



CATARINA JUNQUEIRA

Modelagem e Resolução do Problema de Otimização Conjunta do Plano de Estiva e Movimentação de Contêineres em Pátios Portuários

Limeira, 2015



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS APLICADAS

CATARINA JUNQUEIRA

**“Modelagem e Resolução do Problema de Otimização Conjunta do
Plano de Estiva e Movimentação de Contêineres em Pátios
Portuários”**

Dissertação apresentada a Faculdade de Ciências Aplicadas para obtenção do Título de Mestra em Pesquisa Operacional, na área de concentração de pesquisa operacional.

Orientador: Prof. Dr. Aníbal Tavares de Azevedo

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL
DISSERTAÇÃO/TESE DEFENDIDA PELA ALUNA
CATARINA JUNQUEIRA, E ORIENTADA PELO
PROF. DR. ANÍBAL TAVARES DE AZEVEDO



(assinatura do orientador)

**LIMEIRA,
2015**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Ciências Aplicadas
Sueli Ferreira Júlio de Oliveira - CRB 8/2380

J968m Junqueira, Catarina, 1990-
Modelagem e resolução do problema de otimização conjunta do plano de estiva e movimentação de contêineres em pátios portuários / Catarina Junqueira. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Aníbal Tavares de Azevedo.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Ciências Aplicadas.

1. Navios porta-containers. 2. Transporte por containers. 3. Áreas portuárias. 4. Cadeia de suprimentos. I. Azevedo, Aníbal Tavares. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Ciências Aplicadas. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Modeling and resolution of the joint optimization problem of the stowage plan problem and handling of containers in port yards

Palavras-chave em inglês:

Containerships

Transport by containers

Port areas

Supply chain

Área de concentração: Pesquisa Operacional

Titulação: Mestra em Pesquisa Operacional

Banca examinadora:

Aníbal Tavares de Azevedo [Orientador]

Cristiano Torezzan

Luis Leduino de Salles Neto

Data de defesa: 03-06-2015

Programa de Pós-Graduação: Pesquisa Operacional

Autor(a): Catarina Junqueira

Título: Modelagem e Resolução do Problema de Otimização Conjunta do Plano de Estiva e Movimentação de Contêineres em Pátios Portuários

Natureza: Dissertação apresentada a Faculdade de Ciências Aplicadas para obtenção do Título de Mestra em Pesquisa Operacional, na área de concentração de pesquisa operacional.

Instituição: Faculdade de Ciências Aplicadas

Data da Defesa: Limeira, 03 de junho de 2015.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Aníbal Tavares de Azevedo (Orientador)

Assinatura

Prof. Dr. Dr. Cristiano Torezzan

Assinatura

Prof. Dr. Luis Leduíno de Salles Neto

Assinatura

Resumo

A eficiência de um terminal portuário é essencial para permitir o incremento do fluxo de contêineres em uma cadeia global de suprimentos. Neste trabalho, é proposta a integração do problema de movimentação de contêineres no pátio com o problema do plano de estiva do navio. Na literatura é provado que ambos os problemas são NP-Completo, para tanto, é proposta a adaptação de um método que já foi empregado com sucesso na resolução do problema do plano de estiva: a representação por regras. As regras definem ao longo de n portos, como vai ocorrer a sequência de carregamento e descarregamento de contêineres e tem como objetivo reduzir o número de movimentos desnecessários. A contribuição prática dar-se-á pela redução na quantidade de informações necessárias para se representar a tomada de decisões através de um modelo matemático. Além disso, a representação por regras tem a grande vantagem de utilizar uma representação bastante compacta que assegura a geração de soluções factíveis. São apresentados os resultados obtidos com exemplos numéricos que mostram que, com baixo tempo computacional foi possível obter sequências de movimentos factíveis.

Palavras-Chave: Plano de Estiva de um Navio Porta-Contêiner; Problema de Movimentação de Contêineres em Pátios Portuários; Representação por Regras.

Abstract

The efficiency of a port terminal is essential to allow the increase of the flow of containers in a global supply chain. In this work, it is proposed the integration of the problem of moving containers in the yard with the ship stowage plan problem. In literature it is proven that both problems are NP-Completeness, therefore, it is proposed to adapt a method that has been successfully employed in solving the problem of the storage plan: the rules representation. The rules define over n ports, how the sequence of loading and unloading containers will occur and aims to reduce the number of unnecessary movements. The practical contribution is given by the reduction in the amount of information needed to represent the decision-making process through a mathematical model. In addition, the rules representation have the advantage of using a very compact representation that ensures the generation of feasible solutions. The results obtained with numerical examples show that with low computational time it has been possible to obtain sequences of feasible movements.

Keywords: Stowage Plan of a Containership; Container Handling Problem at the Port Yard; Rules Representation.

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
Siglas	xix
1. Introdução	1
1.1 Panorama Histórico	2
1.2 Panorama Atual.....	4
1.3 Fluxo de Contêineres em um Terminal Portuário	7
1.4 Entraves do Setor.....	11
1.5 Delineamento do Trabalho	18
2. Objetivos	19
2.1 Objetivo Principal	19
2.2 Objetivos Secundários.....	19
3 Justificativa	21
4 Revisão Bibliográfica	23
4.1 O Problema de Movimentação de Contêineres em Pátios Portuários	23
4.2 O Problema de Movimentação de Contêineres em Pátios Portuários Associado ao Plano de Estiva	33
4.3 O Problema do Plano de Estiva	36
5. Metodologia.....	47
5.1 Modelo Matemático do PCCTP	48
5.2 Representação por Regras para o PCCTP	51
5.2.1 Regras de Carregamento	53
5.2.2 Regras de Descarregamento.....	56

5.3	Modelo Matemático do Problema de Movimentação de Contêineres em Pátios Portuários	57
5.4	Representação por Regras para o Pátio	61
5.4.1	Regras de Retirada	62
5.5	Integração das Regras	71
5.6	Estrutura Geral do Algoritmo Genético.....	73
5.6.1	Algoritmos Genéticos.....	74
5.6.2	Função Objetivo e Inicialização	77
5.6.3	Esquema de Codificação	78
5.6.4	Programa de Simulação	79
5.6.5	Método de Avaliação e Seleção	83
5.6.6	Critério de Parada.....	85
6.	Resultados	87
6.1	Resultados dos Cenários de Teste para as Regras de Retirada (Rt).87	
6.2	Resultados dos Cenários de Teste Para o Problema Conjunto do Plano de Estiva e Movimentação de Contêineres em Pátios Portuários	92
7.	Conclusões e Trabalhos Futuros	99
	REFERÊNCIAS	101

Lista de Figuras

FIGURA 1: Comércio Global de Contêineres, 1996-2013 (Milhões de TEUs e variação percentual anual).....	5
FIGURA 2: Principais áreas de um terminal de contêineres.....	8
FIGURA 3: Áreas de operação de um terminal de contêineres e fluxo de transportes.....	10
FIGURA 4: Programação da atribuição de três berços para atender oito navios	12
FIGURA 5: Representação esquemática dos elementos de um terminal portuário de contêineres.....	13
FIGURA 6: Estrutura celular do arranjo do armazenamento de um navio porta-contêiner.....	15
FIGURA 7: Disposição de contêineres em um pátio portuário.....	16
FIGURA 8: Abstração de um navio porta-contêiner dividido em blocos de espaço	38
FIGURA 9: Relação entre os blocos e os espaços individuais.....	39
FIGURA 10: Matriz de ocupação B para navio com capacidade de 20 contêineres e transporte para seis portos.....	51
FIGURA 11: Matriz de Transporte T.....	53
FIGURA 12: Matriz de ocupação no porto um, após a aplicação da regra Rc1	54
FIGURA 13: Matriz de ocupação no porto dois, após a aplicação da regra Rc2	54
FIGURA 14: Matriz de Ocupação no porto um, após a aplicação da regra Rc3	55
FIGURA 15: Matriz de Ocupação no porto dois, após a aplicação da regra Rc4	55

FIGURA 16: Matriz de ocupação no porto dois, antes e depois da aplicação da regra Rd1.....	56
FIGURA 17: Matriz de Ocupação P do Porto 1.....	62
FIGURA 18: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt1.....	63
FIGURA 19: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt2.....	64
FIGURA 20: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt3.....	65
FIGURA 21: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt4.....	66
FIGURA 22: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt5.....	67
FIGURA 23: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt6.....	68
FIGURA 24: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt7.....	69
FIGURA 25: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt8.....	70
FIGURA 26: Integração das regras de retirada, carregamento e descarregamento em uma única regra de decisão Rej.....	71
FIGURA 27: Estrutura geral de um algoritmo genético.....	74
FIGURA 28: Operadores de Cruzamento: (a) cruzamento com um ponto de corte; (b) cruzamento com dois pontos de corte.....	76
FIGURA 29: Operador de Mutação.....	77
FIGURA 30: Codificação do cromossomo.....	78
FIGURA 31: Representação das b melhores soluções de uma população de cinco indivíduos através de matriz	79
FIGURA 32: Cenário de Caixa-Preta para a Função Objetivo.....	80
FIGURA 33: Programa de simulação para a movimentação de cargas no pátio do porto.....	81

FIGURA 34: Exemplo de atribuição de uma porção da roleta para cada indivíduo de acordo com seu fitness.....	84
FIGURA 35: Comparação do desempenho das regras de retirada no cenário de teste 8.....	89
FIGURA 36: Ocupação Inicial de um Pátio.....	95
FIGURA 37: Matriz de Ocupação (B) do Navio nos Portos Um a Três no Cenário 4.....	95
FIGURA 38: Matriz de Ocupação (B) do Navio nos Portos Um a Três no Cenário 4 com Pátios Planos.....	97

Lista de Tabelas

TABELA 1: Regras Re _j a serem utilizadas em cada porto p – Parte 1.....	72
TABELA 2: Regras Re _j a serem utilizadas em cada porto p – Parte 2.....	72
TABELA 3: Regras Re _j a serem utilizadas em cada porto p – Parte 3.....	72
TABELA 4: Regras Re _j a serem utilizadas em cada porto p – Parte 4.....	73
TABELA 5: Resultados dos Testes Numéricos para as Regras de Retirada Rt1 a Rt4.....	88
TABELA 6: Resultados dos Testes Numéricos para as Regras de Retirada Rt5 a Rt8.....	88
TABELA 7: Melhor Regra para Cada Cenário de Teste e Média de Movimentos por Contêineres.....	90
Tabela 8: Resultados Apresentados em Caserta <i>et al.</i> (2012).....	91
Tabela 9: Resultados das Simulações.....	93
Tabela 10: Resultado das Simulações - Comparação com Pátio Plano.....	96

Siglas

FIFO	First In First Out – Primeiro a entrar, primeiro a sair
LILO	Last In Last Out – Último a entrar, último a sair
PCCTP	Problema de Carregamento de Contêineres em Terminais Portuários
TEU	Twenty-Foot Equivalent Units – Unidades Equivalentes de Vinte Pés
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development - Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento

1. Introdução

Com o desenvolvimento do comércio internacional e a diversificação da cadeia de suprimentos, terminais contêineres tem representado um importante papel no transporte marítimo mundial, modalidade que hoje é responsável por cerca de 90% da totalidade dos serviços de transporte no comércio exterior (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2014).

Segundo a UNCTAD, a utilização de contêineres tem sido um motor mais forte para a globalização do que a liberalização do comércio (Unctad, 2013). O transporte internacional de contêineres representa cerca de 17% do transporte mundial de cargas em toneladas, entretanto, em valores, as cargas containerizadas, representam 52% do valor total em dólares (Unctad, 2012).

Terminais contêineres servem como centros para o trânsito de mercadorias containerizadas e sua eficiência é essencial para permitir o incremento do fluxo de contêineres em uma cadeia global de suprimentos.

Segundo Murty *et al.* (2009), um terminal contêiner serve como uma interface entre o oceano e o transporte terrestre e tem duas funções principais: receber contêineres de exportação para embarcar nos navios e descarregar contêineres de importação de embarcações para entregar aos consignatários.

Apesar da crise econômica global iniciada em 2008 pela quebra de múltiplas instituições financeiras, o segmento de transporte de cargas em contêineres tem crescido nos últimos anos, e há perspectivas de aumento de demanda. Desta forma, entender as características, incertezas e complexidades das operações em terminais contêineres e, com isso, propor eficientes ferramentas de suporte à tomada de decisão, passam a serem peças fundamentais na capacidade de atendimento e nos custos desse serviço, além da manutenção da competitividade e da eficiência portuária.

Neste contexto, este trabalho trata de dois problemas de operações de

um terminal de contêineres: o problema de movimentação de contêineres no pátio portuário e o problema do plano de estiva. Para isso é proposta a adaptação de um método que já foi empregado com sucesso na resolução do problema do plano de estiva: a representação por regras (AZEVEDO *et al.*, 2011).

Na adaptação feita, são apresentadas regras inéditas para a movimentação de contêineres no pátio. Para o carregamento e descarregamento no navio são utilizadas as regras propostas por Azevedo *et al.* (2011), mas de forma bidimensional. Todas as regras são integradas e empregadas em um simulador baseado em algoritmo genético, que define a sequência de regras que fornece o menor número de remanejamentos dos contêineres ao longo dos N portos. Remanejamentos são considerados movimentos desnecessários.

O objetivo ao se utilizar a representação por regras é reduzir o número de movimentos desnecessários durante as operações citadas, sem ter que empregar um modelo binário que seja limitado à resolução de instâncias de pequeno porte.

Além disso, pretende-se apresentar um histórico do uso de contêineres no transporte marítimo mundial, sua situação atual e tendências do setor.

A seguir é apresentado um panorama da evolução da utilização de contêineres no transporte marítimo de cargas.

1.1 Panorama Histórico

O uso de contêineres no mercado de transporte marítimo começou há quase seis décadas. Antes disso, toda carga era manuseada de forma manual nos portos. Navios cargueiros permaneciam atracados durante vários dias ou até semanas para que toda a carga fosse desembarcada (FITZGERALD, 1986).

As despesas com o longo tempo de carregamento do navio, perdas e danos na carga, elevavam o custo do transporte em até 50% (FITZGERALD, 1986). Estes

foram os primeiros custos que os contêineres afetaram ao eliminar a movimentação de carga peça-por-peça, segundo Levinson (2006).

