

MODELAGEM MATEMÁTICA E META-HEURÍSTICA APLICADA À ELABORAÇÃO DO PLANO DE ESTIVA EM NAVIOS PORTA-CONTÊINERES

Jonas Paluci Barbosa

Patricia Alcântara Cardoso

Universidade Federal do Espírito Santo

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Transportes

RESUMO

Os terminais portuários possuem um papel fundamental dentro das cadeias de suprimento globais. Dada a crescente containerização das cargas e o aumento da competitividade entre os portos, a busca pelo aumento da eficiência nos terminais de contêineres torna-se cada vez mais almejada, incentivando o desenvolvimento de métodos de otimização aplicados aos principais problemas da operação portuária, dentre os quais se situa o problema do plano de estiva. Este problema consiste na definição adequada do arranjo dos contêineres em um navio, visando à minimização dos movimentos de remanejamento necessários nas operações de carregamento e descarregamento de contêineres. Dada a complexidade do problema, a utilização de métodos exatos torna-se inviável em instâncias de grande porte. Neste cenário outras técnicas são alternativas para busca de solução, dentre elas o uso de meta-heurísticas, visto a sua capacidade de gerar boas soluções em tempo computacional hábil. Assim, a dissertação tem por objetivo propor o desenvolvimento de um modelo matemático e uma meta-heurística, a ser definida, para o problema do plano de estiva, visando à minimização do número de remanejamentos de contêineres, considerando as devidas restrições operacionais e de estabilidade do navio.

1. INTRODUÇÃO

No contexto do comércio mundial, o modal marítimo possui um papel fundamental dentro das cadeias de suprimento globais. Dentre o que é comercializado internacionalmente, mais de 80% em termos de valor e 70% em termos de volume são transportados por meio de navios e manuseados nos terminais portuários (UNCTAD, 2017).

Uma tendência compreendida no transporte marítimo é a containerização das cargas. A utilização de contêineres torna-se atrativa no contexto de integração dos modos de transporte, visto o seu conceito de padronização e unitização, que permitem o transporte eficiente de cargas ao longo da cadeia, sem a necessidade de reorganização de seu conteúdo interno (LEE e SONG, 2017).

O aumento da utilização de contêineres, conforme corroborado pelo relatório da UNCTAD (2017), bem como a crescente competitividade entre os portos, incentiva a busca pelo emprego de métodos de otimização nas operações dos terminais portuários, visando torná-las mais eficientes (STEEKEN, VOß e STAHLBOCK, 2004; STAHLBOCK e VOß, 2008). Dentre os principais problemas, segundo os autores supracitados, destaca-se o problema do plano de estiva, objeto de estudo desta dissertação.

O objetivo do problema do plano de estiva consiste em definir o melhor arranjo dos contêineres em um navio, de modo a minimizar o número de movimentos de remanejamentos nas operações de carregamento e descarregamento dos contêineres do navio nos terminais portuários, atendendo as restrições operacionais envolvidas (AVRIEL *et al.*, 1998; DUBROVSKY, LEVITIN e PENN, 2002).

Em instâncias de pequeno porte, o problema do plano de estiva pode ser resolvido à sua otimalidade. Entretanto, em instâncias similares ao cenário real da operação portuária, torna-

se difícil encontrar soluções por métodos exatos em tempo computacional hábil, visto que o problema em questão é definido como NP-Completo (AVRIEL, PENN e SHPIRER, 2000).

Assim, a dissertação proposta tem por objetivo apresentar uma nova formulação ao problema do plano de estiva, visando à minimização dos movimentos de remanejamento dos contêineres, levando em conta restrições operacionais e de estabilidade do navio. Em conjunto, será desenvolvida uma meta-heurística como método de resolução para obter resultados factíveis rapidamente em instâncias de grande porte.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O problema do plano de estiva é abordado na literatura com diversos enfoques, abrangendo diferenças em aspectos como: objetivos do modelo; inclusão de elementos relativos à estabilidade do navio; considerações sobre diferentes tipos de contêineres; e abordagens de solução.

Avriel *et al.* (1998) propuseram uma abordagem simplificada do problema do plano de estiva por meio de uma formulação por programação binária (BIP), visando minimizar o número total de remanejamentos. Nesta modelagem, não foram feitas considerações relativas à estabilidade do navio ou diferenças entre os tipos de contêineres. Diante da complexidade do problema, os autores desenvolveram uma heurística denominada *Suspensory Heuristic Procedure*. Dubrovsky, Levitin e Penn (2002) trataram a mesma formulação de Avriel *et al.* (1998) e propuseram uma resolução por meio de algoritmos genéticos (GA), obtendo resultados superiores nos experimentos computacionais. A meta-heurística desenvolvida também foi capaz de encontrar soluções com a inclusão de restrições de estabilidade do navio.

