

## PLANEJAMENTO DE PORTOS GRANELEIROS PARA ATENDER A PRODUÇÃO DE USINA PELOTIZADORA CONSIDERANDO DESIGNAÇÃO DE ÁREAS DE PÁTIO E FILA DE NAVIOS

**Thiago Bordal Oliveira Braga**

**Jonas Paluci Barbosa**

**Rodrigo de Alvarenga Rosa**

**Bruna Santos Neves**

Universidade Federal do Espírito Santo  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

### RESUMO

Usinas pelletizadoras produzem pelotas de minério de ferro em lotes, necessitando área de pátio para armazená-las, sendo necessário definir o pátio e a localização de cada lote, visando não ocorrer interrupção da produção. Também é necessário planejar a fila de navios que irão retirar pelotas dos pátios e liberar novos espaços. O objetivo é minimizar paradas de produção por falta de espaço nos pátios. Assim, é proposto um modelo matemático para definir o pátio, a localização do lote e integrar a fila de navios. O modelo foi testado em instâncias baseadas em dados de uma usina pelletizadora localizada em Anchieta, Espírito Santo. Utilizou-se o CPLEX 12.8 para resolver o modelo e os resultados mostraram que o armazenamento dos lotes em pilhas separadas e com maior quantidade de berços ou maior tamanho em cais contínuo permitem a saída dos navios com maior antecedência, garantindo o atendimento da produção.

### ABSTRACT

Pelletizing plants produce iron ore pellets in batches, requiring stockyard area to store them, becoming necessary to define the yard location of each batch, aiming to not disrupt the production. It is also necessary to plan the ships queue that will take pellets out of the yards, releasing new spaces. The goal is to minimize production stoppage due to insufficient space in the yards. Thus, it is proposed a mathematical model to define the yard and the location within it for the batches, integrated to the ships queue. The model was tested in instances based in data from a pelletizing plant located in Anchieta, Espírito Santo. It was utilized CPLEX 12.8 to solve the model and the results has shown that store the batches in separated piles and with greater numbers of berths or with a larger quay size allow the sooner shipping departure date, ensuring the production planning attendance.

### 1. INTRODUÇÃO

Um dos principais insumos da indústria siderúrgica é a pelota de minério de ferro, um aglomerado de partículas finas de ferro obtido por meio do processo de pelletização. Em função de suas propriedades físico-químicas, as pelotas são utilizadas principalmente na alimentação dos altos-fornos, resultando em uma maior eficiência no processo de produção do aço. As pelotas de minério são produzidas em usinas pelletizadoras em lotes, de modo contínuo e ininterrupto, sendo armazenados nos pátios dos portos graneleiros até o momento em que são embarcados em navios para os clientes. Caso não haja disponibilidade de área nos pátios, a produção da usina precisa ser interrompida, gerando impactos financeiros consideráveis à empresa pelletizadora (Samarco, 2019).

Desta forma, os planejadores das usinas devem planejar qual o pátio e a localização de cada lote nele, de modo que haja espaço suficiente para armazenar os lotes de pelotas que estão planejados para serem produzidos. Ao mesmo tempo, devem planejar a fila de navios que irão retirar os lotes dos pátios de tal modo que espaços sejam liberados. O objetivo é minimizar eventuais paradas de produção por falta de espaço nos pátios. As informações conhecidas pelos planejadores são a data planejada de produção dos lotes e as datas estimadas de chegada dos navios que irão retirar estes lotes.

Para o planejamento das localizações das cargas nos pátios, é proposto na literatura o problema denominado *Yard Assignment Problem* (YAP) (Robenek *et al.*, 2014). Quanto ao planejamento da sequência de atracação dos navios, é proposto o Problema de Alocação de Berços (PAB) (Bierwirth e Meisel, 2010, 2015). Apesar da vasta quantidade de estudos publicados sobre o PAB, há uma escassez de trabalhos que tratam do PAB para portos graneleiros e, menos ainda, da sua integração com o YAP. Robenek *et al.* (2014) e Al-Hammadi e Diabat (2017) propuseram modelos que integrassem o PAB com o YAP em portos de diversos tipos de granéis. Boland *et al.* (2012), Babu *et al.* (2015) e Unsal e Oguz (2019) focaram em terminais de carvão. Todos os trabalhos tinham como foco a fila de navios. No presente artigo, o objetivo é minimizar a não aderência ao plano de produção de lotes de pelotas pela usina pelletizadora. Para tanto, deve-se reduzir o tempo entre o momento planejado para produzir e o momento que o pátio ficou liberado para receber a produção, ou seja, o efetivo início da produção. Para resolver este problema, este artigo propõe um modelo matemático para definir o pátio e a localização de cada pilha do lote integrado ao planejamento a fila de navios para atender ao plano de produção da usina, com o objetivo de minimizar eventuais paradas de produção por falta de espaço nos pátios do porto graneleiro.

O artigo foi organizado em seis seções. Na Seção 2 é apresentado o referencial teórico sobre o PAB. Na Seção 3 são apresentados o problema estudado e a geração das instâncias de testes. Na Seção 4 é proposto e explicado o modelo matemático. Na Seção 5 são apresentadas as análises dos resultados e na Seção 6 são apresentadas as conclusões.

## 2. PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS

O Problema de Alocação de Berços (PAB) é um dos problemas de maior destaque dentro do contexto do planejamento das operações portuárias. Dado um conjunto de navios a serem atendidos em um horizonte de tempo e um determinado layout do cais, o PAB consiste em atribuir as posições e os instantes de atracação aos navios, visando a otimização de um determinado objetivo, como, por exemplo, a minimização do tempo de permanência dos navios no porto (Bierwirth e Meisel, 2010, 2015).