Em 26 de abril de 1956, o navio chamado Ideal X deixou o porto de Newark, em New Jersey, rumo ao porto de Houston, Texas, carregado com 58 carrocerias de caminhão feitas de alumínio (LEVINSON, 2006; CUDAHY, 2006). Cada carroceria foi embarcada em sete minutos, e em menos de oito horas o navio estava carregado, a um custo de U\$5,83 por tonelada (CUDAHY, 2006).

Para que tal feito fosse possível, foi preciso adaptar o navio para que pudesse armazenar as carrocerias e provar para entidades regulatórias que a sua estabilidade não seria afetada. Além disso, foi preciso desenvolver e construir caminhões cuja carroceria pudesse ser removida e transportada a bordo do navio (CUDAHY, 2006).

Em 09 de janeiro de 1959, foi colocado em operação o primeiro guindaste construído com o propósito exclusivo de manusear contêineres. O guindaste era capaz de carregar ou descarregar um contêiner a cada três minutos, ou seja, poderia lidar com 400 toneladas por hora, mais de 40 vezes a produtividade média de um grupo de trabalhadores portuários. (BERNHOFEN, 2013).

Foi o começo da operação intermodal. O uso dessas carrocerias, que mais tarde foram padronizadas e transformadas em contêineres, permitiu que fosse possível carregar e descarregar as mercadorias em poucas horas, sem tocá-las individualmente. A padronização permitiu com que os contêineres fossem eficientemente empilhados tanto em navios, quanto em trens, caminhões e guindastes em todo o mundo. Em 1971, 73% da carga marítima nos Estados Unidos era transportada em contêineres (FITZGERALD, 1986).

A possibilidade de transportar mercadorias em contêineres não só levou a uma revolução no transporte, mas em todo o comércio mundial, e facilitou o aumento da capacidade da navegação, reduzindo o tempo de entrega, o preço do frete, as perdas e os danos na carga. A adoção dos contêineres, segundo pesquisa feita por Bernhofen *et al.* (2013), explica um aumento de 320% no comércio bilateral nos países

industrializados passados cinco anos de sua adoção, e um aumento de 790% passados 20 anos.

Devido a tal crescimento, outros desafios foram aparecendo. Para lidar com os contêineres de forma eficiente, foram feitas reconfigurações das instalações portuárias em todo o mundo. Os cais cobertos e galpões de armazenamento que protegiam a carga contra o tempo foram sendo substituídos por grandes extensões de terreno, onde era possível posicionar os enormes guindastes que moviam os contêineres para dentro e fora do navio (FITZGERALD, 2006) e com isso novos problemas foram surgindo. Na seção 1.3 será apresentada qual a situação atual do mercado de contêineres.

1.2 Panorama Atual

A padronização dos contêineres permitiu com que quase qualquer produto pudesse ser transportado por esse meio. Além de produtos manufaturados, eletrônicos, commodities e cargas refrigeradas, como frutas, carnes ou peixes, são hoje transportados em contêineres.

A unidade de medida de contêineres é o TEU, que significa *Twenty-foot Equivalent Units* ou Unidade Equivalente de Vinte Pés. Por exemplo, um navio com capacidade de 8000 TEUs pode carregar 8000 contêineres de vinte pés (AZEVEDO *et al.*, 2011). Um TEU possui oito pés de largura, oito pés de altura e 20 pés de comprimento (BANDEIRA, 2005). Os contêineres de quarenta pés são medidos como 2 TEU.

Na figura a seguir é possível perceber o aumento do número de contêineres movimentados mundialmente nos últimos anos. Em 2012 esse volume atingiu os 155 milhões de TEUs, frente os 151 milhões de TEUs em 2011 (UNCTAD, 2012)

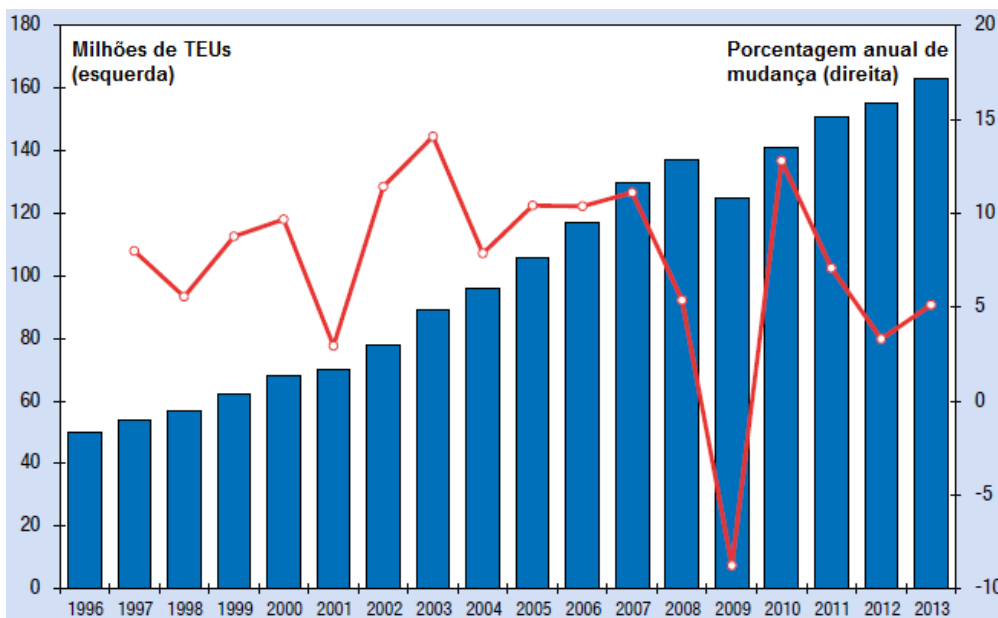


FIGURA 1: Comércio Global de Contêineres, 1996-2013 (Milhões de TEUs e variação percentual anual). Fonte: Adaptado de REVIEW OF MARITIME TRANSPORT 2013 – UNITED NATIONS (2013).

No Brasil, o volume de contêineres movimentados em 2013 foi de 98 milhões de toneladas, frente aos 87 milhões de toneladas movimentados em 2012, e 84 milhões em 2011. (9,3 milhões de TEUs em 2013, 8,2 milhões em 2012 e 7,9 milhões em 2011). (ANUÁRIO ESTATÍSTICO AQUAVIÁRIO - ANTAQ, 2013).

Apesar do histórico de altas taxas de crescimento, devido à crise econômica de 2008/2009, o crescimento desacelerou significativamente. É possível notar pela linha da figura 1, uma redução de quase 10% na taxa de crescimento do comércio global de contêineres no ano de 2008 para o ano de 2009. Em 2012, o comércio de carga conteneirizada cresceu 3,2%, abaixo dos 7,1% em 2011, e 13,1% em 2010. Em 2013, espera-se que essa taxa tenha sido de 5% (UNCTAD, 2013).

Essa queda no crescimento tem acontecido principalmente pela redução no comércio entre o leste e o oeste, ocasionados, principalmente, pela frágil recuperação da Europa e lenta retomada do crescimento nos Estados Unidos (UNCTAD, 2013). A

China também teve seu crescimento econômico reduzido em 2013 para 7,7%, o menor da década.

Apesar desse cenário, a crescente demanda doméstica na China e o comércio sul-sul são previstos a continuar impulsionando a demanda e, conseqüentemente, o crescimento do comércio mundial de contêineres (UNCTAD, 2013).

Dessa forma, para lidar com o enorme aumento no número de contêineres movimentados mundialmente a cada década, o tamanho dos navios-contêineres também tem crescido continuamente, a fim de aumentar os benefícios da economia de escala e manter os preços de frete competitivos.

De 2004 até hoje, a capacidade média de transporte de contêineres dos navios-contêineres quase duplicou, passando de 2.812 TEU para 5.540 TEU. Há 10 anos, o maior navio-contêiner em circulação tinha capacidade de 8.238 TEU. Em 2013, foi entregue pela Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering (DSME), empresa Sul Coreana, o navio Maersk Mc-Kinney Moller, o maior navio-contêiner do mundo, com capacidade de 18.270 TEU (Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering, 2014), superando os maiores anteriores, que tinham capacidade de 16.000 TEU (UNCTAD, 2013). Entretanto, a empresa China Shipping Container Lines (CSCL) encomendou para 2014 um navio com capacidade de 18.400 TEU, que tomará o posto de maior navio-contêiner.

Entretanto, esses enormes navios-contêineres circulam em apenas algumas rotas e são servidos em poucos portos. Os mais importantes navios são os de capacidade média de 8.000 TEU, uma vez que servem os principais portos de diferentes países e continentes (STEEKEN *et al.*, 2004).

Além disso, atualmente a maior parte dos navios contêineres não é equipada com seus próprios guindastes e dependem exclusivamente dos recursos dos portos para manusear a carga. Acredita-se que a proporção dos navios que não possuem seu próprio equipamento de manuseio para os que possuem seja de seis para um (UNCTAD, 2013).

Neste contexto, apesar da significativa desaceleração na taxa de crescimento do setor, a tendência de crescente aumento no tamanho dos navios e no volume de contêineres é provável que continue, representando um enorme desafio para os portos. Terminais contêineres tem que crescer em conformidade, fornecendo recursos suficientes para manutenção das vantagens competitivas durante as operações de carregamento e descarregamento.

Isso significa que devem haver melhorias técnicas tais que as grandes quantidades de contêineres sejam manuseadas em um curto espaço de tempo, com um uso mínimo de equipamentos, garantindo, de forma rápida e eficiente, o processo de atracação do navio para realizar as operações do plano de estiva.

Logo, a produtividade geral dos terminais contêineres passa a ser essencial para manter o fluxo da cadeia de suprimentos. As diversas operações realizadas desde a entrada do navio no porto até sua saída abrangem múltiplos objetivos operacionais que devem ser otimizados para que o terminal possa acompanhar tal ritmo de crescimento e garantir um processo rápido. Na seção 1.3 será apresentado o fluxo de contêineres dentro de um terminal portuário, seguida pela seção 1.4 que destaca os principais entraves do setor.

1.3 Fluxo de Contêineres em um Terminal Portuário

Nesta seção serão apresentadas as principais operações durante o fluxo de contêineres dentro de um terminal portuário.

Segundo Carlo e Roodbergen (2014) os terminais podem ser divididos em cinco áreas principais, nomeadamente berço, cais, transporte, pátio, e portão, como ilustrado na figura 2, a seguir.

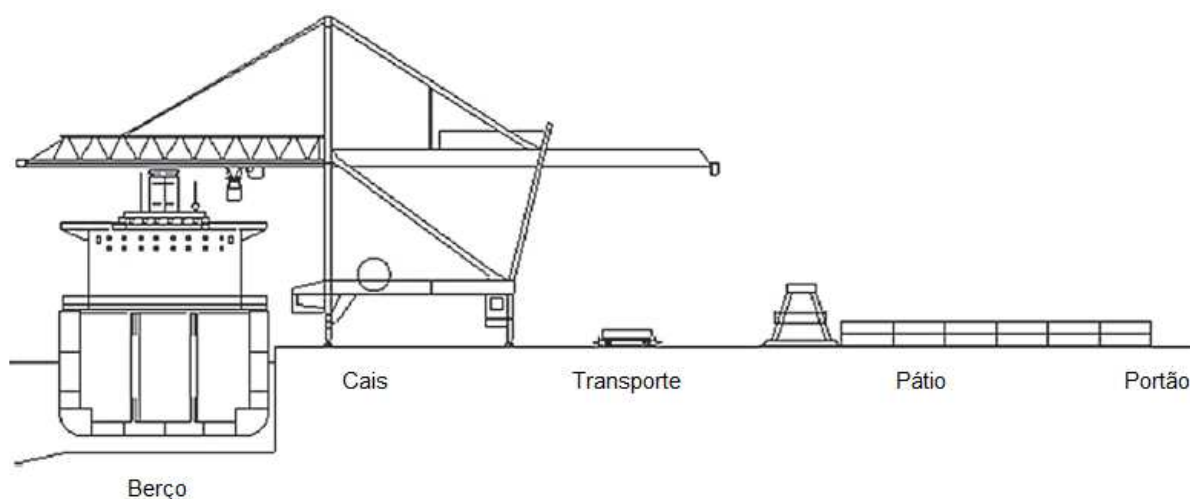


FIGURA 2: Principais áreas de um terminal de contêineres. Fonte: Adaptado de CARLO, H.J.; VIS, I.F.A.; ROODBERGEN, K.J. (2014).

Carlo e Roodbergen (2014) classificam o berço e as áreas de cais como áreas 'à beira-mar', enquanto as áreas do pátio e dos portões são consideradas áreas 'terrestres' e a área de transporte é a intersecção das áreas à beira-mar e terrestre.

Em um terminal, os contêineres podem ser diferenciados pelo seu destino ou tipo. Quanto ao tipo, um contêiner pode ser refrigerado, vazio, perigoso, fora de padrão entre outros. Tais contêineres normalmente possuem um local específico de armazenamento. Por exemplo, contêineres refrigerados geralmente são alocados próximos a tomadas, a fim de manter a temperatura requerida (AMBROSINO *et al.*, 2004). Contêineres perigosos transportam mercadorias perigosas e devem ser posicionados de acordo com um conjunto complexo de regras de separação.

Contêineres fora do padrão transportam cargas que excedem as dimensões internas dos contêineres normais e são posicionados em lugares específicos do navio ou do pátio (DELGADO *et al.*, 2010). Neste trabalho serão considerados apenas contêineres padronizados.

Quanto ao destino, um contêiner pode ser classificado como 'de exportação', 'de importação' ou 'de transbordo'. Kim e Park (2003) descrevem cada tipo de contêiner da seguinte forma:

Contêineres de exportação são contêineres que normalmente tem destino outros países e chegam ao porto através de um caminhão externo (isto é, um caminhão que não pertence ao terminal) dias antes da chegada de seu navio de destino.

Contêineres de importação chegam ao porto de navio, são descarregados no cais e armazenados no pátio a espera de um caminhão externo para buscá-lo.

Contêineres de transbordo são aqueles que foram desembarcados em um porto que não é seu destino final e também podem ser chamados de contêineres de remanejamento. Tais contêineres podem ser alocados no pátio de forma similar aos contêineres de exportação para serem posteriormente carregados no mesmo navio, ou em outro.

