annealing ou Algoritmo Genético poderiam ser usadas para resolver a instância 15 e instâncias ainda maiores.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPES/Vale pelo financiamento desta pesquisa através do projeto número 529/2016 do edital 1/2015.

Referências

Abdekhodaee, A. et al. (2004). Integration of stockyard and rail network: a scheduling case study. In: *Anais do fifth Asia Pacific industrial engineering and management systems conference*, p. 25.5.1-25.5.17, Gold Coast, APIEMS.

Almeida, F. A. e Pimentel, B. S. (2010). Um modelo matemático para o problema de programação integrada de curto prazo em minas. In *Anais do XLII SBPO*, p. 1129-1140, Bento Gonçalves, SOBRAPRO.

Amorim Júnior, W. P. (2006). Sistema de alocação em pátios de estocagem: uma aplicação no armazenamento de bobinas de aço (dissertação). Vitória (ES-Brasil): Universidade Federal do Espírito Santo.

Bittencourt, S.V. e Matede, W.C. (2009). Uma abordagem acerca dos problemas de otimização referentes ao sistema de alocação em pátios de estocagem e às movimentações de bobinas de aço laminadas. In *Anais do Simpósio Projeto e Análise de Algoritmos*, Vitória, UFES.

Boland, N. et al. (2012). A stockyard planning problem. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 1(3): 197-236.

Floudas, C. A.; Lin, X. (2004). Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review. *Computers & Chemical Engineering*, 28(11): 2109-2129.

IBM (2012). IBM ILOG CPLEX v12.5: User's manual for CPLEX.

Ignizio, J. P. (1978) A review of Goal Programming: a tool for multiobjective analysis. *Journal of the Operational Research Society*, 29(11): 1109–1119.

Li, Z.; Ierapetritou, M. G. (2008a). Process scheduling under uncertainty: Review and challenges. *Computers & Chemical Engineering*, 32(4-5): 715-727.

Li, Z.; Ierapetritou, M. G. (2008b). Robust optimization for process scheduling under uncertainty. *Industrial & Engineering Chemistry* Research, 47(12): 4148-4157.

Maravelias, C. T. (2012). General framework and modeling approach classification for chemical production scheduling. *AIChE Journal*, 58(6): 1812-1828.

Méndez, C. A. et al. (2006) State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. *Computers & Chemical Engineering*, 30(6-7): 913-946.

Menezes, G. C. et al. (2017). A branch and price algorithm to solve the integrated production planning and scheduling in bulk ports. *European Journal of Operational Research*, 258(3): 926-937.

Nóbrega, M. A (1996). Modelagem matemática de um sistema de produção e transporte de minério de ferro (dissertação). Campinas (SP-Brasil): Universidade estadual de Campinas.

Lopes, A. D. O. et al. (2018). Ferramentas de Auxílio ao Planejamento de Curto Prazo para Industrias de Mineração 4.0. In: *Anais do 13th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, São Paulo. IEEE/IAS.

Phanden, R. K. et al. (2011). Integration of process planning and scheduling: a state-of-the-art review. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 24(6): 517-534.

Pimentel, B. S. (2011) Modelos e Algoritmos para Planejamento Integrado da Indústria da Mineração (Tese de Doutorado). Belo Horizonte (MG-Brasil): Universidade Federal de Minas Gerais.

Ribas, I., R. et al. (2010). Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective. *Computers & Operations Research*, 37(8): 1439-1454.

Servare Junior, M. W. J. et al. (2018). Modelo matemático para otimização na alocação pilhas em um pátio de estocagem de portos e carregamento de navios. In *Anais do VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção*, Ponta Grossa. APREPRO.

Voudoris, C. (1997). Guided local search for combinatorial optimisation problems (Tese PhD). Colchester (UK): Department of Computer Science, University of Essex.