Os modos comumente utilizados para classificar as formulações do PAB dizem respeito aos atributos temporais e espaciais. No que tange o aspecto temporal, o principal ponto analisado é o processo de chegada dos navios, classificado, principalmente, em: 1) chegada estática e 2) chegada dinâmica (Bierwirth e Meisel, 2010). Os modelos baseados em chegada estática consideram que todos os navios já estão aguardando na área de fundeio do porto, enquanto os modelos com chegada dinâmica adotam horários pré-determinados para a chegada dos navios. Conforme os atributos espaciais, o PAB pode ser classificado como: 1) PAB Discreto (PABD), 2) PAB Contínuo (PABC) e 3) PAB Híbrido (PABH) (Imai *et al.*, 2005). No PABD, o cais é dividido em seções (berços), de modo que cada berço só pode atender um único navio por vez. O PABC configura a situação em que não há divisão do cais, permitindo que os navios atraiquem em posições arbitrárias dentro dos limites do cais. O PABH é uma flexibilização do PABC, onde embarcações maiores podem ocupar mais de um berço, enquanto navios menores possuem a possibilidade de compartilhar uma única vaga.

Apesar da grande quantidade de trabalhos publicados sobre o PAB, a resolução deste problema no contexto de terminais de carga a granel é menos explorada. Barros *et al.* (2011) propuseram um modelo de programação linear inteira mista (MILP) e uma meta-heurística *Simulated*

*Annealing* (SA) para o PABC, considerando restrições de atendimento em função da maré e dos níveis de estoque dos tipos de granéis considerados. Umang *et al.* (2013) abordaram o PABH em um terminal de múltiplos tipos de granéis, visando a minimização dos tempos totais de serviço aos navios. Os autores propuseram uma formulação *Generalized set partition* (GSP) e uma meta-heurística *Squeaky Wheel Optimization* (SWO). Ribeiro *et al.* (2016) propuseram um modelo MILP e uma meta-heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) para o PABC em um terminal de minério de ferro considerando a *Charter Party*. Ernst *et al.* (2017) propuseram dois novos modelos MILP e uma abordagem em duas fases para a resolução do PABC em um terminal de granéis sólidos. Ambas as formulações, que visam minimizar o tempo total de atendimento dos navios.

A resolução conjunta do PAB com o YAP é vista como uma tendência, dada a influência deste na eficiência das operações portuárias (Bierwirth e Meisel, 2015). Para terminais de contêineres, a integração destes problemas vem sendo mais difundida. No que tange aos terminais de granéis, a literatura é considerada escassa. Robenek *et al.* (2014) estenderam o trabalho de Umang *et al.* (2013), integrando o PAB ao YAP. A nova formulação permite designar qual tipo de carga será alocada em cada área do pátio durante o horizonte de planejamento. Para a resolução do novo modelo, foi empregada uma abordagem *Branch-and-Price* (B&P). Al-Hammadi e Diabat (2017) apresentaram novas restrições, incluindo a definição de berços específicos para atender navios de alta tonelagem e a limitação de capacidade dos locais de armazenagem no pátio. Boland *et al.* (2012) apresentaram uma nova formulação e um algoritmo construtivo para o planejamento integrado da exportação de carvão em porto de Newcastle, na Austrália, considerando os equipamentos de pátio o PABD e o YAP. Babu *et al.* (2015) consideraram também a programação de trens, integrando-a ao planejamento da importação de carvão em um porto indiano. Unsal e Oguz (2019) estenderam o trabalho de Boland *et al.* (2012) e propuseram um algoritmo de decomposição de Benders para resolver o problema à sua otimalidade.

Após a revisão da literatura, este artigo se difere dos demais por ter como objetivo a redução do tempo entre o planejamento da produção e o efetivo início da produção que venha a ocorrer por falta de espaço no pátio. Ademais, o modelo proposto resolve tanto o PABD e o PABC. Também apresenta uma formulação distinta dos demais autores que resolveram problemas de portos a granel. Na Seção 4 é apresentado o modelo matemático proposto.

### 3. PROBLEMA ESTUDADO E GERAÇÃO DE INSTÂNCIAS

Nesta seção é descrito o problema estudado, que tem como base uma empresa de mineração, cujo principal produto é a pelota de minério de ferro. O processo produtivo se inicia na unidade localizada entre os municípios de Mariana e Ouro Preto, em Minas Gerais. O minério de ferro é extraído de minas a céu aberto e conduzido, por meio de correias transportadoras, aos concentradores, onde são realizadas as operações de beneficiamento. As operações de beneficiamento visam adequar o minério as especificações cabíveis para as próximas etapas, resultando em um concentrado com maior teor de ferro.

Posteriormente, o minério, acrescido de água, é transportado por meio de minerodutos até a planta de processamento localizada em Anchieta (ES), onde estão localizadas as usinas de pelotização. Nesta unidade, a polpa de minério de ferro passa inicialmente por processos de espessamento e filtragem para retirada da água. Em seguida, são adicionados insumos para permitir o pelotamento do material. Por fim, para adquirir as propriedades desejáveis, as pelotas

são endurecidas e finalizadas em tratamento térmico nos fornos da planta de processamento.

Após a sua produção, os lotes de pelotas são estocados nos pátios de armazenagem, onde permanecem até o momento do seu escoamento para o mercado consumidor, realizado por meio de um terminal portuário próprio. A Figura 1 apresenta a vista área da planta de processamento de Anchieta (ES), destacando a localização dos pátios de armazenagem e o terminal portuário.