No pátio, muitas vezes, as pilhas são separadas em áreas de contêineres de importação, exportação, especiais e vazios (STEEKEN *et al.*, 2004). Isto é feito porque contêineres de importação chegam ao terminal em grandes quantidades e com horário conhecido, mas partem um por um em uma ordem imprevisível. Enquanto isso, contêineres de exportação partem em ordem e horário previsível, mas chegam ao terminal um por um e em ordem aleatória (CHEN e LU , 2012). Consequentemente, a forma com a qual cada tipo de contêiner é operado difere de acordo com seu tipo, segundo Chen e Lu (2012).

A figura 3 mostra resumidamente o fluxo dos contêineres em um terminal.

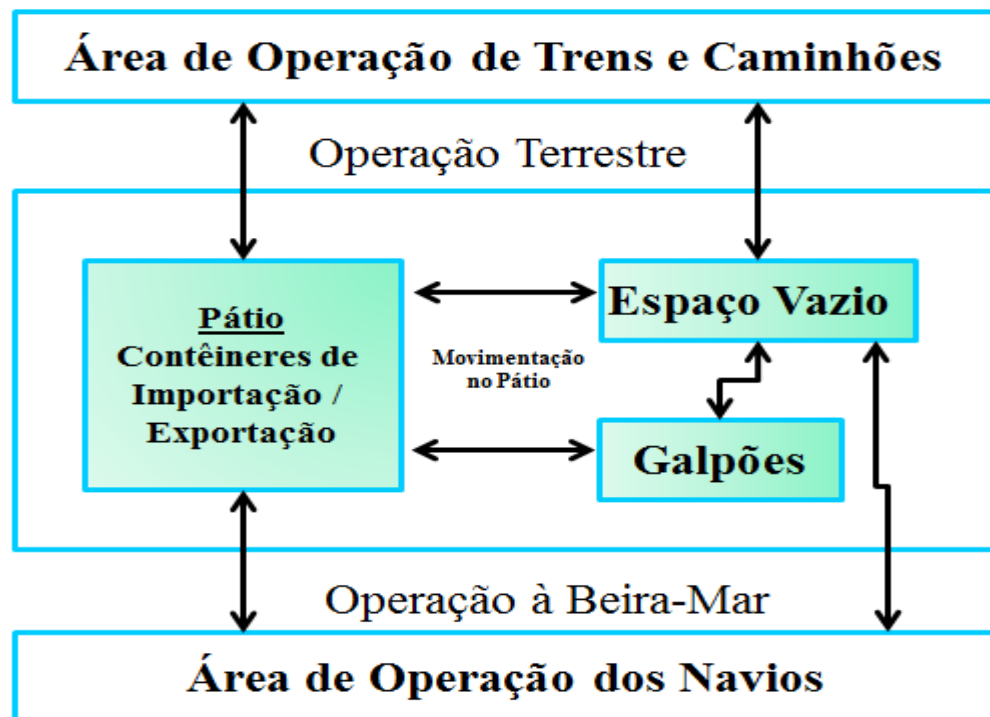


FIGURA 3: Áreas de Operação de um Terminal de Contêineres e Fluxo de Transportes.

Fonte: Adaptado de STEENKEN *et al.* (2004).

Após chegar ao porto, os navios são designados a um berço, onde é dado início ao processo de descarregamento dos contêineres de importação e transbordo. Esses contêineres são retirados dos navios por meio de guindastes específicos, que os colocam em caminhões internos (caminhões que pertencem ao terminal) e os levam ao pátio, onde são retirados dos caminhões e colocados em pilhas, utilizando-se dos guindastes do pátio. Depois de serem armazenados no pátio, estes contêineres ficam à espera de um caminhão externo ou um trem buscá-los.

No sentido inverso, contêineres de importação chegam ao porto por meio de caminhões externos ou trens e são armazenados em pilhas no pátio para posterior embarque em um navio.

Conhecido o fluxo de contêineres dentro do terminal portuário, será discutido a seguir, na seção 1.4, os principais entraves enfrentados pelo setor.

1.4 Entraves do Setor

Nesta seção serão abordados os principais problemas que existem em um terminal de contêineres que são tratados pela literatura.

De acordo com Guan *et al.*, (2013): Steenken *et al.*, (2004) e Stahlbock e Voss, (2008), as operações de um terminal de contêineres podem ser divididas em 5 problemas principais:

- (1) *Alocação de Berços*: Programação da atribuição de berços para o atendimento de navios;
- (2) *Planejamento do Plano de Estiva*: Carregamento e descarregamento de contêineres entre um navio e um berço do porto por meio de um guindaste do cais;
- (3) *Alocação de Guindastes*: Atribuição de guindastes portuários (Quay Cranes) para cada seção do navio;
- (4) *Transporte do Cais*: Transporte dos contêineres de cada berço para o pátio do porto por meio de máquinas apropriadas;
- (5) *Movimentação no pátio*: Carregamento e descarregamento de contêineres no pátio do porto (embarque nos navios ou o despacho para caminhões e trens).

O primeiro problema, de alocação de berços, pode ser melhor visualizado com a Figura 4.

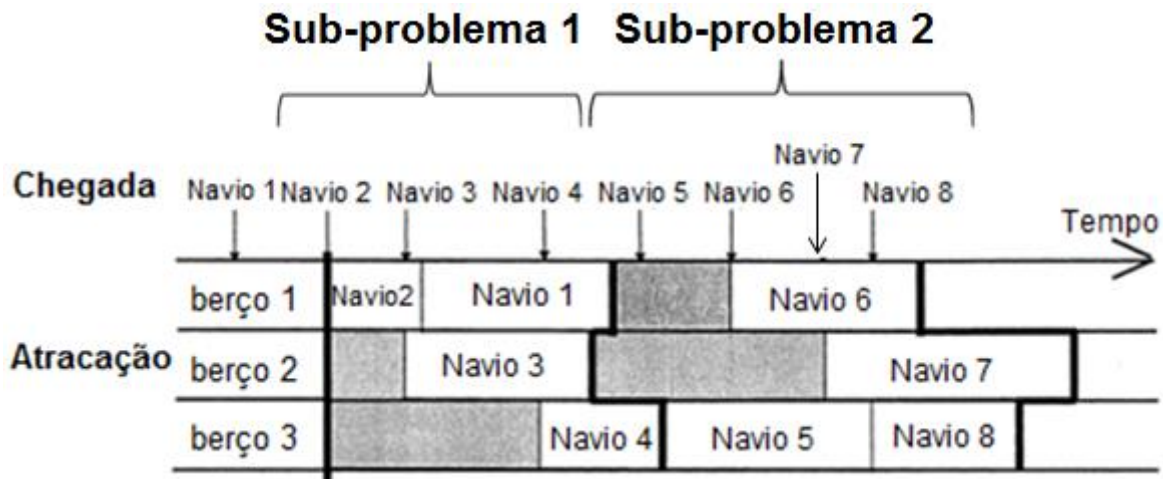


FIGURA 4: Programação da atribuição de três berços para atender oito navios. Fonte: Adaptado de NISHIMURA *et al.* (2001).

Na Figura 4 é possível verificar que o agendamento de navios para cada berço no tempo deve também contemplar aspectos referentes à distância de segurança (caso dos navios 6 e 5) e disponibilidade dos berços (caso dos navios 1, 3 e 4).

Segundo Mauri *et al.* (2010), a programação da atribuição de berços para o atendimento de navios envolve dois conjuntos de restrições. O primeiro conjunto de restrições se refere à escolha de onde o navio deve atracar, envolvendo questões relativas à profundidade da água, à distância máxima em relação ao local mais favorável ao longo do cais, e também ao tamanho dos navios. O segundo conjunto de restrições se refere a quando os navios deverão atracar e normalmente são expressas como janelas de tempo.

Existem ainda outros aspectos que devem ser levados em consideração no tempo de atracação do navio em um berço. Um primeiro aspecto consiste em considerar todo o maquinário necessário para carregar ou descarregar os contêineres de um navio para o pátio do porto ou vice-versa. O número de guindastes no cais que estão disponíveis aos navios que chegam é uma decisão que afeta o tempo de atendimento dos mesmos e é normalmente feita antes da decisão de alocação de berços (MAURI *et al.*, 2010).

Neste caso, devem ser abarcados os problemas (3) e (4), que são a atribuição de guindastes portuários para cada seção do navio, e o transporte dos contêineres de cada berço para o pátio do porto por meio de máquinas apropriadas, respectivamente. Os elementos, ou seja, as máquinas utilizadas, nestes problemas podem ser melhor visualizados na Figura 5.

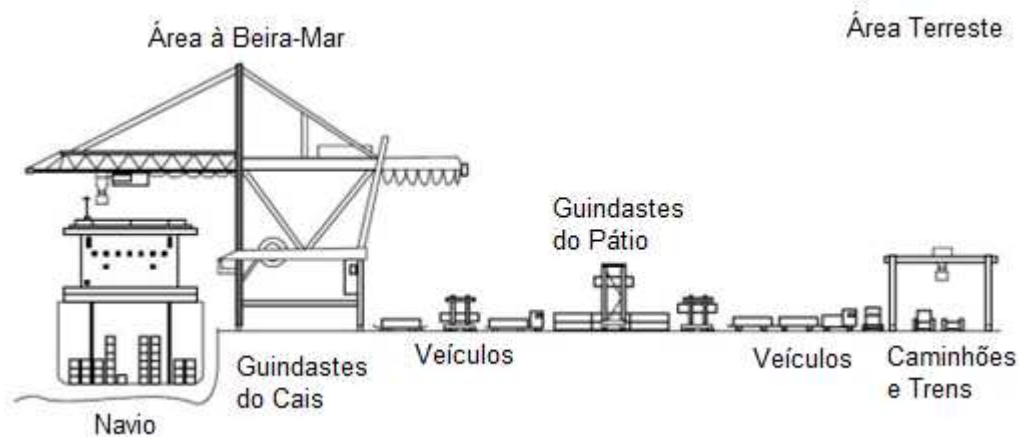


FIGURA 5: Representação esquemática dos elementos de um terminal portuário de contêineres. Fonte: Adaptado de STEENKEN *et al.* (2004).

Outro aspecto importante para a movimentação de cargas em um porto é a resolução do problema (2), isto é, a determinação do plano de estiva.

O plano de estiva especifica a localização de cada contêiner no navio e também determina a sequência de carregamento e descarregamento dos mesmos. Seu principal objetivo é encontrar um arranjo que minimize o número total de remanejamentos de contêineres durante as operações de carregamento e descarregamento de um navio (DUBROVSKY, 2002). Otimizar o espaço disponível e evitar danos aos bens, ao navio, sua tripulação e seus equipamentos também podem ser objetivos do plano de estiva (AMBROSINO *et al.*, 2004), e, conseqüentemente, a minimização do tempo de permanência do navio no berço ou a maximização da produtividade dos guindastes, como

em Sciomachen e Tanfani (2007). Para isso, são levadas em consideração restrições de estabilidade do navio, peso e destino dos contêineres, entre outras.

Para Sciomachen e Tanfani (2007, p. 1434):

“Formalmente, o problema de planejamento do plano de estiva consiste na determinação de como alocar um conjunto C de n contêineres de diferentes tipos em um conjunto S de m locais disponíveis em um navio-contêiner, levando em consideração algumas restrições estruturais e operacionais, relacionadas tanto aos contêineres, quanto ao navio, que são dados pelo tempo total necessário de estiva, que é o tempo necessário para o carregamento de todos os contêineres a bordo do navio mais o custo de remanejamentos.”

Ainda, segundo Monaco *et al.* (2014), o plano de estiva envolve dois decisores diferentes: os planejadores das companhias marítimas e os planejadores do terminal. Os primeiros tem uma visão completa tanto dos contêineres a serem carregados e descarregados em cada porto durante a sua viagem, quanto a estrutura celular do navio. Já os segundos, consideram apenas os contêineres a serem carregados naquele terminal em específico. Para os autores supracitados, os objetivos de cada planejador convergem. Para as companhias marítimas, os objetivos são maximizar a utilização do navio e minimizar o número de remanejamentos a bordo do navio, enquanto para o terminal, os objetivos são minimizar o tempo de permanência que o navio fica atracado no berço, assim como os custos operacionais do terminal.

A elaboração do plano de estiva está relacionada com a estrutura celular que o navio porta-contêineres possui tal como dado na Figura 6.

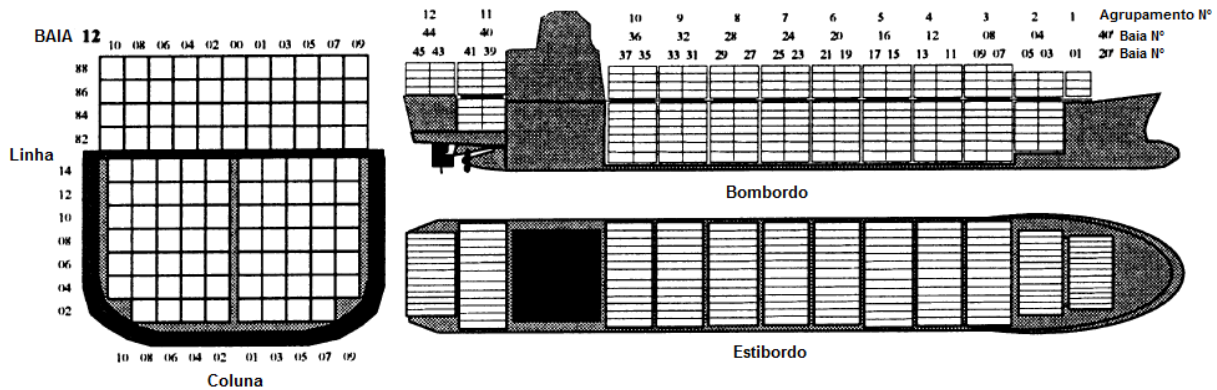


FIGURA 6: Estrutura celular do arranjo do armazenamento de um navio porta-contêiner.

Fonte: Adaptado de WILSON e ROACH, 2000.

A estrutura celular do navio é tal que só é possível acessar um contêiner por meio de uma pilha específica. Assim, para se retirar um contêiner dois casos podem ocorrer:

- (i) Não existem contêineres imediatamente acima ou se existem outros contêineres eles também devem ser desembarcados no porto atual.
- (ii) Existem contêineres imediatamente acima e estes só deveriam ser retirados em portos adiante. Eles serão movidos, para permitir a retirada do contêiner que deve ficar no porto atual, mas deverão ser devolvidos ao navio. O movimento de retirada e devolução de um contêiner para um navio é dito remanejamento.

