



Problema Integrado de Planejamento e Sequenciamento de produtos: Formulações e Algoritmos

Gustavo Campos Menezes

Departamento de Eletroeletrônica e Computação, Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais
Avenida Doutor Antônio Chagas Diniz 655 ,CEP 32210-160, Cidade Industrial, Contagem, MG,
Brasil
gustavo@cefetmg.br

Geraldo Robson Mateus

Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627 ,CEP 31270-010 ,Belo Horizonte ,MG, Brazil.
mateus@dcc.ufmg.br

RESUMO

Este artigo apresenta um problema integrado de planejamento e sequenciamento de produtos aplicado a terminais portuários. O problema consiste em definir a quantidade e destino de cada produto no terminal e, ao mesmo tempo, estabelecer um conjunto de rotas viáveis para que estes produtos sejam estocados ou despachados para os navios dentro do prazo. São discutidas duas formulações matemáticas, bem como o uso de uma heurística hierárquica. Os experimentos computacionais demonstram a efetividade da heurística e a dificuldade de pacotes de otimização em resolver o problema.

PALAVRAS CHAVE. Planejamento integrado, Sequenciamento, Logística.

Tópicos (L&T - Logística e Transportes; MH - Metaheurísticas)

ABSTRACT

This paper describes a real production planning and scheduling problem found in bulk cargo terminals. The problem is to define the amount and destination of each product in a terminal and, at the same time, to establish a set of feasible routes to guarantee that products are stored and shipped on schedule. Two mathematical formulations and the use of a hierarchical heuristic are discussed. Computational experiments demonstrate the effectiveness of the heuristic and the difficulty of optimization packages in solving the problem.

KEYWORDS. Integrated planning. Scheduling. Logistics

Paper topics (L&T - Logistics and Transport; MH Metaheuristics)



1. Introdução

O Brasil é um dos maiores exportadores de minério de ferro do mundo. Dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários, ANTAQ [2013] mostram que este produto respondeu por 36,4% do total de mercadorias movimentadas pelas instalações portuárias brasileiras. O terminal portuário em estudo, conta com vários equipamentos diferentes para fazer o embarque de minério nos navios : viradores de vagão, correias transportadoras, empilhadeiras e retomadoras de minérios. Os principais produtos movimentados são minério de ferro e pelotas, carvão, grãos, fertilizantes e granéis líquidos (combustíveis).

O complexo portuário pode ser representado como um conjunto de três subsistemas: Recepção, Pátios e Píeres. Os minérios provenientes das minas chegam até o subsistema Recepção através do sistema ferroviário. Na Recepção, os produtos podem ser transferidos diretamente para os navios atracados ou para uma área de estoque (pátios). Quando o navio atraca em um dos píeres, é gerada uma demanda que precisa ser atendida. Além de decidir o destino da carga e a quantidade de produtos, é necessário escolher uma ou mais rotas para fazer o transporte.

As rotas são uma combinação de equipamentos e definem as várias opções de caminhos por onde os produtos podem ser transportados para os subsistemas. Caso um determinado par de rotas compartilhe algum equipamento, estas rotas não podem ficar ativas simultaneamente. A Figura 1 exibe um caso em que duas rotas (rotas 1 e 2) compartilham um equipamento.

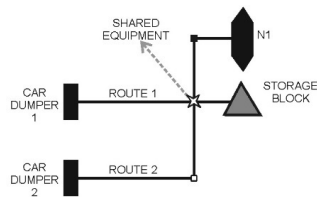


Figura 1: Rotas com equipamentos compartilhados

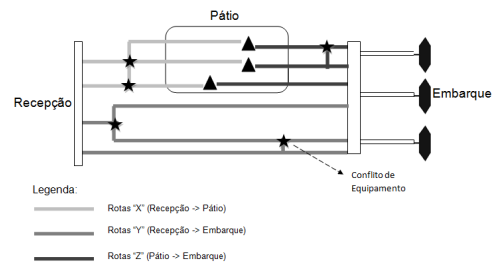


Figura 2: Subsistemas e Rotas

A Figura 2 destaca os três subsistemas (Recepção, Pátio e Embarque), além de exibir os três tipos de rotas existentes: rotas que transportam diretamente os produtos da recepção para o embarque (Rotas Y), as rotas que estocam os produtos da recepção nos pátios (Rotas X) e as rotas que recuperam os produtos do pátio para entrega nos navios (Rotas Z).

O subsistema Pátios é constituído de grandes áreas para armazenagem de minério. Cada área de estocagem é subdividida em diversas áreas menores, que serão chamadas neste artigo de subáreas. São nas subáreas que os produtos são armazenados. A Figura 3 apresenta uma visão geral do subsistema Pátio. As subáreas 1,4,6 e 8 possuem produtos armazenados. A Figura 4 apresenta uma visão geral do porto incluindo os três subsistemas: recepção, pátio e píeres.

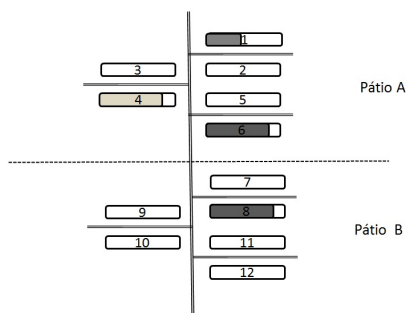


Figura 3: Subsistema Pátios

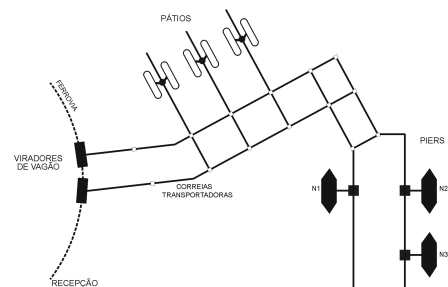


Figura 4: Complexo portuário e seus subsistemas.



