

Modelo matemático para otimização na alocação pilhas em um pátio de estocagem de portos e carregamento de navios

Marcos Wagner Jesus Servare Junior (Universidade Federal do Espírito Santo) marcoswjunior@gmail.com

Álvaro Daniel Oliveira Lopes (Universidade Federal do Espírito Santo) oliveira.alvaro4@gmail.com

José Leandro Felix Salles (Universidade Federal do Espírito Santo) jleandro@ele.ufes.br

Helder Roberto de Oliveira Rocha (Universidade Federal do Espírito Santo) holder.rocha@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 primordial é realizar o carregamento dos navios de acordo com a sua capacidade, quantidade vendida e especificação do produto e, ainda, da maneira mais rápida possível. Para granéis sólidos, nos pátios de estocagem ocorrem a alocação das pilhas de produtos ao longo de sua extensão, juntamente ao sistema de recebimento e movimentação, além de misturas e recuperação de pilhas para abastecimento de navios. Na otimização deste sistema é observado um trade-off entre possíveis objetivos desse problema como, por exemplo, maximizar a precisão da programação, a taxa de transferência entre os estágios e minimizar o custo. Esses fatores apontam uma variedade de fluxos, aumentando a complexidade do sistema. Sendo assim, este artigo tem como objetivo apresentar um novo modelo matemático considerando instalações e equipamentos utilizados nessa movimentação e analisar a eficiência desde em um conjunto de cenários.

Palavras chave: Problema de Alocação de Pilhas, Modelagem Matemática, Programação de Pátios.

Mathematical modelling for optimization in the stockyard allocation for storage of ports and loading of ships

Abstract

Stockyards of port areas are important in the supply chain management, due to an aggregation of logistics costs. Its primary objective is to carry out the placement of ships according to the capacity, quantity and quality of the product fastest as possible. In the solid bulk stockyards, the stacks of products are moved along their length, first in the receiving system then moving system, the mix of products and also sending to the ship. The optimization of this system we find a trade-off between programming objectives such as maximizing scheduling of dates, throughput between stages and the minimum price. These aspects point to a variety of flows, increasing the complexity of the system. Therefore, this paper aims present a new mathematical model for this problem and evaluates the solutions of a set of instances.

Key-words: Stockyard Allocation Problem, Mathematical Modeling, Stockyards Programming.

1. Introdução

Os pátios de estocagem são elos importantes da cadeia logística a que pertencem, influenciando de forma significativa no seu desempenho. Especificamente no caso 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 de maneira direta no desempenho dos processos portuários e, de acordo com a gravidade da situação, pode até interromper o processo de fornecimento por um período. Um navio que venha a ter sua partida

atrasada pela ineficiência no processo pode incidir uma multa contratual oriunda do proprietário da embarcação.

Em oposição, se a alocação for feita de forma eficiente irá proporcionar maiores capacidades, menores custos e melhor resultado global desta cadeia de abastecimento. No entanto, devido a complexidade do sistema de produção e a flexibilidade exigida, é muito difícil garantir uma produção lucrativa sem qualquer suporte à otimização.

Uma boa solução de otimização pode resultar em economias significativas por meio de melhor utilização da capacidade. Além dos benefícios econômicos, a otimização também pode contribuir para reduzir os impactos ambientais, os gastos com energia, violações de várias regulamentações e auxiliar na maneira mais eficiente de lidar com as incertezas, tanto na produção quanto nos pedidos dos clientes.

Uma série de artigos de revisão sobre planejamento a curto prazo foram apresentados recentemente na literatura científicas, por exemplo, Floudas e Lin (2004), Méndez et al. (2006), Li e Ierapetritou (2008a, 2008b), Ribas et al. (2010), Phanden et al. (2011), e Maravelias (2012). Devido à ampla gama de problemas de programação de produção, várias abordagens foram desenvolvidas. Algumas incluem programação manual suportada por computador (por exemplo, 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).

O planejamento de pilhas no pátio deve otimizar o processo de empilhamento e recuperação, de tal forma 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 e refazendo assim o planejamento. Existem poucos problemas discutidos na literatura semelhantes ao problema de planejamento de um pátio estudado neste artigo.