A situação (ii) pode ocorrer com frequência e implicar em um maior tempo de atracação do navio no berço. Para evitar tal transtorno é necessário elaborar o plano de estiva de modo que a decisão em um porto não acarrete muitos movimentos de remanejamento nos próximos portos a serem visitados.

Como provado por Avriel e Penn (1996), o problema de minimização do número de remanejamentos pertence à classe de problemas NP-Completo, o que justifica o emprego de diversas heurísticas e meta-heurísticas tais como a “suspensory heuristic” desenvolvida por Avriel *et al.* (1998).

O problema de retirada de contêineres de uma pilha do pátio em uma ordem pré-definida, no qual são necessários remanejamentos, também foi provado ser NP-Completo por Caserta *et al.* (2012).

Diretamente relacionado ao plano de estiva, o problema (5), o carregamento e descarregamento de contêineres no pátio do porto, é melhor detalhado na Figura 7.

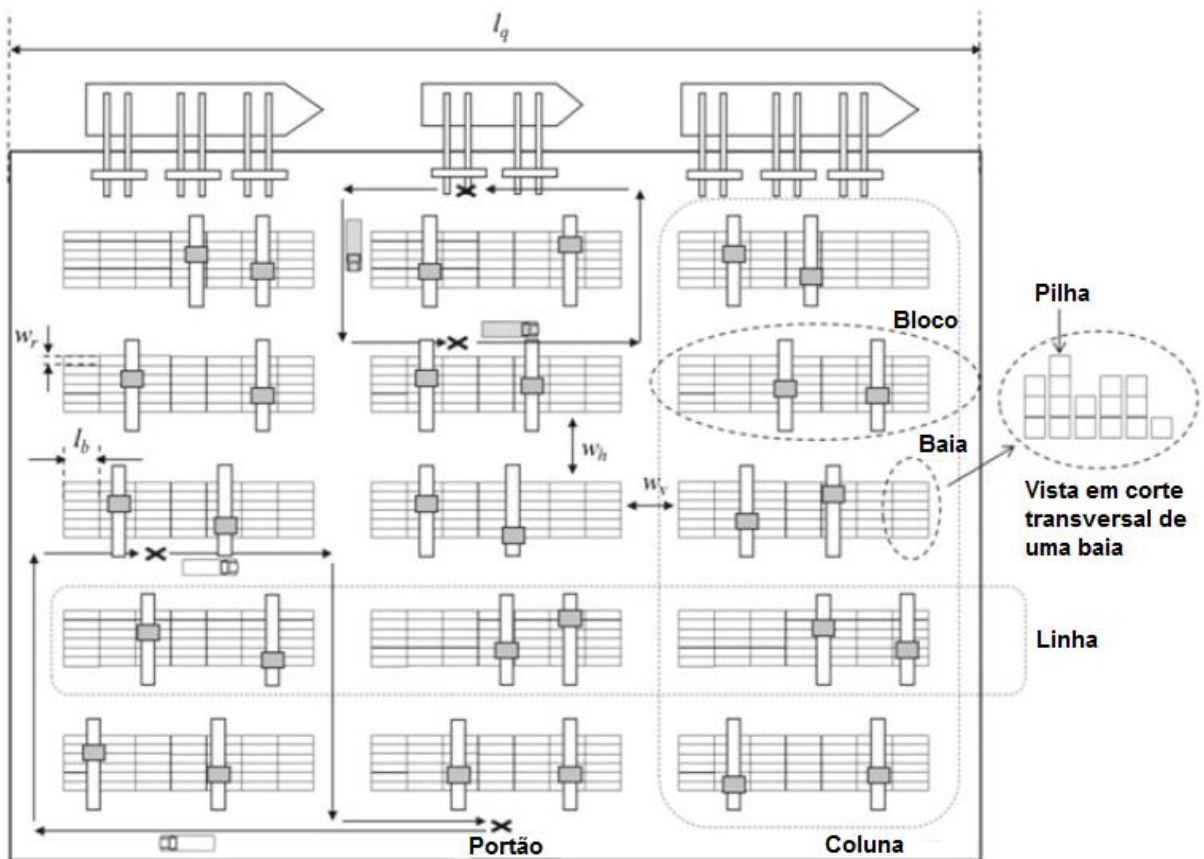


FIGURA 7: Disposição de contêineres em um pátio portuário. Fonte: Adaptado de LEE e KIM, 2013.

O pátio portuário é o local onde os contêineres ficam estocados temporariamente até que sejam embarcados em um navio, caminhão, ou trem.

O problema de carregamento e descarregamento de contêineres no pátio portuário pode aproveitar do mesmo conhecimento empregado para a resolução do problema do plano de estiva, pois há possíveis características similares ao obrigar a organização dos contêineres em pilhas, como por exemplo, a restrição de que um contêiner só pode ser acessado pelo topo. Lee e Kim (2013) fornecem uma avaliação do impacto que diferentes configurações do pátio de um porto podem exercer na eficiência das operações portuárias.

Ao se reduzir o número de movimentos desnecessários durante o manuseio de contêineres no pátio e no navio, um terminal portuário pode obter diversos benefícios, como a minimização do tempo de transferência de contêineres do pátio para o seu meio de transporte de destino (navio, caminhão ou trem) e do tempo de permanência de um navio no berço (PRESTON, P., KOZAN, E, 2001; HAN, Y. *et al.* 2008; BAZZAZI, M., *et al.* 2009), que é um dos principais indicadores de excelência de um terminal portuário.

Além disso, decisões sobre o armazenamento de contêineres no pátio também afetam a carga de trabalho dos guindastes do pátio, nas distâncias viajadas pelos caminhões internos e afetam a eficiência dos guindastes portuários (ZHANG *et al.*, 2003), ou seja, podem afetar a eficiência operacional do pátio e de todo o terminal.

Para JIANG *et al.* (2012), a produtividade geral do terminal não se beneficia muito com operações mais rápidas no cais e diminuição do tempo de permanência de um navio no berço sem estratégias eficazes de estocagem no pátio para gerenciar o armazenamento e recuperação de contêineres.

Para cada um dos cinco problemas existe uma quantidade considerável de metodologias e modelos como pode ser verificado em Stahlbock e Voss (2008). Neste projeto será considerada, em particular, a integração do problema (2) com o problema (5).

Nesse contexto, levando em consideração que os modelos matemáticos derivados para tais problemas assumem grande complexidade mesmo para instâncias de pequeno porte, como será demonstrado nas sessões 5.1 e 5.3, a proposta deste trabalho é aplicar um método de resolução alternativo ao problema de otimização conjunta do plano de estiva e movimentação de contêineres no pátio portuário. Esse método alternativo é composto por um Algoritmo Genético que emprega representação por regras, onde: as regras definem, a cada porto, como vai ocorrer o carregamento e o descarregamento, e o Algoritmo Genético define a sequência de regras que fornece o menor número de remanejamentos dos contêineres ao longo dos N portos.

1.5 Delineamento do Trabalho

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma: Na seção 2 são apresentados o objetivo geral e os objetivos secundários, em seguida, na seção 3 é feita a justificativa do tema. A revisão da bibliografia referente aos problemas estudados é feita na seção 4, que é dividida em três grandes grupos: na seção 4.1 discute-se somente o problema de movimentação de contêineres em pátios portuários, na seção 4.2 discute-se o problema de alocação de contêineres associado ao plano de estiva, e por fim, na seção 4.3 discute-se o problema do plano de estiva. A metodologia é apresentada na seção 5. Na seção 6 são demonstrados os cenários de testes e os resultados. Finalmente, na seção 7, é feita a conclusão e sugestões de trabalhos futuros.

2. Objetivos

Nesta seção são apresentados o objetivo principal e os objetivos secundários.

2.1 Objetivo Principal

O objetivo desta pesquisa é reduzir o número de movimentos desnecessários durante as operações de carregamento e descarregamento de contêineres para um dado plano de estiva e sua correspondente movimentação no pátio;

2.2 Objetivos Secundários

- Apresentar revisão bibliográfica contendo os diferentes modelos e métodos com os quais problema do plano de estiva e o problema de movimentação de cargas em pátios portuários são abordados e analisados pela literatura,
- Criar e validar regras operativas de movimentação de cargas no pátio e do Algoritmo Genético;
- Gerar automática e aleatoriamente instâncias para que o algoritmo seja testado.
- Validar o programa de simulação para a movimentação de cargas no pátio do porto em Matlab;
- Aplicar o Algoritmo Genético em conjunto com a representação por regras e avaliar os parâmetros que fornecem melhor

desempenho. Os parâmetros que serão avaliados são: função objetivo e a média do tempo computacional gasto para a obtenção das soluções.

3 Justificativa

O grande potencial do setor e a vital importância da ampliação da eficiência portuária para o comércio exterior motivou a adaptação de uma metodologia baseada em representação por regras (AZEVEDO et al., 2012), que teve sucesso para tratar o PCCTP (Problema de Carregamento de Contêineres em Terminais Portuários) em problemas de grande porte, para o problema de alocação de cargas no pátio do porto. Para tanto, todo o arcabouço teórico desenvolvido para o PCCTP será adaptado para o problema de alocação de cargas no pátio do porto.

A inovação desta pesquisa consiste na aplicação, pela primeira vez, de uma alternativa ao uso de modelos com variáveis binárias. Tais modelos apresentam sérias limitações para aplicação em problemas reais, como é o caso do PCCTP (AVRIEL et al., 1998).

A importância da modelagem e otimização conjunta dos dois problemas se dá no sentido de que qualquer melhoria obtida individualmente em um dos processos acaba sendo perdida se existir um gargalo na cadeia. Sem levar em consideração a existência de gargalos, ficou claro de que há consenso na literatura de que melhorias locais em alguma operação de um porto, como na alocação de contêineres no pátio, trazem mais melhorias nesse mesmo porto, como diminuição da carga de trabalho dos guindastes e nas distâncias viajadas pelos caminhões internos, e que, apesar disso, ainda existem grandes conflitos de interesses entre o porto e as companhias marítimas.

Adicionalmente, sabe-se que esforços para melhorar atividades que não são gargalos é apenas uma miragem, enquanto isso, melhorias em atividades gargalos são melhorias para o sistema global (GOLDRATT e COX, 1996). Entretanto a literatura não costuma estudar como a decisão tomada em um terminal afeta os terminais seguintes, ignorando assim possíveis consequências ao longo da cadeia, que neste caso, representa a viagem de um navio.

Em Azevedo *et al.* (2011) este ponto foi estudado considerando-se apenas o plano de estiva. Neste trabalho, propõem-se estudar o efeito da decisão tomada nos portos seguintes tanto no plano de estiva, quanto no pátio, abrangendo assim possíveis gargalos da cadeia.

Dessa forma, espera-se que os resultados representem a cadeia de forma mais realista do que os trabalhos existentes hoje.

A contribuição prática dar-se-á pela redução na quantidade de informações necessárias para se representar a tomada de decisões através de um modelo matemático. Agregando com isso, a possibilidade de inserção do conhecimento do tomador de decisões do terminal.

4 Revisão Bibliográfica

Neste tópico serão apresentados os diferentes modelos e métodos com os quais o problema de movimentação de cargas em pátios portuários e o problema do plano de estiva são abordados e analisados pela literatura.

Neste sentido, a revisão bibliográfica foi dividida em três grandes grupos de assuntos, o primeiro grupo, apresentado na seção 4.1, traz autores que estudaram o problema de movimentação de contêineres em pátios portuários. O segundo grupo traz estudos que relacionam o problema de movimentação de contêineres com o plano de estiva, e é apresentado na seção 4.2. Por fim, na seção 4.3 são tratados estudos sobre o plano de estiva.

4.1 O Problema de Movimentação de Contêineres em Pátios Portuários

A determinação da posição na qual um contêiner será estocado no pátio é tratada de diversas formas pela literatura, como pode ser observado em Carlo *et al.* (2014), entretanto, a revisão bibliográfica abordará trabalhos cujos principais problemas de decisão são a otimização do número de remanejamentos ou a atribuição de espaço de armazenamento para os contêineres.

Segundo Carlo *et al.* (2014), a principal diferença entre esses dois problemas de decisão é que na otimização do número de remanejamentos, de forma geral, é suposto que a ordem de retirada dos contêineres é conhecida, ou restrita a um bloco ou baía. E a atribuição de espaço depende da disponibilidade e da qualidade da informação de chegada e saída desses contêineres do pátio.

Ainda, os autores supracitados afirmam que a alocação de espaço pode ser determinada de duas formas: individual ou em grupo.

Na alocação de espaço por grupos de contêineres, é determinada a quantidade de espaço de cada bloco, ou pilha na qual certo grupo de contêineres, normalmente associados a um navio, será designado. Na alocação individual é determinada a localização exata de cada contêiner no pátio. A decisão é tomada assim que um contêiner chega ao porto.

Um dos primeiros trabalhos que trata do problema de movimentação de cargas em pátios portuários foca na alocação individual de contêineres de importação. De Castilho e Daganzo (1993), apresentam métodos para medir o número de movimentos esperados para remover um único contêiner de importação quando duas estratégias básicas são adotadas. A primeira estratégia, de segregação, organiza os contêineres de acordo com o tempo de chegada, ou seja, os que estão há mais tempo no pátio são colocados abaixo dos que estão a menos tempo, e não permite com que contêineres de diferentes navios sejam misturados. A segunda estratégia, de não segregação, tenta manter todas as pilhas do mesmo tamanho, sem levar em conta a hora de chegada, o tempo de permanência dos contêineres já armazenados no pátio e as informações disponíveis sobre os contêineres no momento da colocação. Segundo Saurí e Martín (2011), a estratégia de não segregação tende a misturar os contêineres de diferentes navios no pátio, e, conseqüentemente, pode gerar uma grande quantidade de movimentos extras. Enquanto a estratégia de segregação pode reduzir o número de movimentos desnecessários, alguns contêineres devem ser movidos previamente para armazenar os contêineres que estão por vir, chamados 'movimentos de limpeza' (*clearing moves*), resultando em movimentos extras e maior carga de trabalho. Além disso, para o desenvolvimento do modelo, os autores consideram que todos os navios sempre descarregam a mesma quantidade de contêineres e a probabilidade dos contêineres serem retirados do pátio é igual para todos os contêineres. Após compará-las, a estratégia de segregação apresentou um melhor desempenho quando n é pequeno (até três), onde n é o período de tempo no qual os contêineres de um navio são removidos do pátio a uma taxa aproximadamente constante. Para valores de n maiores ou iguais a 10,

a estratégia de não segregação reduz o esforço de manuseio de contêineres. Para valores intermediários de n (entre 3 e 10 ou 12), a melhor estratégia depende da altura média da pilha. Pilhas pequenas favorecem a estratégia de não segregação e a estratégia de segregação é melhor quando as pilhas são altas.