O problema de otimização que motivou o desenvolvimento desta pesquisa pode ser definido da seguinte forma: seja uma oferta de produtos (minério de ferro) disponível na recepção e no pátio, e uma demanda que precisa ser atendida nos píeres. O problema consiste em planejar a produção, ou seja, definir a quantidade e o destino para cada produto existente na recepção e no pátio e, ao mesmo tempo, ativar um conjunto de rotas viáveis (onde não existe conflito entre equipamentos) para garantir que os navios sejam carregados com os melhores produtos (que atenda a qualidade) dentro do prazo. No restante deste artigo, este problema será definido como: Problema de Planejamento e Sequenciamento do Fluxo de Produtos e será referenciado pela sigla *PPSFP*.

1.1. Formulação para o PPSFP

O modelo matemático descrito a seguir, inicialmente proposto em Menezes et al. [2017], integra os problemas de planejamento, sequenciamento e alocação de pátios. A formulação proposta é bastante flexível e pode ser utilizada com algumas alterações em outros terminais portuários de transporte de grânéis sólidos (minérios, carvão, grãos). O planejamento de toda a produção é realizado para certo horizonte de tempo discretizado em T períodos. Os principais desafios que são focos desta pesquisa estão concentrados na alocação de produtos no pátio e na alocação e sequenciamento das rotas para atender a oferta e demanda. A Tabela 1 apresenta os conjuntos e parâmetros do modelo. A Tabela 2 apresenta todas as variáveis de decisões utilizadas na formulação. Estas variáveis estão associadas com a alocação de subáreas, alocação e sequenciamento das rotas e com a oferta e demanda não atendidas em cada período.

Tabela 1: Definição dos conjuntos e Parâmetros para o PPSFP

Conjunto	Descrição	Parâmetro	Descrição
T	Conjunto de períodos.	a_{pt}	Oferta do produto p no início do período t .
P	Conjunto de produtos.	d_{npt}	Demanda do produto p no berço de atracação n , no início do período t .
S	Conjunto de subáreas.	K	Constante de valor elevado.
R^x	Conjunto de rotas (Recepção/Pátio).	l_{pt}^s	Capacidade de armazenamento da subárea s para o produto p no período t .
R_s^x	Subconjunto de rotas x que alcançam a subárea s .	b^m	Capacidade do equipamento m (em t/h).
R^y	Conjunto de rotas (Recepção/Píer).	j_t^m	Tempo disponível (em horas) para a utilização do equipamento m no período t .
R^z	Conjunto de rotas (Pátio/Píer).	H_t	Tempo total disponível para o período t (em horas).
R_s^z	Subconjunto de rotas z que partem da subárea s .	c^{rx}	Capacidade (em t/h) da rota $r \in R^x$.
M	Conjunto de equipamentos.	c^{ry}	Capacidade (em t/h) da rota $r \in R^y$.
R_m^x	Subconjunto de rotas x que utilizam o equipamento m .	c^{rz}	Capacidade (em t/h) da rota $r \in R^z$.
R_m^y	Subconjunto de rotas y que utilizam o equipamento m .	β_{npt}	Penalidade em não atender a demanda do produto p atracado no berço n no período t .
R_m^z	Subconjunto de rotas z que utilizam o equipamento m .	α_{pt}	Penalidade em não atender a oferta do produto p no período t .
R	Conjunto de todas as rotas. $R = R^x \cup R^y \cup R^z$.	$\gamma_{pp't}^s$	Custo de preparação associado com a substituição do produto p pelo produto p' na subárea s no período t .
N	Conjunto de berços de atracação.	$\lambda_{pp'}$	Custo associado com a troca do produto p pelo produto p' para atender a demanda do produto p . Quando $p = p'$, $\lambda_{pp'} = 0$.
E	Conjunto de pares de rotas que compartilham pelo menos um equipamento para transporte de produtos.	σ^r	Custo de manutenção pelo uso da rota $r \in R$.



Tabela 2: Variáveis

Variável	Descrição
$f_{pt}^s \in \{0, 1\}, \forall s \in S, \forall p \in P, \forall t \in T.$	Seu valor é 1 quando a subárea s está alocada para o produto p no período t .
$0 \leq S f_{pp't}^s \leq 1, \forall s \in S, \forall p \in P, \forall p' \in (P \cup 0), p \neq p', \forall t \in T.$	Seu valor é 1 quando o produto p foi substituído pelo produto p' no período t . Esta substituição só pode acontecer quando no período anterior ($t - 1$) a quantidade do produto p na subárea s esgotou.
$x_{pt}^r \geq 0, \forall r \in R^x, \forall p \in P, \forall t \in T.$	Tempo utilizado no período t para transportar o produto p da recepção até o pátio, utilizando a rota $r \in R^x$.
$y_{pp't}^r \geq 0, \forall r \in R^y, \forall p, p' \in P, \forall t \in T.$	Tempo utilizado para transportar o produto p' para atender a demanda do produto p no período t utilizando a rota $r \in R^y$. Quando p' é igual a p , o produto entregue é o mesmo que foi solicitado.
$z_{pp't}^r \geq 0, \forall r \in R^z, \forall p, p' \in P, \forall t \in T.$	Tempo utilizado para transportar o produto p' para atender a demanda do produto p no período t utilizando a rota $r \in R^z$. Quando p' é igual a p , o produto entregue é o mesmo que foi solicitado.
$e_{pt}^s \geq 0, \forall s \in S, \forall p \in P, \forall t \in T.$	Quantidade do produto p estocado na subárea s no período t .
$IR_{pt} \geq 0, \forall p \in P, \forall t \in T.$	Representa a quantidade do produto p presente no subsistema Recepção que não foi entregue até o final do período t .
$IP_{npt} \geq 0, \forall n \in N, \forall p \in P, \forall t \in T.$	Representa a quantidade do produto p que não foi entregue no berço de atracação n até o final do período t .
$t_{pp't}^r \geq 0, \forall r \in R, \forall p, p' \in P, \forall t \in T.$	Tempo de início da operação de processamento utilizando a rota $r \in R$ no período t . Para cada variável $x_{pt}^r, y_{pp't}^r$ e $z_{pp't}^r$, existe um tempo de início ($t_{pp't}^r$). Quando $t_{pp't}^r$ está associado com x_{pt}^r, p e p' são o mesmo produto.
$u_{pp't}^r \in \{0, 1\}, \forall r \in R, \forall p, p' \in P, \forall t \in T.$	Seu valor é 1 se o produto p' usa a rota r do conjunto R no período t . Para todo $r \in R^x, p = p'$.
$\theta_{pp'\hat{p}t}^{rr'} \in \{0, 1\}, \forall r, r' \in E, \forall p, p', \hat{p} \in P, \forall t \in T.$	Seu valor é 1 se o produto p ou p' (utilizado para atender p) precede o produto \hat{p} ou \hat{p}' (utilizado para atender \hat{p}) nas rotas com conflito $r, r' \in E$ no período t .