No estudo feito pelos autores Abdekhodaee et al.(2004), considera-se uma cadeia de carvão na Austrália, focando mais na programação dos trens do que no planejamento do pátio em si. Esses autores decomporam os dois problemas em vários módulos resolvendo cada um deles através de uma heurística gulosa. Atualmente, a geração de colunas (CG) é um dos métodos mais frequentemente aplicados para resolver problemas de larga escala com um grande número de variáveis, e este método foi aplicado no trabalho de Menezes et al. (2017)

Em Boland et al. (2012), desenvolveram um algoritmo de planejamento de pátios de carvão com intuito de aumentar o fluxo de matérias primas e diminuir o tempo médio dos navios no berço. O algoritmo proposto por estes autores combina uma técnica construção gulosa, que depois foi melhorada utilizando uma otimização com programação inteira.

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.

Assim, o presente artigo tem por objetivo apresentar um modelo matemático para um sistema de armazenamento de minério, sua movimentação dentro do sistema e abastecimento dos navios, que busca maximizar a quantidade de carga que será enviada aos clientes ou maximizar a quantidade de navios que tenha sua demanda atendida em um horizonte de planejamento, se aproximando assim da realidade observada nas empresas.

A Seção 2 apresenta uma revisão bibliográfica de trabalhos relativos ao tema deste artigo. A Seção 3 apresenta o modelo matemático proposto destacando as possibilidades de função objetivo, fluxos e relações entre os participantes. Na Seção 4 são apresentados alguns experimentos computacionais com o CPLEX 12.5 (IBM, 2012) para mostrar a aplicabilidade do modelo matemático, e por último, na Seção 5 são apresentadas as conclusões finais.

2. Problema de Alocação e Programação de Pilhas

De acordo com Menezes et al (2017), os planejamentos de médio e curto prazos são decisões que a Pesquisa Operacional estuda como problema de Planejamento e Sequenciamento, considerando as quantidades a serem produzidas, preços e contratação, além da forma de alcançar as metas definidas pelos níveis superiores.

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.

Pimentel (2011) aborda otimização da cadeia logística do minério como um todo, sendo que as análises efetuadas na gestão de pátios das minas são feitas de maneira simplificada, sem considerar os aspectos de rotas e manutenções de equipamentos. A solução adotada por Almeida e Pimentel (2010) utilizou um modelo de programação inteira mista para resolver o problema de programação de curto prazo de produção, processamento e expedição de minério. Em conjunto com o modelo utilizado, foi adotada a abordagem de Programação por Metas (Ignizio, 1978) para lidar com o aspecto de conflito de objetivos de cada etapa ou parte do processo (Pimentel, 2011).

Nóbrega (1996) também trata o problema do ponto de vista da cadeia, sendo que na etapa de pátios de estocagem aborda somente que existem pilhas que são formadas e recuperadas sem haver preocupação de localização ou dimensões e geometria das mesmas. Neste caso, utiliza métodos clássicos de programação inteira e programação linear. Bittencourt e Matede (2009) fazem 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. Neste caso é usado algoritmo de evolução diferencial para solução do problema.

Em 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. Mais recentemente, a integração entre o planejamento e sequenciamento tem sido um campo investigado por diversos autores, tais como Ago et al (2007), Mateus et al (2010), Kis e Kovacs (2012), Meyer e Mann (2013) e Menezes et al (2017), por exemplo. Nos trabalhos destes autores tratam do processo integrado e planejamento e sequenciamento considerando fatores que podem contemplar até a definição de rotas nas correias transportadoras e diversas técnicas de solução.

Em linhas gerais, pelas suas características, este problema deverá exigir utilização conjunta de uma ou mais técnicas de otimização, podendo incluir heurística ou meta heurística. A solução final deverá avaliar, também, aspectos de aleatoriedade, risco e tomada de decisão que são

inerentes a este processo.

3. Modelo Matemático

O caso simulado partirá da quantidade de equipamentos que uma empresa do setor de mineração possui, para que seja trabalhado em relação a este caso real. A início do sistema de pátios ocorre em quatro terminais de descarga onde os minérios oriundos das minas entram no sistema através de linhas férreas. A partir da chegada de um lote de minério nos terminais de descarga, estes são transportados para as empilhadeiras através de esteiras transportadoras e em seguida são empilhadas no pátio de estocagem pelas empilhadeiras.

Os pátios de estocagem são divididos em sessenta e quatro posições para a alocação de pilhas 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 usando uma recuperadora de roda de balde sendo a carga imediatamente direcionada aos navios.