Saurí e Martín (2011) centram-se na organização dos contêineres de importação que são armazenados no pátio. Uma particularidade referente aos contêineres de importação relaciona-se à incerteza da ordem de retirada dos mesmos, uma vez que a hora de chegada dos caminhões externos ao terminal não é conhecida, o que faz com que os autores utilizem diferentes funções de distribuição de probabilidades para definir quando um contêiner será retirado. Levando em consideração as estratégias de segregação e de não segregação utilizadas por Castilho e Daganzo (1993), os autores desenvolvem três diferentes estratégias de empilhamento. Cada estratégia tem dois estágios: no primeiro estágio, os contêineres de diferentes navios são segregados (estratégia estática) no pátio; e, no segundo estágio, cada estratégia tem o seu próprio procedimento de misturar os contêineres de diferentes navios, tentando fazer o uso eficiente do espaço de armazenamento através da aplicação de uma combinação de estratégias estáticas e dinâmicas. A primeira estratégia consiste em começar a preencher o grupo de sub-blocos mais antigo do pátio, ou seja, empilhar novos contêineres em cima dos que já estão armazenados há mais tempo. A segunda estratégia mistura os contêineres que estão sendo armazenados com o grupo de contêineres com tempo mais curto no pátio. A terceira estratégia requer "movimentos de limpeza" e remanejamentos durante o planejamento operacional. Ela consiste na retirada de contêineres que estão no terminal há muito tempo com o objetivo de liberar espaço para cargas que estão prontas para serem descarregadas de um navio. Uma análise de sensibilidade dos remanejamentos, dependendo da taxa de chegada do navio e do tempo de permanência do contêiner no terminal, foi realizada para cada cenário dos testes numéricos, e chegou-se a conclusão de que a primeira e a segunda estratégias são recomendadas para terminais cuja altura de empilhamento seja de média a curta e o tempo de permanência do navio é longo. A terceira é recomendada para terminais com um pátio pequeno e

grande volume de tráfego (quando a capacidade de armazenamento deve aumentar devido a maior altura das pilhas de container).

Com o objetivo de minimizar o número esperado de remanejamentos durante a operação de carregamento do navio, Kim *et al.* (2000) consideram a configuração das pilhas de contêineres, a distribuição de peso dos mesmos no pátio, e o peso de um contêiner que está chegando ao porto para formular o problema como um modelo de programação dinâmica. Um procedimento de classificação para a tomada de decisões em tempo real é desenvolvido para a obtenção de uma árvore de decisões, gerada através do conjunto 'solução ideal' da programação dinâmica.

Entretanto, usando um contraexemplo, Zhang *et al.* (2010) aponta um erro em Kim *et al.* (2000). É provado que o modelo de programação dinâmica não é equivalente ao modelo original. Em seguida, o modelo correto é apresentado, e por fim os autores concluem que feitas as correções na derivação do modelo de transformação, o artigo original é válido.

Preston e Kozan (2001), com um objetivo diferente, o de minimizar o tempo de permanência dos navios-contêineres no porto, utilizam uma abordagem baseada em Algoritmo Genético para determinar a estratégia ótima de armazenamento para as várias programações de manipulação de contêineres (aleatório, FIFO ou LIFO) no pátio. O foco dos autores é nos contêineres que estão aguardando exportação. Um modelo de programação inteira mista é formulado. Experimentos computacionais mostram que o tipo de estratégia de armazenamentos no pátio não tem efeito sobre o tempo de transferência dos contêineres do pátio para o berço quando se usa um bom layout de armazenamento. Além disso, os resultados mostraram que diminuir o número de máquinas atribuídas a um berço resultou em um aumento exponencial no tempo de transferência, enquanto mudanças no percentual utilizado da capacidade da área de armazenamento fornecem uma mudança linear no tempo de transferência na faixa de 10-50%.

Kim e Park (2003) também focam em contêineres de exportação e mostram um método dinâmico de alocação de espaço, a fim de utilizar o espaço de

armazenamento do pátio de forma eficiente e consequentemente aumentar a eficiência das operações de carregamento dos contêineres no navio. Os autores discutem o problema de alocação de espaço em seu primeiro estágio, ou seja, determinam a localização das pilhas nas quais os contêineres vão ficar no pátio. Um modelo básico de programação inteira mista é formulado. Experimentos computacionais comparam dois algoritmos heurísticos: uma regra de decisão baseada no método de ‘menos duração da estadia’ e a uma técnica de otimização de sub-gradiente, que se baseia na versão relaxada do modelo original. Os resultados obtidos são próximos da solução ótima, porém a regra de decisão é muito mais rápida.

Chen e Lu (2012) abordam o problema de alocação de espaço de armazenamento para contêineres de exportação. O problema é tratado de forma hierárquica, ou seja, é decomposto em duas etapas. Na primeira etapa, as baias no pátio e a quantidade de espaço em cada baia que será designada para contêineres destinados a diferentes navios em cada período de planejamento são determinadas. A localização da posição exata em que cada contêiner será armazenado é definida na segunda etapa. Na primeira fase, o problema é resolvido por um modelo de programação inteira mista, enquanto que na segunda fase um algoritmo de sequência híbrida de empilhamento resolve o problema. O algoritmo determina a posição de armazenamento considerando os pesos dos contêineres, formando grupos de contêineres com pesos semelhantes. Os objetivos dos autores são: O uso eficiente de espaço de armazenamento no pátio, transporte eficiente de contêineres de exportação do pátio para o berço e minimização das operações de remanejamento. Para resolver o problema, é assumido que: existem recursos suficientes para lidar com os contêineres de exportação no porto; a alocação de berços aos navios é conhecida; os contêineres são todos do mesmo tamanho; contêineres de exportação não se misturam com contêineres de importação em um bloco no pátio; e contêineres de exportação com diferentes portos de destinos não são misturados em uma baia no pátio. Os resultados experimentais mostram que a abordagem proposta é eficaz e eficiente para resolver o problema de alocação de espaço de armazenamento para contêineres de exportação.

Zhang *et al.* (2003) por meio do método de aproximação de horizonte rolante, estuda o problema de alocação de espaço de armazenamento em um pátio de um terminal, considerando todos os recursos disponíveis. Tal metodologia consiste em fazer, a cada etapa do horizonte, um planejamento para um horizonte fixo no futuro imediato e executar o plano de acordo com o próximo ponto de planejamento. Os autores trabalham com contêineres de trânsito, de importação e de exportação. O objetivo é diminuir o tempo de atracação de um navio no cais e aumentar o rendimento dos guindastes portuários por meio da minimização do custo total de movimentação dos contêineres. Cada horizonte de planejamento do problema é decomposto em dois níveis, e cada nível é formulado como um modelo de programação matemática. A carga de trabalho entre os blocos é equilibrada no primeiro nível através da definição do número total de contêineres a serem colocados em cada bloco, em cada período de tempo no horizonte. O número total de contêineres associados a cada navio que constituem o número total em cada bloco em cada período é resultado do segundo passo, que minimiza a distância total percorrida entre os blocos e os navios. Experimentos numéricos mostram redução significativa dos desequilíbrios na carga de trabalho no pátio, evitando assim possíveis gargalos.

Bazzazi *et al.* (2009) apresenta um Algoritmo Genético para resolver o problema de alocação de espaço de armazenamento em um pátio portuário. O objetivo é determinar o número de contêineres de importação de diferentes tipos (refrigerado, vazio ou padronizado) de cada navio para cada bloco do pátio. São considerados tanto os contêineres que ainda aguardam o descarregamento no navio, quanto os que já estão no pátio. Assim, como Zhang *et al.* (2003), os autores utilizam a metodologia de aproximação de horizonte rolante, porém consideram apenas o primeiro nível de planejamento para a formulação do modelo de programação matemática.

Murty *et al.* (2005) desenvolveu um procedimento de despacho online para a atribuição de contêineres para os blocos de armazenamento. O objetivo é minimizar o tempo de atracação de navios, os recursos necessários para lidar com a carga de trabalho, o tempo de espera dos caminhões dos clientes, o congestionamento

nas estradas, nos blocos de armazenamento e docas dentro do terminal, e fazer o melhor uso do espaço de armazenamento.

Lee *et al.* (2006) estuda o problema de alocação de espaço no pátio considerando as operações de carregamento e descarregamento de contêineres de um navio. Seu objetivo principal é reduzir o fluxo de contêineres entre os navios e o pátio de forma que o tráfego e os remanejamentos sejam minimizados. Para reduzir os remanejamentos, uma estratégia de consignação é utilizada. Esta estratégia consiste em armazenar juntos contêineres com o mesmo destino, conteúdo e tempo de carregamento em alguma área de armazenamento específica. Para reduzir o tráfego, é formulado um modelo de programação inteira mista com o fim de determinar o número mínimo de guindastes do pátio e a localização onde os contêineres descarregados devem ser estocados. Para resolver o modelo, são utilizados dois algoritmos: o método sequencial e o método de geração de colunas. Experimentos numéricos e os resultados computacionais mostraram que tais métodos podem chegar a resultados próximos ao ideal ou ótimo, porém em cenários de alta complexidade o método sequencial não funciona bem. Além disso, embora o problema principal relaxado possa ser resolvido facilmente, o resultado obtido não melhora a qualidade da solução já obtida com o modelo de programação inteira mista, ou seja, os algoritmos heurísticos não garantiram uma solução ótima.

Han *et al.* (2008) sugere uma ferramenta que é capaz de fornecer uma forma holística e sistemática para resolver o problema de armazenamento de contêineres no pátio que leva em consideração das necessidades reais do operador portuário, com o objetivo de minimizar os congestionamentos no terminal. O trabalho é uma extensão de Lee *et al.* (2006), porém, determina as localizações para armazenar os contêineres de exportação e de transbordo. O problema é formulado como um modelo de programação inteira mista e resolvido com um método de melhoria iterativa. Um algoritmo heurístico gera o modelo inicial do pátio, que é então melhorado iterativamente através do algoritmo de melhoria baseado na informação obtida a partir da solução ótima ou satisfatória do problema de alocação de espaço no pátio que é resolvido por um método sequencial.

Experimentos computacionais mostraram que o método gera bons resultados em tempo computacional razoável.

Jiang *et al.* (2012), assim como Lee *et al.* (2006) e Han *et al.* (2008), considera que as operações de carregamento e descarregamento no navio devem ser consideradas juntamente com o problema de alocação de espaço e movimentação de cargas no pátio portuário. Porém, Jiang *et al.* (2012) critica a estratégia de consignação “estática” utilizada pelos autores. Nessa estratégia, a atribuição de um contêiner para um sub-bloco não muda de um turno para outro, é designado apenas para um navio durante todo o horizonte de planejamento e possui uma capacidade de espaço fixa. Isto significa que a quantidade máxima de espaço necessário no momento de pico será atribuída exclusivamente a cada navio durante todo o horizonte de planejamento, gerando subutilização do espaço. Sendo assim, é proposto um conceito de modelo de compartilhamento de espaço do pátio, onde as áreas de armazenamento não serão mais reservadas inteiramente para um navio durante todo o horizonte de planejamento. Em vez disso, é proposto que parte do espaço seja compartilhado por contêineres dos sub-blocos vizinhos, em diferentes períodos. Para isso, é desenvolvido um framework que integra a reserva de espaço e a atribuição de carga de trabalho. Neste framework, para determinar o compartilhamento de espaço no pátio, duas abordagens diferentes são propostas, o método “compartilhamento de espaço fixo” e o método “compartilhamento de espaço variável”. Experimentos numéricos mostram que o framework é capaz de fornecer soluções para movimentação de contêineres com muito menos espaço de armazenamento e garante o mínimo de utilização dos guindastes do pátio, quando comparado com a estratégia “estática”. Entretanto, uma limitação do estudo é a não consideração das incertezas no nível operacional, uma vez que o problema é considerado apenas no nível de planejamento ao fixar os espaços de compartilhamento.

Enquanto diversos estudos assumem que a quantidade de espaço reservado para alocar contêineres no pátio é dada, Woo e Kim (2011) propõem um método para determinar como alocar espaço no pátio para que sejam armazenados no pátio grupos de contêineres de exportação com os mesmos atributos. Cada grupo é identificado pelo porto de destino e pelo tamanho dos contêineres. Seguindo princípios

de carregamento eficiente, são propostas quatro regras para determinar os tamanhos ideais dos espaços reservados:

- Regra do espaço fixo (*fixed space rule* - FSR): um número fixo de pilhas é reservado para cada grupo de contêineres.
- Regra do período fixo (*fixed period rule* - FPR): a duração do período que será abrangido por uma reserva é fixo. Pilhas vazias são reservadas para receber contêineres que chegarão durante o período fixado.
- Regra da taxa de chegada (*arrival rate rule* - ARR): pilhas vazias são reservadas na proporção das taxas de chegada de contêineres dos vários grupos. Assim, o número de pilhas reservadas para um grupo é determinado multiplicando-se a taxa de chegada média de contêineres para o grupo correspondente por um valor constante, α .
- Raiz quadrada da regra da taxa de chegada (*square root of arrival rate rule* - SRAR): pilhas vazias são reservadas na proporção da raiz quadrada das taxas de chegada de contêineres dos respectivos grupos. Assim, o número de pilhas a serem reservadas para um grupo é determinada multiplicando-se a raiz quadrada da taxa de chegada média de contêineres para o grupo correspondente por um valor constante, β .

O impacto no tamanho dos espaços reservados na eficiência das operações de carregamento do navio é analisado através de simulações utilizando dados reais do porto de Pusan, Coreia do Sul. A raiz quadrada da regra da taxa de chegada (SRAR) é selecionada para determinar o tamanho dos espaços, por ser a regra que retornou o menor número de blocos dedicados a cada grupo de contêineres, que autores afirmam ser diretamente proporcional ao tempo de carregamento de um navio.