$$\begin{aligned} \min f(z) = & \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \alpha_{pt} IR_{pt} + \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \beta_{npt} IP_{npt} \\ & + \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{p' \in (P \cup 0)} \sum_{t \in T} \gamma_{pp't}^s S f_{pp't}^s + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{t \in T} \lambda_{pp'} \left(\sum_{r \in R^y} c^{ry} y_{pp't}^r + \sum_{r \in R^z} c^{rz} z_{pp't}^r \right) \\ & + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R^x} \sigma^r (c^{rx} x_{pt}^r) + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R^y} \sigma^r (c^{ry} y_{pp't}^r) + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R^z} \sigma^r (c^{rz} z_{pp't}^r) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{r \in R^x} c^{rx} x_{pt}^r + \sum_{r \in R^y} c^{ry} \left(\sum_{p' \in P} y_{pp't}^r \right) - IR_{p(t-1)} + IR_{pt} = a_{pt}, \quad \forall p \in P, \forall t \in T. \quad (2)$$

$$\sum_{r \in R^z} c^{rz} \left(\sum_{p' \in P} z_{pp't}^r \right) + \sum_{r \in R^y} c^{ry} \left(\sum_{p' \in P} y_{pp't}^r \right) - IP_{np(t-1)} + IP_{npt} = d_{npt}, \quad \forall n \in N, \forall p \in P, \forall t \in T. \quad (3)$$

$$e_{p(t+1)}^s = e_{pt}^s + \sum_{r \in R_s^x} c^{rx} x_{pt}^r - \sum_{r \in R_s^z} c^{rz} \left(\sum_{p' \in P} z_{p't}^r \right), \quad \forall s \in S, \forall p \in P, \forall t \in T. \quad (4)$$

$$e_{pt}^s \leq l_{pt}^s, \quad \forall s \in S, \forall p \in P, \forall t \in T. \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P} \left(\sum_{r \in R_m^x} c^{rx} x_{pt}^r + \sum_{r \in R_m^z} c^{rz} \left(\sum_{p' \in P} z_{pp't}^r \right) + \sum_{r \in R_m^y} c^{ry} \left(\sum_{p' \in P} y_{pp't}^r \right) \right) \leq j_t^m b^m, \quad \forall m \in M, \forall t \in T. \quad (6)$$

$$\sum_{p \in (P \cup 0)} f_{pt}^s = 1, \quad \forall s \in S, \forall t \in T. \quad (7)$$

$$S f_{pp't}^s \geq f_{p,(t-1)}^s + f_{p't}^s - 1, \quad \forall s \in S, \forall t \in T, \forall p \in P, \forall p' \in (P \cup 0), p \neq p'. \quad (8)$$



$$l_{pt}^s f_{pt}^s - e_{pt}^s \geq 0, \quad \forall s \in S, \forall p \in P, \forall t \in T. \quad (9)$$

$$l_{pt}^s f_{pt}^s - \sum_{r \in R_s^x} c^{rx} x_{pt}^r \geq 0, \quad \forall s \in S, \forall p \in P, \forall t \in T \quad (10)$$

$$x_{pt}^r \leq H_t u_{pp't}^r, \quad \forall p, p' \in P, p = p', \forall t \in T, \forall r \in R^x \quad (11)$$

$$y_{pp't}^r \leq H_t u_{pp't}^r, \quad \forall p, p' \in P, \forall t \in T, \forall r \in R^y \quad (12)$$

$$z_{pp't}^r \leq H_t u_{pp't}^r, \quad \forall p, p' \in P, \forall t \in T, \forall r \in R^z \quad (13)$$

$$H_t(1 - u_{pp't}^r) + H_t(1 - u_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'}) + H_t(1 - \theta_{pp'\hat{p}\hat{p}'t}^{rr'}) + t_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} \geq t_{pp't}^r + x_{pt}^r \quad (14)$$

$$H_t(1 - u_{pp't}^r) + H_t(1 - u_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'}) + H_t(\theta_{pp'\hat{p}\hat{p}'t}^{rr'}) + t_{pp't}^r \geq t_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} + x_{\hat{p}t}^{r'} \quad (15)$$

$$\forall (r, r') \in E, (r, r') \in R^x, \forall p = p' \in P, \forall \hat{p} = \hat{p}' \in P, \forall t \in T$$

$$H_t(1 - u_{pp't}^r) + H_t(1 - u_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'}) + H_t(1 - \theta_{pp'\hat{p}\hat{p}'t}^{rr'}) + t_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} \geq t_{pp't}^r + x_{pt}^r \quad (16)$$