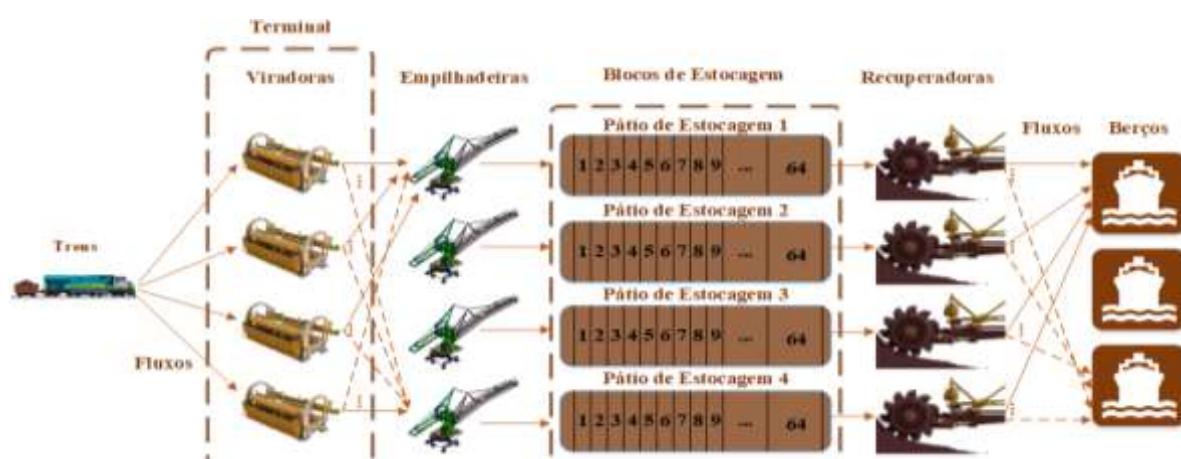


Figura 1: Layout do Pátio simulado

No pátio encontram-se quatro terminais de descarga (estações de despejo), quatro pátios de estocagem, quatro empilhadeiras, quatro recuperadoras e três berços para os navios. As empilhadeiras estão totalmente disponíveis para os terminais e os pátios de estocagem e as recuperadoras só para os pátios de estocagem. 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.

Para efeitos de aplicação considera-se que ao longo de todo o processo existe apenas um tipo de minério, desconsiderando as suas variações quanto a qualidade do produto. 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 transferidas 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, deve-se atribuir os primeiros navios nos berços. Um navio não pode chegar no berço antes da sua hora previamente estimada. Após o navio chegar no berço, inicia-se a recuperação das pilhas no pátio. O tempo de carregamento do navio é diretamente proporcional a quantidade de pilhas recuperadas.

Assim, com base na apresentação 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 Viradoras
- C* Conjunto de Empilhadeiras, Pátios e Recuperadoras
- D* Conjunto de Pilhas
- F* Conjunto de Berços
- N* Conjunto de Navios

Parâmetros

- D_n Demanda do navio n
- $Prod_a$ Capacidade de produção da mina a
- $Capv_b$ Capacidade do viradora b
- $Cape_c$ 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

- 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 viradora b
- Q_{bc} Quantidade de minério transportado do viradora 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 transportado da pilha d para a recuperadora do pátio c
- T_{cf} Quantidade de minério transportado da recuperadora do pátio c para o berço f

De acordo com a notação definida, o modelo matemático proposto é apresentado pelas equações (1) – (16).

Função objetivo

$$\text{Maximizar } Z_1 = \sum_{n \in N} \sum_{f \in F} X_f^n \quad (1)$$

$$\text{Maximizar } Z_2 = \sum_{n \in N} \sum_{f \in F} D_n X_f^n \quad (2)$$

Sujeito a:

$$\sum_{b \in B} P_{ab} \leq Prod_a \quad \forall a \in A \quad (3)$$

$$\sum_{c \in C} Q_{bc} \leq Capv_b \quad \forall b \in B \quad (4)$$

$$\sum_{d \in D} R_{cd} \leq Cape_c \quad \forall c \in C \quad (5)$$

$$\sum_{d \in D} S_{dc} \leq Capr_c \quad \forall c \in C \quad (6)$$

$$\sum_{f \in F} T_{cf} \leq Capb_f \quad \forall f \in F \quad (7)$$

$$R_{cd} \leq Capp_{cd} \quad \forall c \in C, \quad \forall d \in D \quad (8)$$

$$\sum_{a \in A} P_{ab} = \sum_{c \in C} Q_{bc} \quad \forall b \in B \quad (9)$$