Trabalhando também com grupos de contêineres, Jeong *et al.* (2012) definem um método para decidir quantos contêineres de importação serão alocados em cada bloco do pátio. Os autores integram o problema de alocação de contêineres no pátio com o problema de programação e planejamento dos guindastes portuários, considerando que os recursos do pátio são compartilhados por muitas operações dos guindastes para múltiplos navios. Uma regra heurística é introduzida para determinar o

número de contêineres que serão alocados em cada bloco. O principal objetivo da regra heurística é alocar espaços para os blocos de forma a equilibrar a carga de trabalho entre todos os blocos e, simultaneamente, considerar a distância viajada pelos caminhões internos entre os blocos e o berço de cada navio correspondente. Através de resultados de simulações, o método mostrou-se eficaz ao reduzir o tempo de permanência do navio atracado no porto e no tempo de permanência dos caminhões externos.

O problema de alocação de espaço no pátio para grupos de contêineres é estudado por Yang e Kim (2006). Os autores misturam grupos de contêineres “estáticos”, onde os horários de chegada e de saída são conhecidos com antecedência, com grupos de contêineres “dinâmicos”, onde os horários de saída e de chegada tornam-se conhecidos apenas um pouco antes de sua chegada ao pátio. O objetivo dos autores é determinar o local de armazenamento de forma que o número de remanejamentos durante a operação de retirada de contêineres seja minimizado. Para o problema estático, um modelo matemático de programação inteira e um modelo de programação dinâmica são propostos e um algoritmo genético é sugerido para resolver o problema. Para o problema dinâmico, três regras heurísticas foram propostas e seus desempenhos foram comparados. Experimentos numéricos mostraram que a *regra dinâmica de desperdício mínimo de espaço*, que atribui um índice de desperdício de espaço para os blocos com base no desperdício esperado de espaço e no tempo de armazenamento, superou as outras duas heurísticas no menor número de remanejamentos.

Borgman, Van Asperen, e Dekker (2010) usam simulação e abordagens analíticas para comparar o desempenho de diferentes regras de estocagem. O objetivo principal é armazenar um contêiner que chega e parte do cais o mais próximo possível ponto de transferência, minimizando o tempo total de viagem do guindaste de empilhamento quando o contêiner entra e sai do seu local de estocagem. Um segundo objetivo dos autores é estudar o tempo necessário para estocar um contêiner em relação ao número de remanejamentos necessários. As regras testadas pelos autores são:

- Nivelamento: Esta regra escolhe primeiramente, e de forma aleatória, as posições que são bases. Em seguida, busca por espaços vazios por linha, começando do ponto de transferência até o cais.
- Estocagem Aleatória: O novo contêiner é colocado numa posição disponível escolhida aleatoriamente, sendo que todas as posições disponíveis tem a mesma chance de serem escolhidas.

É testada a sensibilidade das regras em relação às informações disponíveis, como, por exemplo, os horários de partida ou tempo de permanência de cada contêiner. Experimentos são executados por um período de 15 semanas e avaliados em termos de tempo de saída, que é o tempo (em horas) necessário para remover um contêiner da pilha e tê-lo pronto para o seu transporte (caminhão, trem ou navio); carga de trabalho, ou porcentagem de tempo que os guindastes de empilhamentos estão ocupados; número de remanejamentos; percentual médio de posições no solo (base) que estão em uso. Verifica-se que para os grandes blocos de contêineres, uma estratégia de agrupamento tem uma performance semelhante a ter as informações de tempo de partida por contêiner. Conclui-se também que é mais vantajoso em termos de tempo, empilhar os contêineres mais próximos aos pontos de saída e aceitar mais remanejamentos, do que empilhar mais longe e minimizar os remanejamentos.

4.2 O Problema de Movimentação de Contêineres em Pátios Portuários Associado ao Plano de Estiva

Similarmente ao problema de determinação da posição na qual um contêiner será alocado no pátio, existe também uma literatura, não muito extensa, acerca da retirada de um contêiner do pátio para embarque nos navios. A seguir são apresentados alguns desses trabalhos.

Kang, Ryu e Kim (2006), com o objetivo de minimizar o número de remanejamentos na retirada de contêineres do pátio para embarque no navio, propõem um método para obter uma boa estratégia de empilhamento de grupos de contêineres de exportação, com base nas informações de peso. A razão para o empilhamento ser por grupos de peso é para que os contêineres mais pesados possam ser embarcar antes dos mais leves, mantendo o equilíbrio do navio. No entanto, as informações de peso disponível no momento da chegada do contêiner no porto são apenas uma estimativa, o que faz com que contêineres pertencentes a diferentes grupos de peso sejam misturados numa mesma pilha do pátio. Logo, considerando as incertezas nas informações de peso e algumas restrições de ordenação, é derivada uma fórmula para estimar o número de remanejamentos. Uma estratégia de empilhamento com base em Simulated Annealing é proposta. O Simulated Annealing, começa a partir de uma solução inicial gerada de forma aleatória, cuja qualidade é medida por uma função objetivo pré-definida, e a solução inicial é definida como a solução atual. Ou seja, neste caso, a simulação começa gerando uma sequência aleatória de contêineres de acordo com a distribuição de probabilidade dos grupos de peso estimados. Em seguida, uma solução candidata (ou um vizinho) é gerada através de uma ligeira modificação da solução atual, e a solução candidata é avaliada, em termos de número de remanejamentos necessários para retirar todos os contêineres do pátio, e comparada com a solução atual para decidir se a busca deve ou não se mover para a solução candidata. O fato de o método permitir a aceitação de soluções de pior qualidade é importante porque esses movimentos temporários permitem que o método pesquise todo o espaço de soluções, com o objetivo de evitar ótimos locais. Depois que todos os contêineres são empilhados, o número esperado de remanejamentos necessários é calculado. Após ter repetido um número suficiente de simulações, os resultados são medidos. Simulações mostraram que as estratégias adotadas reduzem de forma mais eficaz o número de remanejamentos se comparadas às estratégias tradicionais de empilhamento com base em grupos de contêineres com mesmo peso. Além disso, experimentos adicionais mostraram que se pode obter uma maior melhoria com o aumento da precisão da classificação de peso através da aplicação de técnicas de aprendizagem de máquina.

Preocupado com o plano de estiva e seu plano de carregamento associado, Imai *et al.* (2006) procuram satisfazer restrições de estabilidade do navio, assim como a distância entre o centro de gravidade e outras condições. Outra preocupação é o número de remanejamentos que ocorrem quando contêineres específicos são retirados das pilhas pátio. Os autores tentam minimizar o número de movimentos desnecessários, focando apenas nos remanejamentos referentes às operações de carregamento do navio. O problema é formulado como um modelo de programação inteira multi-objetivo. A fim de obter um conjunto de soluções não inferiores, é empregue o método de ponderação. Neste método o problema é definido como um modelo de programação matemática com um único objetivo, que incorpora múltiplos objetivos. Assim, para resolver o modelo, os autores desenvolvem um algoritmo heurístico baseado em algoritmo genético. Uma grande variedade de experimentos numéricos demonstrou que as soluções por esta formulação são úteis e aplicáveis na prática quando não ocorrem remanejamentos no processo de descarregamento.

Zeng e Yang (2009) abordam os problemas de carregamento e descarregamento de contêineres, tanto no pátio quanto no navio, através de um método de otimização por simulação. Os autores propõem um modelo que envolve o problema de determinar a sequência de carregamento ou descarregamento e programação e despacho de vários tipos de equipamentos (guindastes e caminhões) simultaneamente. O objetivo do método é sequenciar as operações de carregamento e descarregamento, combinando a análise de simulação e um mecanismo de tomada de decisão ótima. Os procedimentos são: inicialização da sequência dos contêineres de acordo com certa regra de retirada, e em seguida, melhoramento da sequência através de algoritmo genético, que introduz a nova sequência no modelo de simulação. O modelo de simulação avalia as soluções geradas pelo módulo de otimização. Enquanto isso, um modelo substituto baseado em redes neurais é projetado para prever a função objetivo e filtrar soluções potencialmente ruins, assim, para diminuir os tempos de execução do modelo de simulação. Testes numéricos mostram que o método de otimização por simulação pode resolver o problema de forma eficiente. E o modelo de substituição pode melhorar a eficiência de cálculo de otimização de simulação.

Lee e Lee (2010) apresentam uma heurística de três fases para resolver o problema de um guindaste retirar todos os contêineres de um determinado pátio de acordo com uma determinada ordem. O objetivo de otimização é minimizar o número de movimentos dos contêineres durante a retirada, bem como tempo de trabalho do guindaste. Os resultados dos testes números mostraram que a heurística foi capaz de resolver instâncias com mais de 700 contêineres em um pouco mais de dois minutos.

Caserta *et al.* (2012) descrevem e analisam o problema de realocação de blocos (BRP – block relocation problem), no qual o objetivo, dada uma sequência de retirada dos contêineres do pátio, é encontrar um plano de carregamento do navio que minimize o número de remanejamentos necessários para recuperar os blocos na ordem especificada. Para isso, os autores propõem duas formulações binário-inteiras diferentes e uma regra heurística.

4.3 O Problema do Plano de Estiva

O problema do plano de estiva vem sendo estudado desde a década de 70 (WILSON *et al.*, 2001 e ZENG *et al.*, 2010). Em 2000, Avriel, Penn e Shpirer provaram que o problema do planejamento do plano de estiva pertence à classe de problemas NP-Completo mostrando que o mesmo pode ser transformado no problema de coloração de grafos circulares. Por esta razão, devido à complexidade computacional deste problema de otimização, métodos heurísticos são predominantemente utilizados pela literatura. Segundo Zeng *et al.* (2010) a maior parte refere-se ao carregamento do navio, e Wilson *et al.* (2001) dividem os métodos desenvolvidos para resolver o problema em cinco grandes áreas, são elas: simulação baseada em probabilidade, heurísticas, modelação matemática, sistemas especialistas baseados em regras e sistemas de suporte à decisão. A seguir são apresentados alguns destes trabalhos.

Avriel *et al.* (1998) lidam com o planejamento do plano de estiva, com o objetivo de minimizar o número de remanejamentos, sem levar em consideração a

estabilidade do navio e várias outras restrições. Primeiramente, o problema é formulado como um problema de programação linear binária que traz a solução para uma única baía de um navio que percorre um dado número de portos, assumindo que o número de contêineres que serão embarcados, junto com a sua origem e portos de destino, são conhecidos antecipadamente. No entanto, uma vez que o problema é provado ser NP-Completo (AVRIEL, PENN e SHPIRER, 2000), para encontrar a solução é utilizada uma heurística chamada de "*Suspensory Heuristic*", que atribui de forma dinâmica, espaços para alocar os contêineres. É utilizada pela heurística a regra de decisão 'Remanejamento Míope' (*Myopic Shifiting Rule*), que decide sobre remanejos acerca de uma única coluna. Para selecionar a coluna que deve sofrer um remanejamento, são utilizados dois métodos, o primeiro é uma função (*Function Rule*) que seleciona preferencialmente colunas relativamente vazias, e o segundo, o 'Remanejamento Necessário' (*Necessary Shift Rule*), é utilizado caso o movimento seja inevitável em mais de uma coluna e a coluna com menor índice esperado de remanejamentos em portos futuros deva ser selecionada. Finalmente, a regra do 'Remanejamento Míope' é utilizada para decidir se os remanejamentos devem ser feitos no porto atual ou em portos futuros. A "*Suspensory Heuristic*" foi testada em um grande número de matrizes de transporte de três tipos (baseada em período médio de tempo de um contêiner tem que ficar a bordo: longa distância, curta distância e mista), e o efeito do tipo de matriz de transporte, o número de portos, de colunas e de linhas foram analisados em relação ao número total de remanejos. Os autores resolveram um problema com 170 colunas, 10 linhas e 30 portos em 30 segundos com a "*Suspensory Heuristic*".

Wilson, Roach e Ware, (2001), esboçam um sistema para gerar soluções para o problema de planejamento do plano de estiva. O método utilizado neste sistema define progressivamente o arranjo de contêineres dentro do espaço do navio até que cada contêiner seja individualmente alocado em uma posição, ou seja, o problema é dividido em dois subproblemas: um problema de colocação generalizada e um problema de colocação especializada. No processo de planejamento estratégico os contêineres generalizados são designados para um bloco de espaço e agrupados juntos. A divisão do navio em blocos neste primeiro subproblema é ilustrada na figura 8, a seguir.

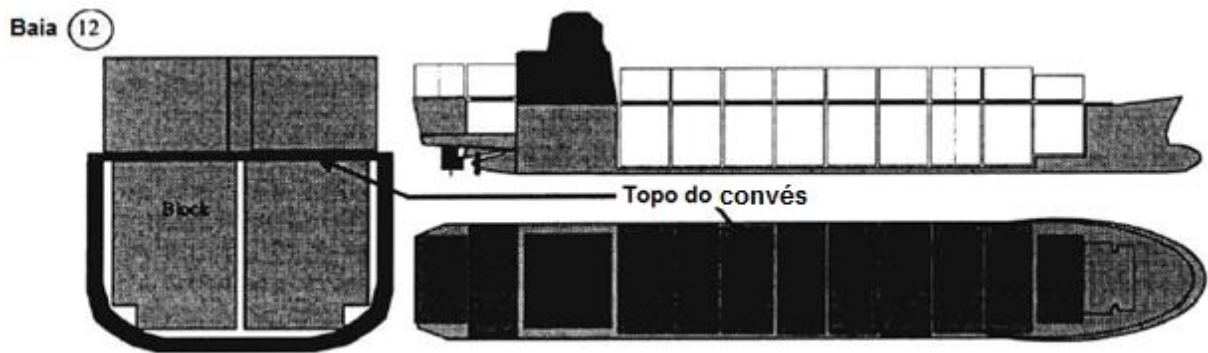


FIGURA 8: Abstração de um navio porta-contêiner dividido em blocos de espaço. Fonte: Adaptado de WILSON, ROACH e WARE (2001)

Os objetivos dessa fase são minimizar o espaço ocupado para cada destino, o número de remanejamentos e de blocos ocupados por contêineres de cada porto de destino, e maximizar o número de guindastes em operação em todos os portos. Para a resolução desta fase, os autores utilizam o método *branch and bound*, que é uma técnica de solução exata para problemas de programação binária e inteira que usa uma estratégia de divisão e conquista, isto é, o problema é dividido em subproblemas menores que podem ser descartados de acordo com os valores de limites inferiores e superiores, até que n soluções sejam encontradas e d portos sejam processados. No processo de planejamento tático, os contêineres são individualmente designados para espaços específicos dentro dos blocos nos quais foram alocados anteriormente, conforme ilustrado na figura 9.