$$H_t(1 - u_{pp't}^r) + H_t(1 - u_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'}) + H_t(\theta_{pp'\hat{p}\hat{p}'t}^{rr'}) + t_{pp't}^r \geq t_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} + y_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} \quad (17)$$

$$\forall (r, r') \in E, r \in R^x, r' \in R^y, \forall p = p' \in P, \forall \hat{p}, \hat{p}' \in P, \forall t \in T$$

$$H_t(1 - u_{pp't}^r) + H_t(1 - u_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'}) + H_t(1 - \theta_{pp'\hat{p}\hat{p}'t}^{rr'}) + t_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} \geq t_{pp't}^r + x_{pt}^r \quad (18)$$

$$H_t(1 - u_{pp't}^r) + H_t(1 - u_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'}) + H_t(\theta_{pp'\hat{p}\hat{p}'t}^{rr'}) + t_{pp't}^r \geq t_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} + z_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} \quad (19)$$

$$\forall (r, r') \in E, r \in R^x, r' \in R^z, \forall p = p' \in P, \forall \hat{p}, \hat{p}' \in P, \forall t \in T$$

$$H_t(1 - u_{pp't}^r) + H_t(1 - u_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'}) + H_t(1 - \theta_{pp'\hat{p}\hat{p}'t}^{rr'}) + t_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} \geq t_{pp't}^r + y_{pp't}^r \quad (20)$$

$$H_t(1 - u_{pp't}^r) + H_t(1 - u_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'}) + H_t(\theta_{pp'\hat{p}\hat{p}'t}^{rr'}) + t_{pp't}^r \geq t_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} + y_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} \quad (21)$$

$$\forall (r, r') \in E, (r, r') \in R^y, \forall p, p', \hat{p}, \hat{p}' \in P, \forall t \in T$$

$$H_t(1 - u_{pp't}^r) + H_t(1 - u_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'}) + H_t(1 - \theta_{pp'\hat{p}\hat{p}'t}^{rr'}) + t_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} \geq t_{pp't}^r + z_{pp't}^r \quad (22)$$

$$H_t(1 - u_{pp't}^r) + H_t(1 - u_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'}) + H_t(\theta_{pp'\hat{p}\hat{p}'t}^{rr'}) + t_{pp't}^r \geq t_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} + z_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} \quad (23)$$

$$\forall (r, r') \in E, (r, r') \in R^z, \forall p, p', \hat{p}, \hat{p}' \in P, \forall t \in T$$

$$H_t(1 - u_{pp't}^r) + H_t(1 - u_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'}) + H_t(1 - \theta_{pp'\hat{p}\hat{p}'t}^{rr'}) + t_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} \geq t_{pp't}^r + z_{pp't}^r \quad (24)$$

$$H_t(1 - u_{pp't}^r) + H_t(1 - u_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'}) + H_t(\theta_{pp'\hat{p}\hat{p}'t}^{rr'}) + t_{pp't}^r \geq t_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} + y_{\hat{p}\hat{p}'t}^{r'} \quad (25)$$

$$\forall (r, r') \in E, r \in R^z, r' \in R^y, \forall p, p', \hat{p}, \hat{p}' \in P, \forall t \in T$$

$$t_{pp't}^r + x_{pt}^r \leq \sum_{i=1}^t H_i \quad (26)$$

$$t_{pp't}^r \geq \sum_{i=1}^{t-1} H_i \quad (27)$$

$$\forall r \in R^x, \forall p = p' \in P, \forall t \in T$$



$$t_{pp't}^r + y_{pp't}^r \leq \sum_{i=1}^t H_i \quad (28)$$

$$t_{pp't}^r \geq \sum_{i=1}^{t-1} H_i \quad (29)$$

$$\forall r \in R^y, \forall p, p' \in P, \forall t \in T$$

$$t_{pp't}^r + z_{pp't}^r \leq \sum_{i=1}^t H_i \quad (30)$$

$$t_{pp't}^r \geq \sum_{i=1}^{t-1} H_i \quad (31)$$

$$\forall r \in R^z, \forall p, p' \in P, \forall t \in T$$

As restrições (2) representam o atendimento da oferta e as restrições 3 o atendimento da demanda. As restrições (4) garantem a atualização do estoque em uma subarea, e as restrições (5) definem a capacidade de armazenamento. As restrições (6) garantem que nenhum equipamento terá sua capacidade excedida. As restrições (7) controlam a alocação de produtos em uma subarea. As restrições (8, 9 e 10) controlam a substituição de produtos. Se $Sf_{pp't}^s = 1$, o produto p será substituído pelo produto p' no período t . As restrições (11, 12 e 13) garantem a disponibilidade da rota.

As equações (14) e (15) definem as restrições disjuntivas para cada par de tarefa que apresenta conflito de rotas $(r, r' \in E)$ e $(r, r') \in R^x$. Se $\theta_{pp'\hat{p}\hat{p}t}^{rr'} = 1$, (15) é redundante, e (14) garante que o produto p ou (p') precede \hat{p} ou (\hat{p}') e que o tempo de início de \hat{p} é maior que o tempo de início de p ; se $\theta_{pp'\hat{p}\hat{p}t}^{rr'} = 0$, \hat{p} precede p . O mesmo é válido para todos os outros pares de rotas conflitantes $(r, r' \in E)$ tal que $r \in R^x$ e $r' \in R^y$ restrições (16,17); $r \in R^x$ e $r' \in R^z$ restrições (18,19); $r, r' \in R^y$ restrições (20,21); $r, r' \in R^z$ restrições (22,23), e $r \in R^z$ e $r' \in R^y$ restrições (24,25). As restrições (26,27), (28,29) e (30,31) estabelecem que uma tarefa não pode ser executada antes ou após o período em que foi estabelecida no plano de produção.