$$\sum_{b \in B} Q_{bc} = \sum_{d \in D} R_{cd} \quad \forall c \in C \quad (10)$$

$$R_{cd} \leq S_{dc} \quad \forall c \in C, \quad \forall d \in D \quad (11)$$

$$\sum_{d \in D} S_{dc} = \sum_{f \in F} T_{cf} \quad \forall c \in C \quad (12)$$

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

$$\sum_{f \in F} X_f^n \leq 1 \quad \forall n \in N \quad (14)$$

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

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

A função objetivo (1) maximiza a quantidade de navios que o sistema consegue atender dentro do horizonte de planejamento do estudo. Por sua vez, a função objetivo (2) maximiza a quantidade de carga transportada pelos navios. A diferença entre as funções objetivos ao ser implementado o modelo será a escolha de número de clientes atendidos ou a quantidade de carga vendida, sendo essa decisão direcionada a partir de qual função objetivo será usada.

O conjunto de restrições (3) garante que tudo que é enviado de uma mina ao sistema seja menor que a capacidade produtiva desta mina. Já a restrição (4) define que toda a carga transportada dos viradura para uma empilhadeira não ultrapasse a capacidade de processamento suportada pelos viradura, de maneira semelhante, as restrições (5)-(8) impedem que sejam transportados além das capacidades da empilhadeira, recuperadora, berços e pilhas de cada pátio, respectivamente.

O conjunto de restrições (9)-(12) garante que todo o fluxo que chega a um equipamento seja

igual ao que sai dele, para viradora, empilhadeira, pilha de cada pátio e recuperadora, respectivamente. A restrições (13) assegura que o material transportado seja para abastecer cada navio que tem sua demanda atendida em cada berço.

A restrição (14) garante que um navio só pode ser atendido por no máximo um berço. Por fim, as restrições (15) e (16) estão relacionadas ao domínio e natureza das variáveis de decisão do modelo matemático proposto.

4. Experimentos Computacionais e Discussão

Para verificação e validação do modelo proposto, foram realizados experimentos computacionais com o auxílio do solver comercial CPLEX (IBM, 2012). Sem que pudessem ser disponibilizados valores reais para que os cenários fossem simulados, utilizou-se os valores aleatórios para definir a demanda de cada navio.

O computador utilizado nos experimentos computacionais foi um Intel Core i5 com 4Gb de memória RAM. Como o modelo matemático proposto apresenta duas funções objetivos, optou-se por resolver o modelo considerando cada uma delas como única função objetivo do problema. Na Tabela 1 encontram-se as informações relativas aos conjuntos de cada instância que foi criada para efeito de comparação entre elas.

Instância	A	B	C	D	F	N
1	1	4	4	64	2	10
2	2	4	4	64	2	10
3	2	4	4	64	3	10
4	2	4	4	64	5	10
5	2	4	4	64	6	10
6	2	4	4	64	7	10

Tabela 1- Instâncias produzidas para a validação do modelo matemático

A evolução das instâncias foi com o objetivo de estudar a variação para que toda a demanda fosse atendida, na primeira delas considerou-se a existência de uma mina e foi duplicada essa quantidade para que fosse observado se era a produção da demanda que fosse o gargalo do sistema.

A partir da terceira instância variação ocorreu na quantidade de berços para que todos os navios fossem atendidos no horizonte de planejamento estudado. A partir dessa análise considerando apenas a Função objetivo (1), na Tabela 2 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 para a instância em questão.

Instância	Função objetivo (nº navios atendidos)	Tempo (seg)
1	4	0,11
2	4	0,17
3	6	0,2
4	8	0,14
5	9	0,12
6	10	0,18

Tabela 2 - Implementação da modelagem matemática com a Função Objetivo (1)

De maneira semelhante, na Tabela 3 é apresentada os resultados da implementação do modelo matemático considerando a Função objetivo (2).