**Figura 1:** Pátios de armazenagem de pelotas e vista área da planta em Anchieta (ES)

A área de armazenagem das pelotas é composta por três pátios distintos e adjacentes, conforme apresentado na Figura 1. Cada pátio possui subdivisões por balizas a cada 10 metros. De acordo com o seu volume, os lotes de pelotas são divididos em pilhas e alocados a uma área delimitada por um conjunto de balizas. Ressalta-se que a ocupação parcial de uma baliza é considerada como utilização inteira. Correias transportadoras são utilizadas para transportar as pelotas das usinas para os pátios e, posteriormente, para o porto.

O terminal portuário da empresa é composto por dois berços de atracação com capacidades distintas, alimentados por um sistema único de carregamento de navios. O problema abordado parte de uma programação da produção já definida, com datas conhecidas para a conclusão dos lotes de pelotas. A partir destas datas, o primeiro objetivo é definir as posições de cada uma das pilhas nos pátios de armazenagem. Assume-se, como premissa, que todas as pilhas ocupam os pátios integralmente em termos de largura. Assim, a decisão de posição diz respeito a qual pátio será utilizado e quais balizas do pátio selecionado serão ocupadas de acordo com o volume de cada pilha.

Os navios responsáveis por levar a produção ao mercado consumidor atracam no terminal portuário da empresa estudada. São informadas ao porto as datas estimadas de chegada de cada um dos navios, denominada *Estimated Time of Arrival* (ETA). Assumindo o ETA como as datas de prontidão para atracação dos navios, o segundo objetivo do problema tratado é definir os momentos e as posições de atracação dos navios no porto. As pilhas de pelotas permanecem no pátio até o momento em que são carregadas no seu navio de destino. Assim, para liberar área nos pátios para a armazenagem dos novos lotes, é necessária uma programação adequada da fila de navios, de modo a permitir um ritmo adequado de escoamento da produção. Considera-se, como premissa, que os navios só poderão atracar a partir do instante em que todas as pilhas a serem carregadas já estejam formadas no pátio.

Foram elaboradas 14 instâncias a fim de testar o modelo matemático proposto. Na elaboração, foram considerados os principais parâmetros que podem alterar o resultado do modelo. Para

todas as instâncias, foram considerados 10 navios para o carregamento de pelotas. Não há diferença entre as instâncias para as quantidades de pelota a serem carregadas, nem diferença na data de chegada dos navios no porto. Vale ressaltar que, neste estudo, o ETA é assumido como data de prontidão do navio para início de seu carregamento. Também foi considerada que a data de início de formação das pilhas é a data de término da produção das pelotas.

A Tabela 1 mostra as características de cada instância. A coluna (1 e 2) indicam os grupos de instâncias que serão testados. A coluna (3) representa a quantidade de pilhas a serem alocadas nos pátios de armazenagem de pelotas para que seja avaliado o impacto no resultado com maior flexibilidade para subdivisão de pilhas e conseqüentemente um aumento na taxa de recuperação e carregamento dos navios. As colunas (4 e 5) indicam o tipo de cais e suas características técnicas no porto, com foco em identificar o impacto que a maior flexibilidade para atracação de navios impacta no resultado do modelo. A coluna (6) representa a disponibilidade de área para armazenagem nos pátios com o intuito de identificar quanto a área disponível nos pátios de armazenagem afeta o resultado do modelo.

O Grupo 1 considera que cada navio será abastecido por pelotas armazenadas em pilhas únicas disponibilizadas nos pátios de armazenagem. Desta forma, a taxa de carregamento é menor, pois a recuperação das pelotas somente é realizada por um único equipamento que opera e retoma o material. O píer é considerado discreto, com quantidade de berços definidas. A Instância 1 considera que haverá um único berço para atracação dos navios e que não há restrição para alocação das pelotas nos pátios (ou seja, disponibilidade de 100% da área). A instância 2 se difere da instância 1 por considerar 2 berços para a atracação dos navios. As instâncias 3 e 4 apenas diferem das instâncias 1 e 2 por considerar uma restrição de 50% na disponibilidade de área para estocagem. O Grupo 2 considera que cada navio será abastecido por pelotas armazenadas em 2 pilhas distintas. Desta forma, a taxa de carregamento é maior, pois a recuperação das pelotas é realizada por dois equipamentos que operam ao mesmo tempo e retomam o material. Assim como no grupo 1, o píer no porto é considerado discreto com quantidade de berços definidas. As demais características das instâncias 5, 6, 7 e 8 são, respectivamente, as mesmas das instâncias 1, 2, 3 e 4. A hipótese levantada é que os resultados das instâncias do grupo 2 sejam melhores que as das instâncias do grupo 1. O Grupo 3 aborda a alteração do tipo de píer para contínuo e foi testado o impacto do aumento do tamanho do cais, permitindo uma maior quantidade de atracação simultânea de navios. Assim como no Grupo 2, foi considerado que cada navio será abastecido por pelotas armazenadas em 2 pilhas distintas para todas as instâncias. A instância 9 avalia o resultado em um porto com píer contínuo com tamanho de 300 m (suportando o navio com maior tamanho abordado no estudo) e não possui restrição para alocação das pelotas nos pátios de armazenagem (ou seja, disponibilidade de 100% da área). A instância 10 avalia o resultado em um porto com píer contínuo com tamanho de 500 m (2 vezes o tamanho médio dos navios) e não possui restrição para alocação das pelotas nos pátios. A instância 11 visa avaliar o resultado em um porto com píer contínuo com tamanho de 750 m (3 vezes o tamanho médio dos navios) e não possui restrição para alocação das pelotas nos pátios de armazenagem. As instâncias 12, 13 e 14 apenas diferem respectivamente das instâncias 9, 10 e 11 por considerar uma restrição de 50% na disponibilidade de área para estocagem. As instâncias do Grupo 3 visam avaliar qual é a melhor alternativa para o porto, se é trabalhar com berços discretos ou cais contínuos. As hipóteses levantadas são que os resultados das instâncias do grupo 3 testadas com píer com tamanho de 300m (Instâncias 9 e 12) sejam similares às instâncias do Grupo 2 que possuem 1 berço (Instâncias 5 e 7), que os resultados das instâncias do Grupo 3 testadas com píer com tamanho

de 500m (Instâncias 10 e 13) sejam similares às instâncias do Grupo 2, que possuem 2 berços (Instâncias 6 e 8) e as instâncias do Grupo 3 testadas com píer de 700m (Instâncias 11 e 14) possuam os melhores resultados da FO.