Wilson e Roach (1999) apresentaram a divisão do plano de estiva em dois subproblemas, um de colocação generalizada e outro de colocação especializada. O problema de colocação generalizada consiste em definir grupos de contêineres e aloca-los, dividindo o navio em blocos. Já o problema de colocação especializada consiste no plano de estiva detalhado, alocando individualmente cada contêiner no navio. Sem um modelo matemático explícito, foram consideradas questões de estabilidade do navio e diferenças entre os contêineres em termos de tamanho e classe (padrão, refrigerado, carga perigosa, etc.). Os autores propuseram uma abordagem por decomposição, resolvendo o primeiro subproblema por meio do método *Branch and Bound* (B-B) e utilizando o seu resultado como entrada para o segundo, resolvido por meio da meta-heurística Busca Tabu (BT). Os resultados obtidos em testes baseados em dados reais indicaram a capacidade do método em elaborar planos de estiva factíveis.

Ambrosino, Sciomachen e Tanfani (2004) abordaram o problema sob a ótica de decisão por parte do terminal portuário, definindo-o como *Master Bay Plan Problem* (MBPP). Os autores apresentaram um modelo BIP para o problema, com a inclusão de restrições de estabilidade, e desenvolveram um método heurístico capaz de relaxar algumas restrições. Ambrosino, Schiomachen e Tanfani (2006) apresentaram uma abordagem por decomposição para o MBPP, enquanto Sciomachen e Tanfani (2007) modelaram o problema como um *Bin Packing Problem* tridimensional (3D-BPP). Ambos empregaram métodos heurísticos na resolução.

Zhang, Lin e Ji (2005) decompuseram o problema, focando exclusivamente na resolução do subproblema de colocação generalizada. Para tal, os autores o modelaram como um *Bin Packing Problem* (BPP), desconsiderando as restrições de estabilidade, tendo como objetivos

minimizar o número de baias ocupadas por porto de destino e os movimentos de remanejamento. A resolução do problema se deu por meio de uma heurística *Best Fit*, comumente utilizada neste tipo de formulação.

Delgado *et al.* (2012) apresentaram uma modelagem por programação com restrições (CP) e outra por programação inteira (IP) para o problema de alocação individual dos contêineres (segundo subproblema). Os modelos visam minimizar o número de remanejamentos e o número de pilhas formadas, dentre outros objetivos. Parreño, Pacino e Alvarez-Valdes (2016) incluíram restrições relativas à existência de cargas perigosas e consideraram a possibilidade de não atendimento da demanda, além de propor a resolução pela meta-heurística GRASP.

Monaco, Sammarra e Sorrentino (2014) consideram o problema do plano de estiva sob a ótica da gerência do terminal portuário e propuseram um modelo BIP, visando à minimização dos tempos de transporte dos contêineres e das trocas no pátio. Os autores desenvolveram um método de duas fases, uma construtiva e outra de aprimoramento, baseadas no procedimento de Busca Tabu.

Ambrosino, Paolucci e Sciomachen (2015a) denominaram o problema com múltiplos portos como *Multi-Port Master Bay Plan Problem* (MP-MBPP) e apresentaram dois modelos de programação inteira mista (MIP) e duas heurísticas, visando à resolução do subproblema de colocação generalizada, considerando a possibilidade de não atendimento da demanda. Os modelos têm como objetivos minimizar a demanda não atendida e o número de remanejamentos, além de balancear a carga de trabalho dos guindastes do cais. Ambrosino, Paolucci e Sciomachen (2017) consideraram o atendimento da demanda como restrição e apresentaram uma nova formulação MIP. Ambrosino, Paolucci e Sciomachen (2015b) propuseram uma nova heurística com base na última formulação.

Araújo *et al.* (2016) apresentaram uma abordagem pelo método *Pareto Clustering Search* (PCS), que emprega a combinação de meta-heurísticas e heurísticas de busca local para obter uma boa aproximação da fronteira de Pareto, tendo como objetivos minimizar o total de remanejamentos e os critérios de instabilidade do navio. Zhang e Lee (2016) propuseram a utilização de uma variante de algoritmo genético, denominada NSGA-III, combinada com um procedimento de busca local, visando os mesmos objetivos.

3. METODOLOGIA

Como observado na introdução, a dissertação visa o desenvolvimento tanto de um modelo matemático quanto de uma meta-heurística como método de solução. Para a realização de ambos, inicialmente será feito um levantamento na literatura dos modelos existentes e das abordagens heurísticas propostas.