Instância	Função objetivo (carga transportada*)	Tempo (seg)
1	4	0,12
2	4	0,21
3	6	0,18
4	9	0,18
5	11,5	0,17
6	12,5	0,12

Tabela 3 - Implementação da modelagem matemática com a Função Objetivo (2)

* Valores simulados para milhões de toneladas

Considerando um horizonte de planejamento restrito, em um tempo pequeno, com uma quantidade de 10 navios a serem atendidos pelo porto o modelo foi suficiente para resolver o problema de maneira ótima pelo CPLEX 12.5 (IBM, 2012), embora casos reais apresentem maior horizonte de planejamento e a quantidade de navios, o modelo matemático poderá ser empregado para esse tipo de programação.

Está análise 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

Este trabalho apresentou um modelo matemático bi-objetivo para projetos de otimização na alocação pilhas em um pátio de estocagem de portos e carregamento de navios, com atores e uma abordagem voltada a fluxo que até então não haviam sido considerados por obras de outros autores.

Para os testes computacionais, considerou-se uma única função objetivo por análise. Os resultados obtidos foram satisfatórios, que foram suficientes para validar o modelo e, ainda, processados e tempo computacional baixo, conforme mostrado nas Tabelas 2 e 3. Em todos os casos, solver comercial, como o CPLEX (IBM, 2012), foi capaz de resolver o problema em um tempo computacional aceitável.

Entretanto, para análise de problemas de grande porte, verifica-se a necessidade de implementação em instâncias maiores, que superem em quantidade de variáveis as previstas nesse trabalho, para tanto poderá ser realizado junto a implementação de heurísticas ou meta-heurísticas específicas.

Outra abordagem que poderá ser adotada em trabalhos futuros é considerar este tipo de problema para situações distintas devido a seu e dinamismo e complexidade, em que o acompanhamento pode ser feito de forma contínua ou, ainda, considerar eventuais problemas de abastecimento, intempéries ou manutenção de equipamento ao realizar a programação. Para isso deverão ser consideradas as técnicas de resolução usando a programação dinâmica ou programação estocástica.

Ainda com relação aos métodos de solução, e considerando a importância da abordagem multi-objetivo do problema aqui apresentado, verifica-se a existência da necessidade de desenvolver

algoritmos específicos multi-objetivos. Acredita-se que estas técnicas permitirão obter soluções de compromisso ainda mais adequadas ao problema considerando as duas abordagens.

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. *Integration of stockyard and rail network: a scheduling case study*. In: proceedings of the fifth Asia Pacific industrial engineering and management systems conference, Gold Coast, Australia. 2004.

AGO, M.; NISHI, T.; KONISHI, M. *Simultaneous optimization of storage allocation and routing problems for belt-conveyor transportation*. Journal of Advanced mechanical Design, Systems, and Manufacturing, v. 1, n. 2, p. 250-261, 2007.

ALMEIDA, F. A.; PIMENTEL, B.S. *Um modelo matemático para o problema de programação integrada de curto prazo em minas*. Anais do XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, SBPO, Bento Gonçalves, 2010.

BITTENCOURT, S.V.; MATEDE W. C. *Uma abordagem acerca dos problemas de otimização referentes ao sistema de alocação em pátios de estocagem e às movimentações de bobinas de aço laminadas*. Simpósio Projeto e Análise de Algoritmos, UFES, Vitória, 2009.

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

FLOUDAS, C. A.; LIN, X. *Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review*. **Computers & Chemical Engineering**, v. 28, n. 11, p. 2109-2129, 2004.

IBM. *IBM ILOG CPLEX v12.5*: User's manual for CPLEX, 2012

IGNIZIO, J. P. *A review of Goal Programming: a tool for multiobjective analysis*. Journal of the Operational Research Society, v. 29, n. 11, p. 1109–1119, 1978.

KIS, T.; KOVÁCS, A. *A cutting plane approach for integrated planning and scheduling*. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 2, p. 320-327, 2012.

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

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

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

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

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

MEYR, H.; MANN, M. *A decomposition approach for the general lotsizing and scheduling problem for parallel production lines*. **European Journal of Operational Research**, v. 229, n. 3, p. 718-731, 2013.

NÓBREGA, M. A. *Modelagem matemática de um sistema de produção e transporte de minério de ferro* (dissertação de mestrado). Campinas: Universidade estadual de Campinas, 1996.

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

PIMENTEL, B. S. *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. *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, 2010.

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