**Tabela 1: Características das instâncias**

Grupo	Inst.	Qtde Pilha (un)	Tipo Cais	Qtde Berços / Comp Cais	Disponibilidade pátio (%)	
1	1	10	Discreto (un)	1	100	
	2			2		
	3			1		
	4			2		
2	5	20	Discreto (un)	1	100	
	6			2		
	7			1		
	8			2		
3	9	20	Contínuo (m)	300	100	
	10			500		
	11			750		
	12			300		
	13			500		50
	14			750		

#### 4. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O modelo matemático proposto tem por objetivo resolver o problema descrito na seção anterior. Vale ressaltar que o modelo foi elaborado tanto para atender tanto portos com cais discreto, como o problema estudado, bem como, extrapolando o problema estudado, permite que sejam tratados portos com cais contínuo. O modelo matemático proposto permite realizar a alocação das pilhas de pelotas nos pátios de maneira integrada ao sequenciamento das operações de atracação e carregamento dos navios no porto. A análise do modelo permitirá a avaliação do equilíbrio entre a produção das pelotas e o escoamento no porto. Considerando  $nn$ , o número de navios;  $np$ , a quantidade de pilhas;  $nc$ , a quantidade de seções do cais (se for 1 o cais é considerado contínuo e para mais de um o cais é considerado discreto);  $na$ , a quantidade de seções de pátios. O modelo matemático é apresentado a seguir em cinco partes: conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, função objetivo e restrições.

Os conjuntos do modelo matemático são:  $NN$ , conjunto de navios,  $NN = \{1, \dots, nn\}$ ;  $NP$ , conjunto de pilhas,  $NP = \{1, \dots, np\}$ ;  $LN$ , conjunto de seções do cais,  $LN = \{1, \dots, nc\}$ ;  $LP$ , conjunto de seções de pátios,  $LP = \{1, \dots, na\}$ . Os parâmetros são:  $T$ , horizonte de tempo de planejamento;  $pn_i$ , tempo de operação (carregamento) do navio  $i \in NN$  em unidade de tempo (hora);  $sn_i$ , comprimento do navio  $i \in NN$  em unidade de cais (1 metro), incluindo a folga entre navios;  $an_i$ , momento de chegada do navio  $i \in NN$  ao porto;  $pin_c$ , limite inicial da seção do cais  $c \in LN$  em unidade de cais (1 metro);  $pfnc$ , limite final da seção do cais  $c \in LN$  em unidade de cais (1 metro);  $pip_a$ , limite inicial da seção do pátio  $a \in LP$  em unidade de pátio (1 baliza);  $pfpa$ , limite final da seção do pátio  $a \in LP$  em unidade de pátio (1 baliza);  $pp_p$ , tempo de processamento pilha (produção)  $p \in NP$  no pátio unidade tempo (hora);  $sp_p$ , tamanho da pilha  $p \in NP$  em unidade de pátio (1 baliza);  $ap_p$ , momento de necessidade de área do pátio para a pilha  $p \in NP$  (unidade hora) e  $pqn_p$ , define o número do navio ao qual a pilha  $p \in NP$  pertence.  $\Psi$ , peso utilizado na função objetivo para dar maior ênfase na redução do tempo de

atraso na produção, adotado com o valor igual a 10.

As variáveis de decisão são:  $un_i$ , momento de atracação do navio  $i \in NN$ ;  $cn_i$ , momento de desatracação do navio  $i \in NN$ ;  $vn_i$ , posição de atracação do navio  $i \in NN$ ;  $up_p$ , momento de início da produção da pilha  $p \in NP$ ;  $cp_p$ , momento de liberação do pátio após o carregamento da pilha  $p \in NP$  no navio a qual pertence;  $vp_p$ , posição inicial da pilha  $p \in NP$  em unidade de pátio (1 baliza); Considerando-se o diagrama espaço-tempo com o tempo como abscissa e o cais como ordenada, têm-se as seguintes variáveis de decisão binárias:  $oln_{ijc}$ , assume valor igual a 1 se o retângulo do próximo navio  $j \in NN$  a atracar estiver totalmente acima do retângulo referente ao navio  $i \in NN$  no diagrama espaço-tempo e não houver sobreposição estando ambas no cais  $c \in LN$ ; 0, caso contrário;  $otn_{ijc}$ , assume valor igual a 1 se o retângulo do próximo navio  $j \in NN$  a atracar estiver totalmente à direita do retângulo referente ao navio  $i \in NN$  no diagrama espaço-tempo e não houver sobreposição estando ambas no cais  $c \in LN$ ; e 0, caso contrário;  $olp_{pqa}$ , assume valor igual a 1 se o retângulo do próxima pilha  $q \in NP$  a atracar estiver totalmente acima do retângulo referente ao navio  $p \in NP$  no diagrama espaço-tempo e não houver sobreposição estando ambas no pátio  $a \in LP$ ; e 0, caso contrário;  $otp_{pqa}$ , assume valor igual a 1 se o retângulo do próximo navio  $q \in NP$  a atracar estiver totalmente à direita do retângulo referente ao navio  $p \in NP$  no diagrama espaço-tempo e não houver sobreposição estando ambas no pátio  $a \in LP$ ; e 0, caso contrário;  $tn_{ic}$ , assume valor 1 se o navio  $i \in NN$  estiver na seção de cais  $c \in LN$ ; 0 caso contrário;  $tp_{pa}$ , assume valor 1 se a pilha  $p \in NP$  estiver no pátio  $a \in LP$ ; 0 caso contrário. Nas restrições apresentadas a seguir, o símbolo  $\rightarrow$  representa uma restrição lógica, não linear, que é resolvida pelo *solver* CPLEX 12.8 utilizado para resolver o modelo matemático proposto.