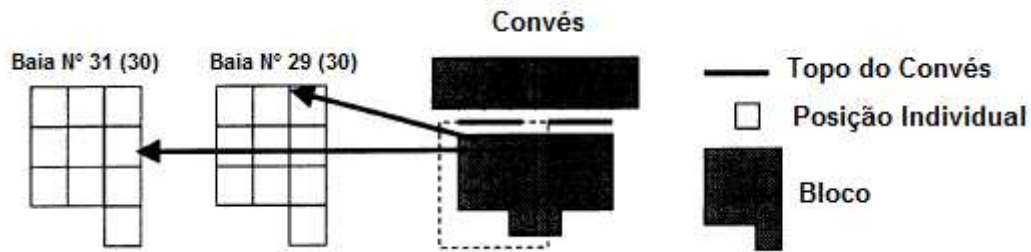


FIGURA 9: Relação entre os blocos e os espaços individuais. Fonte: Adaptado de WILSON, ROACH e WARE (2001).

Reduzindo o problema à alocação de contêineres específicos em ‘partes’ do navio, os objetivos desta fase são: minimizar os remanejamentos e a mistura de contêineres com portos de destino diferentes, e empilhar os contêineres de forma que os mais pesados fiquem abaixo dos mais leves. Para resolução desta fase é utilizada a busca tabu, método que pode ser aproximadamente resumido como um procedimento de pesquisa iterativa que, a partir de uma solução viável inicial, progressivamente melhorado através da aplicação de uma série de modificações ou movimentos locais. A cada iteração, a busca se move para uma solução viável a melhoria que difere apenas ligeiramente da atual. A busca termina quando não há mais a melhoria é possível. Para evitar ótimos locais, os autores utilizam um processo de orientação. Nos testes computacionais, foram obtidos resultados generalizados em 90 minutos e soluções específicas em menos de uma hora.

Dubrovsky, Levitin e Penn (2002) desenvolvem uma heurística baseada em algoritmo genético com o objetivo de reduzir o número de movimentos durante as operações do plano de estiva. Uma questão crucial na implementação de algoritmos genéticos é a escolha da codificação das soluções em cromossomos para que o algoritmo convirja em boas soluções. Algumas codificações podem fazer com que o algoritmo crie soluções infactíveis, mude ou amplie o espaço de busca, tornando difícil a resolução. Por isso, os autores propõem um método de codificação compacta, cuja ideia principal é que ao invés de manter o layout completo, apenas as mudanças que resultaram do carregamento e descarregamento de contêineres ao longo do percurso serão

adicionadas na codificação. Isso é feito porque a disposição navio tem um número relativamente pequeno de mudanças ao longo de cada porto, e desta forma os vetores de solução podem ser muito menores. Codificando apenas as alterações no layout reduz significativamente o tempo de cálculo da função de avaliação da qualidade da solução, reduzindo o espaço de busca e permitindo que o AG convirja para boas soluções dentro de um tempo razoável. A eficiência da codificação sugerida é demonstrada através de um extenso conjunto de simulações em problemas de larga escala e sua flexibilidade é demonstrada pela incorporação bem sucedida de restrições de estabilidade navio.

Ambrosio, Sciomachen e Tanfani (2004), propõem uma abordagem heurística que permite relaxar algumas restrições do modelo de programação linear binária do plano de estiva desenvolvido e gerar algumas regras. O objetivo é minimizar o tempo total de carregamento.

A heurística é composta de três passos que são detalhados a seguir.

I. *Ordenação*: Os contêineres são agrupados de acordo com seu destino.

II. *Particionamento*: Neste passo é feito o agrupamento das baias, também de acordo com o destino dos contêineres. Este procedimento segue o critério básico no qual os contêineres que serão descarregados primeiro devem ser alocados nas partições centrais, a fim de evitar, tanto quanto possível, desequilíbrios na distribuição de peso proa-popa após o descarregamento no primeiro porto visitado. Em sequência, nos compartimentos adjacentes aos centrais são alocados os contêineres tendo como destino o segundo porto de destino, seguidos pelos que têm como destino o terceiro porto e analogamente até porto de destino final, evitando-se assim desequilíbrio após a primeira e as seguintes operações de descarregamento.

III. *Reduzindo S*: São removidos das baias os contêineres que não correspondem à partição na qual se encontram.

Note-se que deste modo à procura para a localização de cada contêiner é limitada a uma porção do navio e, por conseguinte, o espaço das soluções é reduzido,

assim como a complexidade do problema. Para avaliação da heurística, são comparados dados de casos reais, no porto de Genova (Itália), do navio Chiwaua, que tem capacidade para 198 TEUs distribuídos em onze baías, quatro linhas e cinco colunas, com 12 cenários gerados pelas autoras. Estes cenários possuem tamanho médio, com dois ou três destinos e diferentes pesos e tamanhos de contêineres. O número de contêineres a ser embarcados em cada cenário foi variado entre 100 e 158 contêineres. Em média, a abordagem obteve quase 26 movimentos de contêineres por hora, enquanto o mesmo índice, no cenário real é de cerca de 24.

Em 2006, Ambrosio, Sciomachen e Tanfani, apresentaram um algoritmo de três fases baseado no mesmo processo de particionamento do trabalho de 2004. Este processo também divide o navio em diferentes partes e atribui contêineres em cada parte com base em seu destino final, de forma que as diferentes partes do navio são consideradas independentemente para o plano de estiva. O objetivo das autoras é minimizar o tempo total de carregamento dos contêineres a bordo do navio e satisfazer restrições relacionados ao peso, tamanho e estabilidade, relacionando-as com a distribuição de peso. Na primeira fase, o navio é dividido em diferentes partes e cada parte é associada a grupos de contêineres com o mesmo destino. Para definir em qual partição será alocado cada grupo de contêineres, são definidas duas regras. A primeira regra se comporta da mesma forma que o processo de particionamento em Ambrosio, Sciomachen e Tanfani (2004). A segunda regra desta etapa é deixar duas baías entre cada partição com contêineres de mesmo destino, permitindo assim operações de movimentação de contêineres mais fáceis e mais rápidas. Sucessivamente, é encontrada a maneira ideal para carregar contêineres em cada partição do navio através da resolução de um modelo de programação linear binário. Por fim, são feitas verificações através de busca local e as possíveis infactibilidades são removidas da solução global, mantendo-se a estabilidade horizontal e vertical do navio. Na segunda fase, é encontrada a solução ótima de cada partição por meio de um modelo de programação linear binária. Ao considerar apenas uma partição por vez, as restrições de estabilidade do navio não são incluídas nesta fase, entretanto, são consideradas restrições de peso (contêineres mais pesados devem ser alocados abaixo de contêineres mais leves) e tempo de

embarque, que inclui tanto o tempo para o levantamento contêiner para fora do cais e o tempo para a sua colocação no local designado. Por fim, a estabilidade global do navio e a viabilidade do plano de estiva como um todo são checados por meio de algoritmo de troca que é baseado em técnicas de buscas locais. Caso rearranjos precisem ser feitos, são permitidos três tipos de movimentos, troca por lado, baía ou cruzado (side-exchange, cross-exchange e bay-exchange). Esses movimentos são feitos apenas com contêineres que possuem o mesmo porto de destino. A validação dessa nova abordagem proposta também é realizada com dados de casos reais do navio Chiwaua. São testadas doze instâncias, que diferem umas das outras pelo número de contêineres a serem embarcados, entre 100 e 148, a sua dimensão e peso, o número de portos a serem visitados (2 ou 3), e o número de TEU para carregar a bordo, variando 138-188. Foram encontrados resultados próximos ao ótimo em todos os casos.

Sciomachen e Tanfani (2007), aprofundando a análise feita em Sciomachen e Tanfani (2003), apresentam um método heurístico baseado na relação do problema do plano de estiva com o problema tridimensional de empacotamento, onde os itens são os contêineres e o navio é o único recipiente. São levadas em consideração restrições estruturais e operacionais, relacionados tanto aos contêineres quanto ao navio, e objetiva-se maximizar alguns importantes índices de desempenho do terminal, como a produtividade geral dos guindastes. As autoras avaliam como os planos de estiva podem influenciar o desempenho do cais, e assume-se que os contêineres não possuem dimensões fora do padrão, nem são especiais (perigosos ou refrigerados) e que a quantidade a ser embarcada não é maior que o número de locais disponíveis. Além disso, é feita a suposição de que existem dois guindastes fazendo o carregamento do navio e que o navio inicia a sua jornada no porto onde o problema é estudado e, sucessivamente, visita um determinado número de portos onde as somente as operações de descarregamento são permitidas. Esta suposição é justificada afirmando-se que o problema de planejamento do plano de estiva trabalhado é de um terminal que não é afetado pelo que acontece nos próximos portos, e, portanto, não há interação com o coordenador do navio. Assim como em Sciomachen e Tanfani (2003) e Ambrosio, Sciomachen e Tanfani (2006), o navio é dividido em diferentes seções, a fim de ser capaz

de considerar os espaços acima e abaixo do convés, a proa e a popa como componentes separados.

As principais fases da abordagem são:

I. Particionamento da baía e atribuição guindaste: Os contêineres são alocados em grupos de acordo com seu destino e guindaste e levando em consideração restrições de estabilidade. Para isso utiliza-se um procedimento derivado do proposto em Ambrosino *et al.* (2006)

II. Definição dos ‘recipientes’: Cada partição do navio é vista como um ‘recipiente’ onde os contêineres deverão ser colocados. Nesta etapa, o objetivo é minimizar o número de ‘recipientes’.

III. Definição do padrão de carregamento: É feita a partilha do peso total dos contêineres embarcados e satisfeito o equilíbrio horizontal e transversal do navio, atribuindo, a priori, um determinado número de contêineres para cada seção do navio com base no seu peso. O preenchimento de cada seção começa no canto inferior esquerdo e segue um padrão vertical concentrando os contêineres perto do ponto onde o carregamento começou.

A validação da abordagem proposta é feita com alguns casos de teste reais relacionados ao porto de Genova. Os resultados das instâncias reais do problema e a comparação com uma heurística validada para problema mostram a eficácia da abordagem proposta na produção de planos de estiva, que minimizam o tempo total de carregamento dos contêineres a bordo do navio e permitem uma utilização eficiente dos equipamentos do cais quando comparados com os resultados relatados em Ambrosino *et al.* (2004).

Zeng *et al.*, (2010) propõem um sistema automatizado de planejamento do plano de estiva para grandes navios-contêineres, que é composto por três módulos: o gerador de plano de estiva, que produz um plano de estiva inicial, cumprindo um conjunto de restrições, sem a consideração da estabilidade do navio; o módulo de estabilidade,

que checa a estabilidade do plano de estiva inicial e o ajusta de acordo com a distribuição de peso dos contêineres para satisfazer os requisitos de estabilidade do navio e o módulo de mecanismos de otimização, que parte do plano de estiva factível e otimiza-o com base em objetivos específicos (como minimizar o número de remanejamentos). Para isso, são consideradas as seguintes características dos contêineres: tamanho (20 TEU ou 40 TEU), tipo (normal, refrigerado, perigoso ou fora de padrão), porto de destino e peso (dividido em cinco categorias). O módulo de estabilidade, foco dos autores, é composto por duas etapas. Na primeira, são satisfeitas as restrições de estabilidade, como por exemplo, a de que o peso total de contêineres na mesma pilha deve ser menor do que o limite de peso da pilha. Na segunda etapa, é utilizado um algoritmo para fazer os ajustes de estabilidade. Primeiramente, o algoritmo ajusta o peso da pilha de contêineres em todas as linhas do navio, movendo ou trocando contêineres. Em seguida, o limite de visibilidade é verificado. Se a visão da superfície do mar é obstruída pela carga, os contêineres ilegais são deslocados para outro espaço vazio. Depois, se necessário, ajustes nas posições dos contêineres são realizados para atingir o equilíbrio desejado entre a popa e a proa. Finalmente, é ajustado o peso dos contêineres na mesma baía para garantir um bom equilíbrio entre os lados esquerdo e direito do navio. Os ajustes em cada passo são realizados de tal modo que as condições de segurança e de estabilidade obtidos com os passos anteriores não sejam afetadas. São usados dados reais de um navio com capacidade de 7000 TEU e demonstrado que o sistema pode gerar planos de estiva com melhoria da segurança e da estabilidade em comparação com aqueles gerados manualmente por planejadores experientes.

Delgado *et al.* (2012) apresentam um modelo mais complexo para a resolução do problema, chamado de Problema de Estiva de Contêineres para Locais Abaixo do Convés (CSPBDL - *Container Stowage Problem for Below Deck Locations*). Neste modelo, o navio é dividido em seções, e o planejamento da estiva é feito individualmente para cada seção. Para isso, são inclusas regras para empilhar de 200 a 400 contêineres e para a sobreposição de TEU, além disso, são considerados contêineres frigoríficos, contêineres que já foram carregados no navio em portos anteriores, e restrições de peso e altura. Para resolver o CSPBDL, são utilizados dois

modelos, um de programação de restrições e outro de programação inteira. Assim, utilizando solvers e técnicas de modelagem, os autores para resolveram 90% dos 236 casos reais de seu colaborador industrial dentro do tempo de 1 segundo por sessão. Curiosamente, os resultados obtidos isoladamente com o modelo de programação inteira foram levemente piores do que os resultados do CSPBDL.

Tierney *et al.* (2014), resolvem o problema capacitado de k-remanejamentos (*The Capacitated k-Shift Problem - CkSP*) do plano de estiva, deixado em aberto por Avriel *et al.* (2000). O problema é definido como um problema de decisão que pergunta se um conjunto de contêineres que devem ser armazenados e retirados em um conjunto fixo de pontos discretos de tempo podem ser embarcados com menos de k remanejamentos em um número fixo de pilhas com capacidade limitada. É mostrado que este problema pode ser resolvido em tempo polinomial ao se mudar as pilhas de incapacitadas para capacitadas. Isto é feito através de um algoritmo que, para qualquer escolha do número de pilhas e suas respectivas capacidades resolve o problema em tempo polinomial. Em seguida, os autores examinam a complexidade da abstração atual mais bem sucedida do problema de planejamento do plano de estiva para navios porta-contêineres, na qual os contêineres que devem ser carregados são atribuídos a partições do navio em vez de locais específicos, e chegam à conclusão que a complexidade das diversas variações do problema continuam desconhecidas.