1.1.1. Formulação alternativa para o Sequenciamento

Outras formulações alternativas para o problema de sequenciamento podem ser investigadas. A formulação proposta nesta seção consiste em dividir o período t em microperíodos (μ_{it}) . Onde $i \in I^t$ e I^t representa o total de microperíodos disponíveis para o período t . A duração de cada microperíodo é calculada da seguinte forma: $\mu_{it} = H_t/I^t$. Onde o parâmetro H_t estabelece a duração máxima de cada período t . Cada microperíodo irá conter apenas as tarefas que podem ser executadas simultaneamente, ou seja, que não possuem conflito em seus equipamentos. A garantia desta condição é obtida através das restrições 35. Para esta nova formulação, as restrições 11 até 31 do PPSFP são substituídas por:

$$x_{pt}^r \leq \sum_{i \in I^t} q_{pit}^r \mu_{it}, \forall p \in P, \forall t \in T, \forall r \in R^x \quad (32)$$

$$y_{pp't}^r \leq \sum_{i \in I^t} q_{p'it}^r \mu_{it}, \forall p, p' \in P, \forall t \in T, \forall r \in R^y \quad (33)$$

$$z_{pp't}^r \leq \sum_{i \in I^t} q_{p'it}^r \mu_{it}, \forall p, p' \in P, \forall t \in T, \forall r \in R^z \quad (34)$$

$$0 \leq q_{pit}^r + q_{p'it}^{r'} \leq 1, \forall i \in I^t, \forall p, p' \in P, \forall (r, r' \in E), \forall t \in T. \quad (35)$$

$$q_{pit}^r \in \{0, 1\}, \forall i \in I^t, \forall p \in P, \forall r \in R, \forall t \in T. \quad (36)$$

Para permitir o transporte dos produtos (variáveis x_{pt}^r , $y_{pp't}^r$ e $z_{pp't}^r$) é necessário, agora, alocar um número de microperíodos para cada uma destas tarefas (restrições 32, 33 e 34). Por



último, as variáveis binárias q_{pit}^r definem se uma determinada rota pode ser ativa em um microperíodo i dentro do período t . Seu valor é 1 se pode ser ativa e 0 caso contrário. As restrições 35 são responsáveis por ativar apenas as rotas que não apresentam conflito entre os equipamentos.

2. Revisão da literatura

Ao comparar o volume de pesquisa em terminais de carga a granel com o de contêiner e com os problemas estudados na otimização da extração em minas, como em Newman et al. [2010], o volume relativo aos problemas associados à otimização em terminais de carga a granel são raros. Poucos artigos foram encontrados na literatura sobre o tema. Bilgen e Ozkarahan [2007], apresentaram trabalhos relacionados ao problema de blendagem e alocação de navios para o transporte de grãos. A pesquisa envolve o desenvolvimento de um modelo de programação linear inteira mista com restrições para a mistura, carregamento, transporte e estoque de produto. Em Masatoshi et al. [2007], a matéria-prima utilizada na indústria siderúrgica deve ser armazenada em pátios para atender a linha de produção. Os produtos são transportados através de várias correias até a linha. O objetivo é otimizar a alocação dos produtos e resolver os problemas de roteamento associados ao uso das correias. Conradie et al. [2008] trata da otimização do fluxo de produtos (no caso, carvão) entre as minas e a linha de produção. O trabalho é baseado em um modelo de programação matemática multiobjetivo, com soluções baseadas na metaheurística *Simulated Annealing*. Kim et al. [2009] aborda o problema de alocação de produtos no pátio. Este problema é resolvido utilizando um modelo de programação inteira mista. Boland et al. [2012] abrange o problema de gerenciamento das pilhas de carvão em um terminal portuário na Austrália. Barros et al. [2011] desenvolveram um modelo de programação linear inteira para o problema de alocação de berços de atracação associado às condições de estoque do pátio. As soluções foram baseadas em pacotes de otimização e *Simulated Annealing*. Singh et al. [2012] apresenta um modelo de programação inteira mista para o problema de planejamento da expansão de capacidade da cadeia de produção de carvão na Austrália.

Outra linha de pesquisa são os problemas envolvidos com a otimização de uma frota de navios. Nestes casos, o objetivo é definir as melhores rotas para os navios entre os diversos terminais portuários, para o atendimento da demanda. Em [Bilgen, 2007], os autores consideram o planejamento do transporte entre diversos destinos, abrangendo a blendagem de produtos em cada terminal. Seguem esta mesma linha de pesquisa os trabalhos de [Li et al., 2010], [Cóccola e Méndez, 2015], e [Wang e Meng, 2015].

3. Heurística para resolver o PPSFP

Resolver o PPSFP de maneira integrada e exata em pacotes de otimização é uma tarefa extremamente difícil para problemas realistas e de dimensões mais elevadas. Nesta abordagem, o planejamento da produção e o sequenciamento são resolvidos por período. Na fase de planejamento, uma versão relaxada do PPSFP é resolvida em um pacote de otimização. Nesta versão relaxada, as restrições de sequenciamento não são utilizadas (restrições 14 até 31). As variáveis de produção ou tarefas (x_{pt}^r , $y_{pp't}^r$ e $z_{pp't}^r$) são enviadas para a fase de sequenciamento, que estabelece o tempo de início e fim de cada tarefa, respeitando os compartilhamentos de equipamentos entre as rotas. Se o sequenciamento não consegue produzir uma solução viável (que respeite a capacidade dos períodos), as tarefas que não puderam ser sequenciadas no período t são encaminhadas para o período $t + 1$. A Figura 5 ilustra esta estratégia de solução

A Figura 6 ilustra o caso onde apenas uma parte da tarefa violou a duração do período t . Neste caso, apenas a parte da tarefa que violou a duração de t é que será transferida para o próximo período.