### Função Objetivo:

$$\text{Minimizar } \Psi \sum_{p \in NP} (up_p - ap_p) + \sum_{i \in NN} (cn_i - an_i) \quad (1)$$

### Sujeito a:

Referente aos navios e os cais

$$(tn_{ic} = 1 \text{ and } tn_{jc} = 1) \rightarrow (un_j - un_i - pn_i - (otn_{ijc} - 1)T \geq 0) \quad \forall i, j \in NN, c \in LN, | i \neq j \quad (2)$$

$$(tn_{ic} = 1 \text{ and } tn_{jc} = 1) \rightarrow (vn_j - vn_i - sn_i - (oln_{ijc} - 1) pfn_c) \geq 0 \quad \forall i, j \in NN, c \in LN, | i \neq j \quad (3)$$

$$oln_{ijc} + oln_{jic} + otn_{ijc} + otn_{jic} \geq 1 \quad \forall i, j \in NN, c \in LN, | i \neq j \quad (4)$$

$$oln_{ijc} + oln_{jic} \geq 1 \quad \forall i, j \in NN, a \in LN, | i \neq j \quad (5)$$

$$pn_i + un_i = cn_i \quad \forall i \in NN \quad (6)$$

$$an_i \leq un_i \leq (T - pn_i) \quad \forall i \in NN \quad (7)$$

$$cn_i \leq T \quad \forall i \in NN \quad (8)$$

$$(tn_{ic} = 1 \text{ and } tn_{jc} = 1) \rightarrow (un_j - cn_i - (otn_{ijc} - 1)T \geq 0) \quad \forall i, j \in NN, c \in LN, | i \neq j \quad (9)$$

$$(tn_{ic} = 0 \text{ or } tn_{jc} = 0) \rightarrow (oln_{ijc} = 1) \quad \forall i, j \in NN, c \in LN \quad (10)$$

$$(tn_{ic} = 1) \rightarrow (vn_i \leq pfn_i - sn_i) \quad \forall i \in NN, c \in LN \quad (11)$$

$$(tn_{ic} = 1) \rightarrow (vn_i \geq pin_c) \quad \forall i \in NN, c \in LN \quad (12)$$

$$(vn_i \geq pfn_c) \rightarrow (tn_{ic} = 0) \quad \forall i \in NN, c \in LN \quad (13)$$

$$\sum_{c \in NN} tn_{ic} = 1 \quad \forall i \in NN \quad (14)$$

Referente às pilhas e aos pátios (15)

$$(tp_{pa} = 1 \text{ and } tp_{qa} = 1) \rightarrow \quad \forall p, q \in NP, a \in LP, | p \neq q \quad (16)$$

$$(up_q - cp_p - (ot_{pqa} - 1) T \geq 0) \quad \forall p, q \in NP, a \in LP, | p \neq q \quad (17)$$

$$(tp_{pa} = 1 \text{ and } tp_{qa} = 1) \rightarrow \quad \forall p, q \in NP, a \in LP, | p \neq q \quad (17)$$

$$(vp_q - vp_p - sp_p - (ol_{pqa} - 1) pfp_a \geq 0) \quad \forall p, q \in NP, a \in LP, | p \neq q \quad (17)$$

$$(tp_{pa} = 0 \text{ or } tn_{qa} = 0) \rightarrow (ol_{pqa} = 1) \quad \forall i, j \in NN, c \in LN \quad (18)$$

$$ol_{pqa} + ol_{qpa} + ot_{pqa} + ot_{qpa} \geq 1 \quad \forall p, q \in NP, a \in LP, | p \neq q \quad (19)$$

$$ap_p \leq up_p \leq (T - pp_p) \quad \forall p \in NP \quad (20)$$

$$(tp_{pa} = 1) \rightarrow (vp_p \leq pfp_a - sp_p) \quad \forall p \in NP, a \in LP \quad (21)$$

$$(tp_{pa} = 1) \rightarrow (vp_p \geq pip_a) \quad \forall p \in NP, a \in LP \quad (22)$$

$$(vp_p \geq pfp_a) \rightarrow (tp_{pa} = 0) \quad \forall p \in NP, a \in LP \quad (23)$$

$$\sum_{a \in LP} tp_{pa} = 1 \quad \forall p \in NP \quad (24)$$

$$cp_p \geq up_p + pp_p \quad \forall p \in NP \quad (25)$$

$$cp_p \leq T \quad \forall p \in NP \quad (26)$$

Referente à integração navio/cais e pilha/pátio (27)

$$un_i \geq up_p + pp_p \quad \forall i \in NN, p \in NP | pqn_p = i \quad (28)$$

$$cn_i = cp_p \quad \forall i \in NN, p \in NP | pqn_p = i \quad (29)$$

$$ol_{n_{ijc}} \in \{0,1\}, ot_{n_{ijc}} \in \{0,1\} \quad i, j \in NN, c \in LN \quad (30)$$

$$ol_{pqa} \in \{0,1\}, ot_{pqa} \in \{0,1\} \quad p, q \in NP, a \in LP \quad (31)$$