Com base nos modelos selecionados, um novo modelo matemático será definido, englobando as restrições operacionais e de estabilidade desejadas. Posteriormente, serão analisados os resultados das meta-heurísticas desenvolvidas e serão identificadas quais abordagens foram pouco exploradas, permitindo embasar a escolha da meta-heurística que guiará o processo de resolução do plano de estiva.

A partir do desenvolvimento da modelagem matemática e do algoritmo, implementado em linguagem de programação C, serão promovidos experimentos computacionais e,

subsequentemente, será feita a análise quantitativa dos resultados obtidos, comparando o desempenho da meta-heurística a ser desenvolvida com o do modelo implantado em solver comercial.

Espera-se, ao fim da pesquisa, que o método proposto seja capaz de encontrar soluções em instâncias de grande porte, comparáveis à realidade da operação dos terminais portuários, em baixo tempo computacional, de modo a justificar a sua utilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ambrosino, D.; Paolucci, M.; Sciomachen, A. (2015). *A MIP heuristic for Multi-Port Stowage Planning*. Transportation Research Procedia, 10, 725-734.
- Ambrosino, D.; Paolucci, M.; Sciomachen, A. (2015). *Experimental evaluation of mixed integer programming models for the multi-port masterbay plan problem*. Flexible Services and Manufacturing Journal, 27, 263-284.
- Ambrosino, D.; Paolucci, M.; Sciomachen, A. (2017). *A computational evaluation of a MIP model for multi-port stowage planning problems*. Soft Computing, 21, 1753-1763.
- Ambrosino, D.; Sciomachen, A.; Tanfani, E. (2004). *Stowing a containership: the master bay plan problem*. Transportation Research Part A, 38, 81-99.
- Ambrosino, D.; Sciomachen, A.; Tanfani, E. (2006). *A decomposition heuristics for the container ship stowage problem*. Journal of Heuristics, 12, 211-233.
- Araújo, E. J. et al. (2016). *Pareto clustering search applied for 3D container ship loading plan problem*. Expert Systems with Applications, 44, 50-57.
- Avriel, M.; Penn, M.; Shpirer, N. (2000). *Container ship stowage problem: Complexity and connection to the coloring of circle graphs*. Discrete Applied Mathematics, 103, 271-279.
- Avriel, M.; Penn, M.; Shpirer, N.; Witteboon, S. (1998). *Stowage planning for container ships to reduce the number of shifts*. Annals of Operations Research, 76, 55-71.
- Delgado, A. et al. (2012). *A Constraint Programming model for fast optimal stowage of container vessel bays*. European Journal of Operational Research, 220, 251-261.
- Dubrovsky, O.; Levitin, G.; Penn, M. (2002). *A Genetic Algorithm with a Compact Solution Encoding for the Container Ship Stowage Problem*. Journal of Heuristics, 8, 585-599.
- Lee, C. Y.; Song, D. P. (2017). *Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities*. Transportation Research Part B, 95, 442-474.
- Monaco, M. F.; Sammarra, M.; Sorrentino, G. (2014). *The Terminal-Oriented Ship Stowage Planning Problem*. European Journal of Operational Research, 239, 256-265.
- Parreño, F.; Pacino, D.; Alvarez-Valdes, R. (2016). *A GRASP algorithm for the container stowage slot planning problem*. Transportation Research Part E, 94, 141-157.
- Sciomachen, A.; Tanfani, E. (2007). *A 3D-BPP approach for optimising stowage plans and terminal productivity*. European Journal of Operational Research, 183, 1433-1446.
- Stahlbock, R.; Voß, S. (2008). *Operations research at container terminals: a literature update*. OR Spectrum, 30, 1-52.
- Steeken, D.; Voß, S.; Stahlbock, R. (2004). *Container terminal operation and operations research - a classification and literatura review*. OR Spectrum, 26, 3-49.
- UNCTAD (2017). *Review of Maritime Transport-2017*, p. 130.
- Wilson, I. D.; Roach, P. A. (1999). *Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning*. Journal of Heuristics, 5, 403-418.
- Zhang, W. Y.; Lin, Y.; Ji, Z. S. (2005). *Model and algorithm for container ship stowage planning based on bin-packing problem*. Journal of Marine Science and Applications, 4(3), 30-36.
- Zhang, Z.; Lee, C. Y. (2016). *Multiobjective approaches for the ship stowage planning problem considering ship stability and container rehandles*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems, 46(10), 1374-1389.

Jonas Paluci Barbosa (jpalucibarbosa@hotmail.com)

Patricia Alcântara Cardoso (patricia.cardoso@ufes.br)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Mestrado em Transportes, Universidade Federal do Espírito Santo, Av. Fernando Ferrari, 514 – Goiabeiras, Vitória, ES, Brasil. CEP: 29075-910