3.1. Fase de Planejamento

Nesta fase, os problemas de planejamento e alocação de produtos são resolvidos. Enquanto simplesmente o problema de selecionar as rotas e definir qual produto e quantidade serão transportados é facilmente resolvido por um pacote de otimização, o problema de alocação de produtos envolve diversas variáveis inteiras, tornando mais difícil a sua solução. Uma alternativa para

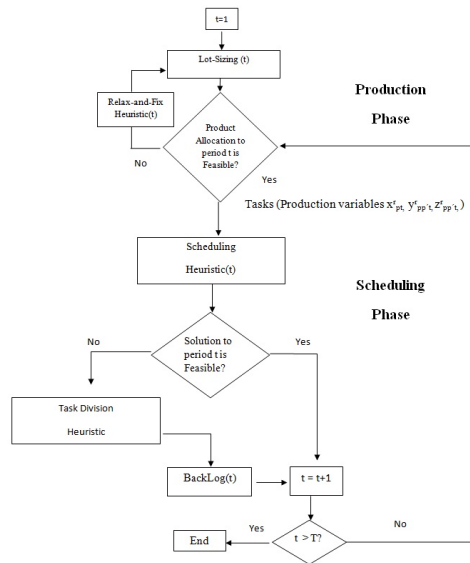


Figura 5: Abordagem Hierárquica

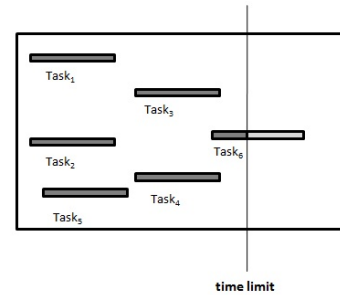


Figura 6: Transferência de tarefas entre períodos

produzir uma solução viável para a fase de planejamento, consiste em combinar o uso de um pacote de otimização com uma heurística semelhante a um procedimento *relax-and-fix*.

A heurística proposta funciona fixando variáveis de decisão em uma sequência até ser encontrada uma solução viável (inteira). No caso do PPSFP, a variável de decisão utilizada é a variável de alocação de produtos em uma subárea (variável f_{pt}^s). O algoritmo consiste em selecionar, em cada passo, a variável fracionária cujo valor está mais próximo de 1, fixá-la em 1 e resolver o PPSFP relaxado. Quando não houver mais variáveis de alocação de produtos fracionárias, uma solução inteira para o problema de planejamento e alocação de produtos foi encontrada e o passo seguinte consiste em sequenciar as tarefas produzidas (Fase de sequenciamento).

3.2. Fase de Sequenciamento

As variáveis de produção do PPSFP ($x_{pt}^r, y_{pp;t}^r$ e $z_{pp;t}^r$) definem o tipo de produto, a quantidade e por qual rota os produtos serão transportados. Enquanto na fase de planejamento são definidos os valores para estas variáveis, o problema de sequenciamento consiste em estabelecer tempos de início e fim para cada uma destas tarefas, levando em consideração restrições de incompatibilidade. As restrições de incompatibilidade estabelecem que, para alguns pares de tarefas i e j , seus períodos de processamento não podem se sobrepor. A preempção não é permitida e o objetivo é minimizar o makespan. Este problema de sequenciamento será chamado, a partir de agora, de: Problema de Sequenciamento com Restrições de Incompatibilidade (PSRI).

O PSRI não é um problema novo. Na literatura existem diversas variações deste problema, tais como: *Scheduling with incompatible jobs*: Bodlaender et al. [1994], *scheduling jobs with agreement graph*: Bendraouche e Boudhar [2012], *multi-coloring and job-scheduling*: Blöchliger e Zufferey [2013], entre outros.

3.2.1. Heurística para o PSRI

Com o intuito de encontrar boas soluções e de maneira eficiente, foi implementada a meta-heurística GRASP. O GRASP é um algoritmo iterativo proposto por Feo e Resende [1989], e consiste basicamente em duas fases: Construção Gulosa e Busca Local. A metaheurística GRASP foi adotada por sua simplicidade e habilidade em produzir bons resultados, tais como os obtidos em: Binato et al. [2000], Rocha et al. [2008] e Rajkumar et al. [2011].

A cada iteração do procedimento de construção guloso, considere a lista de elementos candidatos como sendo as tarefas extraídas do planejamento e que não foram sequenciadas (ou seja, ainda não possuem tempos de início e fim definidos). O objetivo é estabelecer estes tempos



para todas as tarefas, respeitando os conflitos (incompatibilidades) e minimizando o makespan. Ao se estabelecer estes tempos para todas as tarefas, o PSRI foi resolvido e, desta forma, todas as tarefas foram sequenciadas.

Uma solução gulosa para o PSRI é construída da seguinte forma: selecione aleatoriamente uma tarefa j da lista de elementos candidatos. Em seguida, defina o menor tempo de início para esta tarefa, de forma que as demais tarefas i que apresentem conflito com j não tenham seus tempos de início e fim sobrepostos. Quando todas as tarefas são sequenciadas, uma solução sem conflito é gerada. A busca local inicia-se fazendo troca na ordem das tarefas já sequenciadas na fase de construção gulosa. Detalhes sobre a implementação deste algoritmo para o PSRI podem ser encontrados em Menezes et al. [2015].

4. Experimentos computacionais

Para validar o modelo de otimização proposto para o PPSFP e os algoritmos, foi desenvolvido um gerador de instâncias. Com este gerador, é possível simular diversas características do terminal portuário, tais como: número de berços de atracação, quantidade e configuração das rotas, horizonte de planejamento, capacidades, oferta, demanda, entre outros. A Tabela 3 destaca os parâmetros relativos à capacidade de estocagem, número de berços de atracação e equipamentos utilizados para criar as instâncias. Os experimentos computacionais foram realizados utilizando a formulação original (Seção 1.1).