$$un_i, vn_i, cn_i \in \mathbb{R}^+ \quad i \in NN \quad (32)$$

$$up_p, vp_p, cp_p \in \mathbb{R}^+ \quad p \in NP \quad (33)$$

$$tn_{ic} \in \{0,1\} \quad i \in NN, c \in LN \quad (34)$$

$$tp_{pa} \in \{0,1\} \quad p \in NP, a \in LP \quad (35)$$

A Função Objetivo (FO), Equação (1), representa o tempo entre o momento de necessidade de área do pátio para produção para o momento em si de início da produção da pilha e sua disposição no pátio. Esta parte é multiplicada pelo parâmetro  $\Psi$  para dar maior ênfase a esta parte da FO. A segunda parte representa o tempo total dos navios no porto. Toda a FO deve ser minimizada. Apresenta-se a seguir as restrições referentes aos navios/cais. As Restrições (2) garantem que no período não haja sobreposição na dimensão tempo dos navios no diagrama espaço-tempo. As Restrições (3) garantem que caso dois navios estejam na mesma seção de cais, não haja sobreposição na dimensão espaço no mesmo diagrama, considerando a dimensão de cada pátio. As Restrições (4) obrigam que pelo menos uma dessas variáveis seja igual a 1, garantindo assim, a atracação dos navios sem sobreposição com outros navios em tempo e espaço. As Restrições (5) garantem que não haja sobreposição na dimensão tempo quando os navios estão na mesma seção de cais, isto para o caso discreto. As Restrições (6) garantem que o tempo de término do navio seja igual ao tempo de sua atracação somado ao tempo de sua operação de carregamento. As Restrições (7) garantem que a atracação ocorra depois do momento de chegada do navio e antes do limite de horizonte de tempo de planejamento menos o tempo de operação de carregamento do navio. As Restrições (8) garantem que a desatracação do navio ocorra antes do término do horizonte de planejamento. As Restrições (9) asseguram que caso dois navios estejam na mesma seção de cais, então, a atracação do navio posterior ocorre após a atracação do navio anterior. As Restrições (10) garantem que se dois navios não estão na mesma seção de cais, então não haverá sobreposição entre eles. As Restrições (11)



asseguram que se um navio está em uma seção de cais, então sua posição de atracação deve ser menor que o comprimento da seção menos seu próprio comprimento. As Restrições (12) verificam, caso o navio esteja em uma seção do cais, que sua posição de atracação deve ser maior que o início da seção do cais. As Restrições (13) garantem que caso a posição de atracação do navio seja maior que a posição fim de uma seção de cais, então o navio não pode estar atracado nesta seção,  $tn_{ic} = 0$ . As Restrições (14) garantem que um navio seja atracado em apenas em uma seção de cais.

Apresenta-se a seguir as restrições referentes às pilhas/pátio. As Restrições (15), caso duas pilhas estejam na mesma seção de pátio, garantem, então, que o início de armazenagem em tempo de uma deverá maior que o fim da próxima. As Restrições (16), caso duas pilhas estejam na mesma seção de pátio, garantem, então, que o início da localização de uma deverá maior que o fim da próxima menos seu o comprimento desta. As Restrições (17) garantem que se pelo uma das duas pilhas não está na mesma seção de pátio, então não haverá sobreposição entre elas. As Restrições (18) obrigam que pelo menos uma dessas variáveis seja igual a 1, garantindo assim, que os lotes de pelotas ocupem balizas no pátio sem que haja sobreposição com outras balizas já utilizadas em tempo e espaço. As Restrições (19) asseguram que a data de início do empilhamento no pátio seja maior ou igual à data de necessidade de produção desta pilha e menor ou igual que o horizonte de tempo de planejamento menos o tempo de armazenamento dela. As Restrições (20) garantem que se uma pilha está numa seção do pátio, então sua posição final na seção deve ser menor que o fim da seção menos seu comprimento. As Restrições (21) garantem que se uma pilha está numa seção do pátio, então sua posição inicial na seção deve ser maior que o início da seção. As Restrições (22) garantem que se a posição inicial de uma pilha seja maior que a posição final de uma seção, então esta pilha não pode estar nesta seção,  $tp_{pa} = 0$ . As Restrições (23) asseguram que uma pilha pode estar em somente uma seção de pátio. As Restrições (24) calculam que o tempo de fim de armazenagem da pilha seja igual ao seu tempo de início mais o tempo de armazenagem da pilha. As Restrições (25) garantem que o fim de armazenagem seja menor que o horizonte de planejamento. Apresenta-se a seguir as restrições referentes a integração dos navios/cais com às pilhas/pátio. As Restrições (26) garantem que a atracação do navio só pode ocorrer após o início de armazenagem de todas as pilhas que irão ser carregadas mais seus tempos de armazenagem. As Restrições (27) definem que o tempo de desatracação é igual ao tempo de fim de armazenagem de todas as pilhas que são carregadas nele. As Restrições (30) a (35) definem o domínio das variáveis de decisão.

## 5. ANÁLISES DOS RESULTADOS

Para executar o modelo proposto foi utilizado o *solver* CPLEX, versão 12.8. Foi utilizado um computador Intel Xeon Silver 4116, 2 processadores de 2.10 GHz com 16 núcleos, 128 GB de memória RAM. As instâncias foram executadas com um limite de 10 horas. Na Tabela 2 são apresentados os resultados do CPLEX. A primeira e segunda colunas representam respectivamente os grupos e as instâncias testadas. A terceira coluna representa o valor obtido na Função Objetivo (FO) em horas. A quarta coluna representa o tempo de execução do CPLEX (TE) em segundos. A quinta coluna representa o momento de desatracação do último navio (HDUN) em horas. O CPLEX encontrou a solução ótima para todas as instâncias com gap de 0%. Das 14 instâncias testadas, 11 (79% do total) tiveram solução com tempo de execução menor de que 3 minutos e apenas as instâncias 3, 7 e 12 (21% do total) tiveram solução com tempo de execução variando de 18 a 28 minutos, sendo justamente as instâncias que possuem limitação na área disponível do pátio associada a menor quantidade de berços (píer discreto) ou menor tamanho no caso de píer contínuo (300 m), indicando que o modelo apresenta maior

tempo de resposta quando se aumentam as restrições.

**Tabela 2: Resultados do CPLEX**

Grupo	Inst.	FO (h)	TE (s)	HDUN (h)
1	1	1802	138	454
	2	1270	6	373
	3	1822	1649	454
	4	1270	7	373
2	5	1101	163	298
	6	759	25	242
	7	1101	1062	298
	8	759	36	242
3	9	1101	161	298
	10	708	28	225
	11	535	30	165
	12	1101	1210	298
	13	708	160	225
	14	535	147	165

De acordo com a Figura 2, é possível confirmar que os resultados das instâncias do Grupo 2 estão melhores que as das instâncias do grupo 1 (hipótese levantada na descrição das instâncias). Além disso, também podemos identificar que o aumento do número de berços favorece o resultado da FO. A redução da disponibilidade dos pátios somente alterou o resultado da FO para as instâncias que possuíam apenas 1 berço e 10 pilhas, ou seja, uma menor flexibilidade total do sistema fez com que a FO piorasse. De acordo com a Figura 3, é possível afirmar que a influência do tipo de porto (cais com berços discretos ou contínuos) depende do tamanho do cais contínuo. Para o cais contínuo de 300 m (similar ao cais discreto com 1 Berço), não houve alteração nos resultados. Para o cais contínuo de 500 m (similar ao cais discreto com 2 Berços), contrariando a hipótese levantada, os resultados foram ligeiramente melhores demonstrando que o aumento da flexibilidade com este tipo de cais traz vantagens. Adicionalmente, foi realizada uma rodada de teste com cais contínuo de 750m que melhorou os resultados da FO.



**Figura 2: Avaliação de Resultados – Grupo 1 versus Grupo 2**

Pode-se também verificar que a hora de desatracação do último navio (HDUN) das instâncias do Grupo 1 são mais tardias. A data de saída do último navio das instâncias do Grupo 2 e 3 são similares e menos tardias que o resultado do Grupo 1. Vale ressaltar que as instâncias 11 e 14 do Grupo 3 tiveram menor HDUN e menor resultado na FO por possuírem um cais contínuo de

750m. Para os resultados de todas as instâncias, foi elaborada, no software Matlab R2018a, uma apresentação gráfica dos resultados do planejamento da atracação dos navios e da distribuição das pilhas no pátio. A Figura 4 ilustra o resultado da Instância 1.

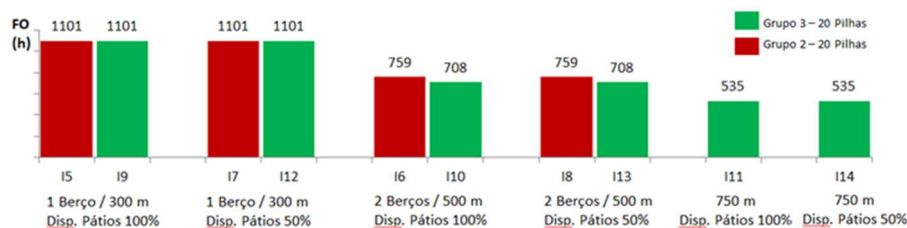


Figura 3: Avaliação de Resultados – Grupo 2 versus Grupo 3

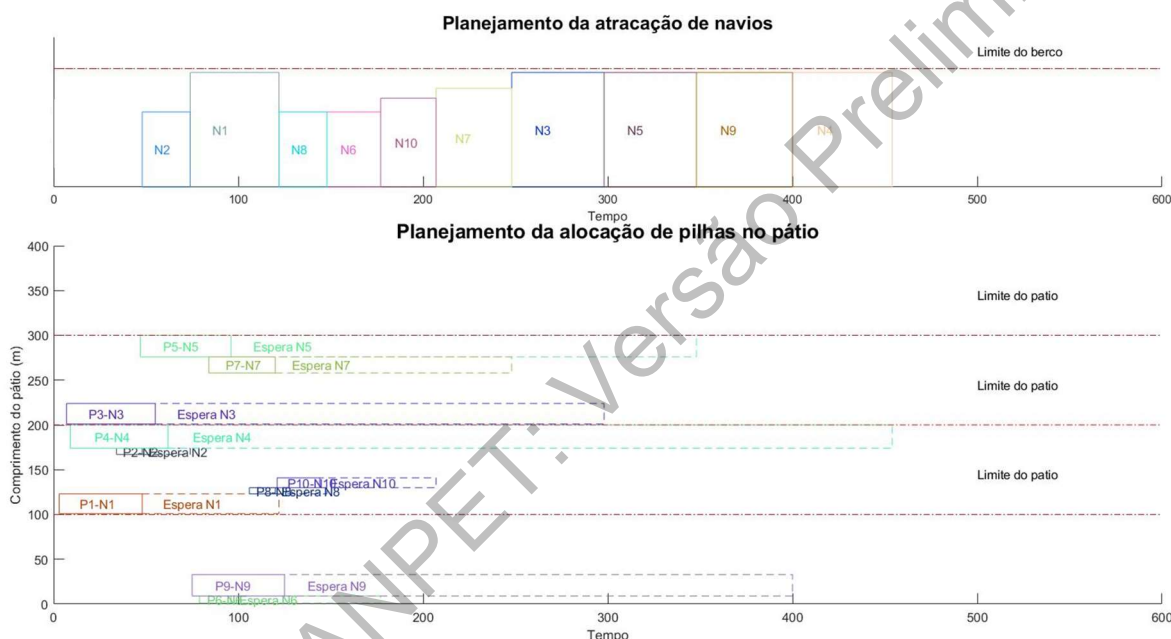


Figura 4: Resultado gráfico da Instância 1

Assim, o modelo matemático proposto pode ser visto como uma ferramenta inovadora para a empresa, promovendo o planejamento integrado da produção de pelotas com a atracação de navios no porto, considerando o espaço no pátio como fator crítico para permitir a produção em lotes. Também é inovadora, pois, até o momento, não foram encontrados artigos que integrassem o planejamento da produção com a designação de área de pátio e a sequência de atracação de navios. O modelo extrapola o problema estudado e pode ser usado tanto para portos com layout de cais discreto ou contínuo.