Tabela 3: Dados utilizados para gerar as instâncias

Parâmetro	Descrição
Pátio	Com capacidade de estocagem de 4.000.000 de toneladas. O pátio foi dividido em 40 subáreas com capacidade para 100.000 toneladas de minério cada.
Berços de atracação	Dois berços. Sendo que no berço 1 podem ser carregados dois navios simultaneamente.
Equipamentos	Cinco viradores de vagão, quatro recuperadoras de minério, três recuperadoras/empilhadeiras (equipamento que realiza as duas funções) e oito empilhadeiras. No terminal em estudo existe aproximadamente 50km de correias transportadoras. Cada rota utiliza um ou vários segmentos de correia. Portanto, no total, incluindo as correias e demais máquinas, foi considerado que o terminal portuário manipula 50 equipamentos.
α_{pt}	2 (duas unidades monetárias)
β_{npt}	10 (dez unidades monetárias para o berço 1), 50 (cinquenta unidades monetárias para o berço número 2).
$\gamma_{pp't}^s$	10 (dez unidades monetárias)
$\lambda_{pp'}$	Baseado no seguinte cálculo: 0.01 (unidade monetária) $\cdot p - p' $, onde $ p - p' $ representa o desvio de qualidade entre os produtos p e p' .
σ^r	0.01 (unidade monetária) \cdot comprimento da rota r .

Os valores dos parâmetros foram obtidos por meio de entrevistas realizadas com os operadores de um terminal portuário brasileiro.

4.1. Instâncias

As instâncias foram criadas considerando as seguintes características: sem estoque inicial e com estoque inicial em 30%, quantidade e tipo de produto ofertado igual ao demandado e instâncias onde os produtos ofertados e demandados são diferentes. A primeira, segunda e terceira colunas das tabelas, apresentam o número da instância, tipo e nome. Como exemplo, a instância $8P5Prod$ corresponde a um horizonte de planejamento de 8 períodos e 5 produtos são manipulados. A coluna Z_{LB} fornece o limite inferior para o PPSFP (relaxação linear). As Colunas Z_{UB} e Z_{BB} exibem os melhores limites superior e inferior obtidos pelo solver CPLEX. Com relação a heurística, a coluna Z_{UB_1} fornece o limite superior. Finalmente, t_{LB} , t_{UB} and t_{UB_1} exibem o tempo computacional transcorrido para obter os valores de Z_{LB} , Z_{UB} , Z_{UB_1} respectivamente, em segundos.



Tabela 4: 110 rotas - capacidade dos equipamentos entre 8,000 e 12.000 t/h - oferta igual a demanda

Número	Tipo	Instância	CPLEX					Heurística	
			Z_{LB}	t_{LB}	Z_{UB}	t_{UB}	Z_{BB}	Z_{UB_1}	T_{UB_1}
1		4P5Prod	138.16	5	142.14	205	142.13	143.6	12
2		4P10Prod	140.4	34	143.25	785	143.25	143.6	13
3	Estoque vazio	8P5Prod	276.32	10	281.62	683	281.62	287.2	36
4	Produtos	8P10Prod	279.7	1065	-	-	-	287.2	42
5	iguais	10P5Prod	345.4	12	351.96	1159	351.931	359	58
6		10P10Prod	348.67	2089	-	-	-	359	63
7		4P5Prod	838.16	5	842.14	168	842.14	843.6	12
8		4P10Prod	2688.16	5674	-	-	-	2693.6	17
9	Estoque vazio	8P5Prod	1476.32	13	1481.67	1202	1481.56	1487.2	38
10	Produtos	8P10Prod	6226.32	9871	-	-	-	6237.2	60
11	Diferentes	10P5Prod	1945.4	33	1952.96	1977	1952.78	1959	60
12		10P10Prod	7345.4	2381	-	-	-	7359	83
13		4P5Prod	197.35	5.00	200.74	289.00	200.74	237.99	22
14		4P10Prod	204.22	1236.00	206.64	11.003.00	206.64	237.48	25
15	Estoque em 30%	8P5Prod	-	-	-	-	-	286.76	43
16	Produtos	8P10Prod	-	-	-	-	-	300.30	63
17	Diferentes	10P5Prod	-	-	-	-	-	376.2	61
18		10P10Prod	-	-	-	-	-	370.4	65

Os resultados da Tabela 4 indicam que resolver o PPSFP em pacotes de otimização é computacionalmente inviável. Com o uso da heurística, foi possível obter soluções para todas as instâncias, toda a oferta e demanda foram atendidas e todas as tarefas foram sequenciadas respeitando a duração de cada período.

Tabela 5: 110 rotas - capacidade entre 8.000 e 12.000 t/h - oferta maior que a demanda

Número	Tipo	Instância	CPLEX					Heurística	
			Z_{LB}	t_{LB}	Z_{UB}	t_{UB}	Z_{BB}	Z_{UB_1}	T_{UB_1}
19		4P5Prod	148.3	4	-	-	-	163.39	51
20		4P10Prod	150.4	34	-	-	-	154.53	36
21	Estoque vazio	8P5Prod	297.50	9	-	-	-	316.75	116
22	Produto	8P10Prod	305.46	879	-	-	-	323.45	91
23	igual	10P5Prod	372.82	12	-	-	-	391.65	170
24		10P10Prod	380.9	1683	-	-	-	419.44	118
25		4P5Prod	651.66	5	-	-	-	675.40	78
26		4P10Prod	1876.34	854	-	-	-	2063.2	57
27	Estoque vazio	8P5Prod	710.14	10	-	-	-	773.48	168
28	Produtos	8P10Prod	2541.04	9422	-	-	-	2635.61	163
29	Diferentes	10P5Prod	860.48	12	-	-	-	882.46	200
30		10P10Prod	-	-	-	-	-	3121.53	208
31		4P5Prod	-	-	-	-	-	151.47	49
32		4P10Prod	-	-	-	-	-	152.68	39
33	Estoque em 30%	8P5Prod	-	-	-	-	-	335.83	91
34	Produtos	8P10Prod	-	-	-	-	-	310.55	89
35	Diferentes	10P5Prod	-	-	-	-	-	398.93	134
36		10P10Prod	-	-	-	-	-	388.99	133

Nos experimentos da Tabela 5, foi necessário manipular mais produtos e rotas (pois o excesso de produtos na oferta precisou ser estocado). Nestes casos, o solver não foi capaz de encontrar solução para nenhum caso. Da mesma forma que nos resultados da Tabela 4, com a heurística, foi possível obter resultados para todas as instâncias, mas com um tempo maior (devido a quantidade maior de produtos sendo manipulados).