## 6. CONCLUSÕES

As decisões de designação das áreas nos pátios para estocagem das pelotas produzidas, e a gestão da fila dos navios responsáveis pelo escoamento da produção são essenciais para garantir a disponibilidade de área de armazenagem, permitindo a continuidade da produção das usinas pelletadoras. Considerando a complexidade do problema, o desenvolvimento de uma ferramenta que auxilie, de modo integrado, nas tomadas de decisões é de suma importância no planejamento de produção e vendas das empresas produtoras de pelotas de minério de ferro. A maior preocupação é que este sistema complexo esteja sempre balanceado de tal forma a não

ocasionar paradas na linha de produção devido falta de espaço nos pátios para a armazenagem das pelotas.

O modelo proposto no estudo foi capaz de resolver o problema de priorização da produção e armazenagem das usinas pelotizadoras. Além disso, foi capaz de analisar questões sobre o layout de pátio, considerando restrição em sua área para estocagem, e também permitiu avaliar o impacto de alterações no porto como aumento da quantidade de berços em cais tipo discreto e aumento do tamanho de cais para berços contínuos. Importante ressaltar que o modelo elaborado pode ser usado e aplicado em qualquer indústria pelotizadora no mundo, incluindo aquelas que possuem porto próprio ou sistema de escoamento de seu produto por meios terrestres (trens ou caminhões). Sugere-se como trabalho futuro o desenvolvimento de uma meta-heurística para resolver o modelo matemático proposto neste artigo.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPES (75528452/2016), ao CNPq (307439/2016-0) e a CAPES pelo apoio financeiro.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Hammadi, J. e Diabat, A. (2017) An Integrated Berth Allocation and Yard Assignment Problem for Bulk Ports: Formulation and Case Study. *RAIRO Operations Research*, v. 51, p. 267-284.
- Babu, S. A. I.; Pratap, S.; Lahoti, G.; Fernandes, K. J.; Tiwari, M. K.; Mount, M. e Xiong, Y. (2015) Minimizing Delay of Ships in Bulk Terminals by Simultaneous Ship Scheduling, Stockyard Planning and Train Scheduling. *Maritime Economics & Logistics*, v. 17, n. 4, p. 464-492.
- Barros, V. H.; Costa, T. S.; Oliveira, A. C. M. e Lorena, L. A. N. (2011) Model and Heuristic for Berth Allocation in Tidal Bulk Ports with Stock Level Constraints. *Computers & Industrial Engineering*, v. 60, n. 4, p. 606-613.
- Bierwirth, C. e Meisel, F. (2010) A Survey of Berth Allocation and Quay Crane Scheduling Problems in Container Terminals. *European Journal of Operational Research*, v. 202, n. 3, p. 615-627.
- Bierwirth, C. e Meisel, F. (2015) A Follow-up Survey of Berth Allocation and Quay Crane Scheduling Problems in Container Terminals. *European Journal of Operational Research*, v. 244, n. 3, p. 675-689.
- Boland, N.; Gulczynski, D. e Savelsbergh, M. (2012) A Stockyard Planning Problem. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, v. 1, n. 3, p. 197-236.
- Ernst, A. T.; Oguz, C.; Singh, G. e Taherkhani, G. (2017) Mathematical Models for the Berth Allocation Problem in Dry Bulk Terminals. *Journal of Scheduling*, v. 20, n. 5, p. 459-473.
- Imai, A.; Sun, X.; Nishimura, E. e Papadimitriou S. (2005) Berth Allocation in a Container Port: Using a Continuous Location Space Approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 39, n. 3, p. 199-221.
- Ribeiro, G. M.; Mauri, G. R.; Beluco, S. C.; Lorena, L. A. N. e Laporte, G. (2016) Berth Allocation in an Ore Terminal with Demurrage, Despatch and Maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, v. 96, p. 8-15.
- Robenek, T.; Umang, N.; Bierlaire, M. e Ropke, S. (2014) A Branch-and-Price Algorithm to Solve the Integrated Berth allocation and Yard Assignment Problem in Bulk Ports. *European Journal of Operational Research*, v. 235, n. 2, p. 399-411.
- Samarco (2019) Disponível em: <<https://www.samarco.com/produto/>>. Acesso em: 4 jan. 2019.
- Umang, N.; Bierlaire, M. e Vacca, I. (2013) Exact and Heuristic Methods to Solve the Berth Allocation Problem in Bulk Ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 54, p. 14-31.
- Unsal, O. e Oguz, C. (2019) An Exact Algorithm for Integrated Planning of Operations in Dry Bulk Terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 126, p. 103-121.

---

Thiago Bortal Oliveira Braga (bortal.bortal@gmail.com); Jonas Paluci Barbosa (jpalucibarbosa@hotmail.com); Rodrigo de Alvarenga Rosa (rodrigo.a.rosa@ufes.com); Bruna Santos Neves (brunasantosneves@hotmail.com)  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo - Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras - Vitória, ES, Brasil.