5. Conclusão

Neste trabalho foi investigado um problema de otimização relacionado ao planejamento e sequenciamento de produtos em terminais portuários de grãos sólidos. Foi apresentado um mod-



elo matemático e uma heurística hierárquica para resolver o problema. Os experimentos computacionais demonstraram a viabilidade do modelo para representar e resolver o PPSFP, bem como da heurística, que foi capaz de resolver instâncias de médio e grande porte e baseadas em casos reais. Como trabalhos futuros, podem ser considerados o uso de incerteza para tratar falhas nos equipamentos e rotas, bem como o desenvolvimento de algoritmos exatos. Além disso, a realização de experimentos para comparar a formulação original com a alternativa (baseada em micropériosodos).

Agradecimentos

Esta pesquisa foi patrocinada pelas seguintes instituições: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- ANTAQ (2013). Boletim anual de movimentação de cargas. Technical report, Agência Nacional de Transportes Aquaviários, <http://www.antaq.gov.br>.
- 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*, 60(4):606 – 613.
- Bendraouche, M. e Boudhar, M. (2012). Scheduling jobs on identical machines with agreement graph. *Computers & Operations Research*, 39(2):382 – 390. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054811001213>.
- Bilgen, B. e Ozkarahan, I. (2007). A mixed-integer linear programming model for bulk grain blending and shipping. *International Journal of Production Economics*, 107(2):555 – 571.
- Bilgen, B. (2007). Modeling of a blending and marine transportation planning problem with fuzzy mixed-integer programming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(9):1041–1050.
- Binato, S., Hery, W., Loewenstern, D. M., e Resende, M. G. C. (2000). A grasp for job shop scheduling. In *Essays and Surveys on Metaheuristics*, p. 59–79. Kluwer Academic Publishers.
- Blöchliger, I. e Zufferey, N. (2013). Multi-coloring and job-scheduling with assignment and incompatibility costs. *Annals of Operations Research*, 211(1):83–101.
- Bodlaender, H. L., Jansen, K., e Woeginger, G. J. (1994). Scheduling with incompatible jobs. *Discrete Applied Mathematics*, 55(3):219 – 232.
- Boland, N., Gulezyski, D., e Savelsbergh, M. (2012). A stockyard planning problem. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 1(3):197–236.
- Cóccola, M. E. e Méndez, C. A. (2015). An iterative milp-based approach for the maritime logistics and transportation of multi-parcel chemical tankers. *Computers & Industrial Engineering*, 89:88 – 107.
- Conradie, D., Morison, L. E., e Joubert, J. W. (2008). Scheduling at coal handling facilities using simulated annealing. *Mathematical Methods of Operations Research*, 68(2):277–293.
- Feo, T. A. e Resende, M. G. (1989). A probabilistic heuristic for a computationally difficult set covering problem. *Operations Research Letters*, 8(2):67 – 71.
- Kim, B., Koo, B., e Park, B. S. (2009). A raw material storage yard allocation problem for a large-scale steelworks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(9-10): 880–884.



- Li, J., Karimi, I., e Srinivasan, R. (2010). Efficient bulk maritime logistics for the supply and delivery of multiple chemicals. *Computers & Chemical Engineering*, 34(12):2118 – 2128.
- Masatoshi, A., Tatsushi, N., e Masami, K. (2007). Simultaneous optimization of storage allocation and routing problems for belt-conveyor transportation. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 1(2):250–261.
- Menezes, G. C., Mateus, G. R., e Ravetti, M. G. (2015). Scheduling with incompatible jobs: model and algorithms. In *proceedings of the 7th Multidisciplinary International Conference on Scheduling : Theory and Applications (MISTA), 25-28 Aug, Prague, Czech Republic*, p. 776–781.
- Menezes, G. C., Mateus, G. R., e Ravetti, M. G. (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. ISSN 0377-2217.
- Newman, A. M., Rubio, R., Caro, R., Weintraub, A., e Eurek, K. (2010). A review of operations research in mine planning. *Interfaces*, 40(3):222–245.
- Rajkumar, M., Asokan, P., Anilkumar, N., e Page, T. (2011). A grasp algorithm for flexible job-shop scheduling problem with limited resource constraints. *International Journal of Production Research*, 49(8):2409–2423.
- Rocha, P. L., Ravetti, M. G., Mateus, G. R., e Pardalos, P. M. (2008). Exact algorithms for a scheduling problem with unrelated parallel machines and sequence and machine-dependent setup times. *Computers & Operations Research*, 35(4):1250 – 1264.
- Singh, G., Sier, D., Ernst, A. T., Gavrilouk, O., Oyston, R., Giles, T., e Welgama, P. (2012). A mixed integer programming model for long term capacity expansion planning: A case study from the hunter valley coal chain. *European Journal of Operational Research*, 220(1):210 – 224.
- Wang, S. e Meng, Q. (2015). Robust bunker management for liner shipping networks. *European Journal of Operational Research*, 243(3):789 – 797.