Monaco *et al.* (2014) lidam com o plano de estiva levando em consideração os objetivos do terminal portuário, que são relacionados à minimização de custos no pátio e nas operações de transporte. O foco dos autores é na alocação dos contêineres de exportação nos navios, em conformidade com o pré-plano de estiva desenvolvido pela companhia marítima responsável e com as restrições de estabilidade, minimizando o tempo total de transporte e os remanejamentos no pátio. Para tal, é proposto um modelo de programação inteiro binário e uma heurística de duas fases. Na primeira fase, é construída uma solução inicial factível, e a segunda fase procura por soluções factíveis melhores. Ambos os passos são baseados em busca tabu. A heurística é testada em um conjunto de seis casos reais fornecidos pelo MCT (Medcenter Container Terminal), empresa que gere o terminal de contêineres de Gioia Tauro, na Itália, e, em

seguida, em um conjunto de 60 casos reais gerados a partir destes seis casos. Nos resultados computacionais, as heurísticas se mostraram superiores ao modelo de programação, uma vez que foram capazes de encontrar soluções ótimas ou quase ótimas com pouco esforço computacional em todas as instâncias de teste, quando o modelo não conseguiu encontrar uma solução viável dentro do prazo de 1 hora.

Na seção 5, a seguir, é descrita a metodologia utilizada neste estudo para se tratar os problemas de movimentação de contêineres no pátio e no plano de estiva.

5. Metodologia

O grande potencial do setor e a vital importância da ampliação da eficiência portuária para o comércio exterior motivou a adaptação de um método baseado em representação por regras (AZEVEDO *et al.*, 2011), que teve sucesso para tratar o PCCTP (Problema de Carregamento de Contêineres em Terminais Portuários) em problemas de grande porte, para o problema de movimentação de cargas no pátio do porto. O problema PCCTP consiste em reduzir ao máximo possível o número de remanejamentos dos contêineres para um número de portos N .

O método consiste em empregar a representação por regras em um simulador integrado a um algoritmo genético que decide a sequência de regras que fornece o menor número de remanejamentos dos contêineres ao longo dos N portos que um navio percorre. Este simulador foi implementado em Matlab, e é descrito na seção 5.6.4.

As regras dizem de forma detalhada como vai ocorrer a movimentação dos contêineres em cada passo do processo. Para isso, foram implementadas, também em Matlab, diferentes regras de carregamento (R_c) e de descarregamento (R_d) no navio e de retirada de contêineres do pátio (R_t), que são descritas individualmente nas seções 5.2.1, 5.2.2 e 5.4.1, respectivamente.

Segundo Azevedo *et al.* (2011), as vantagens do emprego de regras são:

“A facilidade de incorporar conhecimento prévio do decisor, sob a forma de regras; elas sempre produzem matrizes de ocupação factíveis, facilitando e garantindo a obtenção de soluções factíveis por métodos heurísticos; e a codificação da solução que determina como será realizado o carregamento e o descarregamento de um navio para N portos, é um vetor de tamanho $N-1$. Por fim, a representação por regras fornece uma representação mais compacta da solução do problema, se comparada com outras abordagens da literatura, como por exemplo, a utilizada em Avriel *et al.* (2000), reduzindo

drasticamente o número de variáveis utilizadas para representar uma solução, isto é, na representação por regras, o número de variáveis é igual ao número de portos menos um.”

A seguir é apresentado o modelo matemático do problema de carregamento de contêineres no navio e as regras desenvolvidas para resolver este problema, e na sequência, o modelo matemático do problema de movimentação dos contêineres do pátio e as regras desenvolvidas para o mesmo.

Uma vez explicados os modelos matemáticos e o funcionamento detalhado das regras, será apresentada a estrutura geral do algoritmo genético e sua integração com o programa de simulação que utiliza as regras.

5.1 Modelo Matemático do PCCTP

O modelo matemático utilizado neste trabalho para descrever o problema de carregamento de contêineres em terminais portuários é o modelo de programação linear inteira com variáveis binárias 0-1 apresentado por Azevedo *et al.* (2010).

Para isso, primeiro deve-se considerar que os navios tem uma estrutura celular onde são alojados os contêineres, como visto na figura 6. Essas células são agrupadas por baias ou seções, onde os contêineres são empilhados formando pilhas verticais. Então uma baia é um agrupamento de células, onde r representa as linhas, com $r \in \{1, \dots, R\}$ e c representa as colunas, com $c \in \{1, \dots, C\}$. C e R máximos são parâmetros do problema. Cada baia pode alocar no máximo $R \times C$ contêineres. Dessa forma, é possível representar um navio como uma matriz de ocupação B , que fornece a localização de cada contêiner no navio e a quantidade de espaços disponíveis.

Vale a pena lembrar que para uma representação mais realista, a linha 1 é a linha que está em baixo, a linha R é a linha do topo da pilha e a coluna 1 é a primeira

coluna da esquerda. Além disso, é assumido também, sem perda de generalidade, que todos os contêineres têm o mesmo tamanho.

Dessa forma, considere um navio porta-contêineres que possui uma única baía de tamanho $R \times C$. O navio chega no porto 1 completamente vazio e sequencialmente ele visita os portos 2, 3, ..., N. Em cada porto $i=1, \dots, N-1$, o navio recebe o carregamento de contêineres com destino aos portos $i+1, \dots, N$. No último porto ele descarrega os contêineres e fica totalmente vazio. Seja $T=[T_{ij}]$ a matriz de transporte de dimensão $(N-1) \times (N-1)$, onde T_{ij} é o número de contêineres com origem em i e destino em j . Esta matriz é triangular superior porque $T_{ij}=0$ para todo $i \geq j$.

O problema do PCCTP pode ser formulado utilizando-se das equações (1)-(5) a seguir.

$$\text{Min } f(x) = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \sum_{v=i+1}^{j-1} \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C x_{ijv}(r, c) \quad i = 1, \dots, N-1, j = i+1, \dots, N; \quad (1)$$

$$\text{s.a:} \quad \sum_{v=i+1}^j \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C x_{ijv}(r, c) - \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C x_{kji}(r, c) = T_{ij} \quad i = 1, \dots, N-1, j = i+1, \dots, N; \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^j \sum_{j=i+1}^N \sum_{v=i+1}^j x_{kji}(r, c) = y_i(r, c) \quad i = 1, \dots, N-1, r = 1, \dots, R; \quad (3)$$

$$c = 1, \dots, C;$$

$$y_i(r, c) - y_i(r+1, c) \geq 0 \quad i = 1, \dots, N-1, r = 1, \dots, R-1; \quad (4)$$

$$c = 1, \dots, C;$$

$$\sum_{i=1}^{j-1} \sum_{p=j}^N x_{ipj}(r, c) + \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{p=j+1}^N \sum_{v=j+1}^p x_{ipv}(r+1, c) \leq 1 \quad i = 2, \dots, N, r = 1, \dots, R-1; \quad (5)$$

$$c = 1, \dots, C;$$

Onde:

$$x_{ijv}(r, c) = \begin{cases} 1, & \text{se existir um contêiner na célula } (r, c) \text{ que foi ocupada no porto } i \\ & \text{e tem como destino final o porto } j \text{ e movido no porto } v \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$y_i(r, c) = \begin{cases} 1, & \text{se saindo do porto } i \text{ a célula } (r, c) \text{ for ocupada por um contêiner} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Conforme explicado em Azevedo *et al.* (2010), temos que a restrição (2) é a restrição de conservação de fluxo, onde T_{ij} é o elemento da matriz de transporte que representa o número de contêineres que embarcam no porto i com destino ao porto j . A restrição (3) garante que cada célula (r, c) tem no máximo um único contêiner. A restrição (4) é necessária para garantir que existem contêineres embaixo do contêiner que ocupa a célula (r, c) . A restrição (5) é responsável por definir a movimentação dos contêineres: se um contêiner que ocupa a posição (r, c) é descarregado no porto j , então, ou não existem contêineres acima dele, ou o índice v do contêiner que ocupa o compartimento $(r+1, c)$ não é maior que j .

A função objetivo da equação (1) depende da movimentação dos contêineres, e é relativa ao custo total de movimentação dos contêineres (assumindo que a movimentação de um contêiner possui um custo unitário que é igual para todos os portos).

Segundo Azevedo *et al.* (2011), este modelo gera $R^*C^*P^3$ variáveis $x_{ijv}(r, c)$ e R^*C^*P variáveis $y_i(r, c)$, ou seja, em um exemplo com um navio de dimensões 6 linhas por 50 linhas e uma rota de 30 portos, gera 909.000 variáveis binárias. Além disso, a complexidade do problema também foi demonstrada por Avriel e Penn (1993), justificando o emprego de heurísticas para encontrar boas soluções.

Na seção 5.2, a seguir, é descrita a representação por regras para o problema do PCCTP.

5.2 Representação por Regras para o PCCTP

Para o carregamento e descarregamento no navio são utilizadas as regras propostas por Azevedo *et al.* (2011). Consequentemente, as suposições a seguir são análogas a tal.

Como visto na figura 6 e proposto na apresentação do modelo matemático para o PCCTP, o empilhamento vertical dos contêineres no navio sugere uma representação por meio de um vetor de matrizes chamada de matriz de ocupação bidimensional B , uma vez que os locais onde os contêineres serão alocados são pré-determinados (AZEVEDO *et al.*, 2011).

Neste caso, cada elemento B_{rc} da matriz de ocupação bidimensional B representa o estado de uma célula (r,c) , isto é, se $B_{rc} = 0$, significa que a célula que ocupa a linha r e a coluna c , está vazia e se $B_{rc} = j$ significa que a célula contém um contêiner, cujo destino é o porto j . Logo, no exemplo da figura 10 abaixo, o elemento $(1,3)$, ou seja, linha 2 e coluna 3 é igual a 6 (lembrando que as linhas começam de baixo e a linha 4 é o topo da pilha), significando que neste local existe um contêiner que será descarregado no porto 6. Equivalentemente, o elemento $(2,3)$ é igual a 3 significa que a célula da baía $B_{r,c}$, segunda linha e terceira coluna contém um contêiner, cujo destino é o porto 3. Então, os elementos da matriz $B_{r,c}$ representam a ocupação do navio e são mostrados na figura 10.

					}	B
2	2	4	3	4		
5	5	3	4	4		
6	6	6	6	6		

FIGURA 10: Matriz de ocupação B para navio com capacidade de 20 contêineres e transporte para seis portos. Fonte: Adaptado de AZEVEDO *et al.* (2010)

O procedimento de resolução, aqui utilizado, trata o PCCTP como um problema onde a matriz de ocupação B representa o arranjo dos contêineres no navio antes de chegar no porto p . Esse arranjo é então modificado em cada porto, através da variável de decisão Re_j , que define a maneira (regra) como os contêineres serão manejados ao longo da viagem do navio.

A resolução do PCCTP, usando a representação por regras, consiste em determinar qual regra vai ser utilizada em cada porto para realizar as operações de carregamento e descarregamento do navio, de modo a minimizar a quantidade de movimentos nos portos. Considerou-se como um movimento, cada operação de carregamento ou descarregamento de um contêiner num porto p . As regras foram elaboradas, lembrando que, muitas vezes, para se fazer o descarregamento, no porto p , de um contêiner cujo destino é o próprio porto p , é necessário fazer operações de remanejamento (descarregamento seguido de carregamento) dos contêineres cujo destino são os portos de $p+1$ até N . Esta situação ocorre quando existem contêineres que ocupam na pilha, uma posição acima da posição do contêiner que deve ser descarregado no porto p . Assim como, para se retirar um contêiner j do pátio que está localizado abaixo de outro com destino ao navio $j+1$ até N .

Veja, por exemplo, que na matriz B da figura 10, para se descarregar os contêineres do porto 3, será necessário descarregar, pela ordem, os contêineres contidos nas células (3,3), (3,2) e (3,4). Observe que o destino do contêiner que ocupa a célula (3,3) é o porto 4, mas ele precisa ser remanejado no porto 3, para se descarregar o contêiner que está na célula (2,3). Assim, com intuito de reduzir o número de remanejamentos, ao se fazer o carregamento de contêineres num dado porto j , deve-se levar em conta os contêineres que já estão no navio, porque foram embarcados nos portos anteriores (portos de 1 até $j-1$), com destino aos portos $j+1$ até N , então se procurou estabelecer regras para o carregamento e descarregamento de contêineres, em cada porto, que leve em conta esta relação.

Para tanto, são utilizadas quatro regras de carregamento do navio (Rc) e duas de descarregamento (Rd), que são descritas nas seções 5.2.1 e 5.2.2, respectivamente.

5.2.1 Regras de Carregamento

Nesta sessão são descritas as regras de carregamento do navio Rc1, Rc2, Rc3 e Rc4 inicialmente propostas por Azevedo *et al.* (2011). Contudo, as regras utilizadas neste estudo tratam o problema de forma bidimensional, sem perda de generalidade. Na explicação do uso das regras a seguir, será suposto que o navio está no porto 2 e a seguinte matriz de transporte T é utilizada:

	D1	D2	D3	D4
O1	2	5	0	0
O2	0	2	3	1
O3	0	0	2	2
O4	0	0	0	1

FIGURA 11: Matriz de Transporte T. Fonte: AZEVEDO *et al.* (2011)

Vale lembrar que na matriz de transporte tem-se número de contêineres com origem em *i* e destino em *j*, onde: O é o porto de origem e D é o porto de destino.

Regra Rc1: Esta regra preenche a matriz de ocupação B (no porto *p*) por linha, da esquerda para a direita, colocando na parte inferior da pilha as cargas cujo destino é mais distante. A aplicação desta regra considerando a matriz T da Figura 11 e

que o navio se encontra no porto 1, resultará na matriz B da Figura 12.

0	0	0	0
0	0	0	0
3	2	2	0
3	3	3	3

} B

FIGURA 12: Matriz de ocupação no porto um, após a aplicação da regra Rc1. Fonte: AZEVEDO *et al.* (2010).

Regra Rc2: Esta regra preenche a matriz de ocupação B (no porto p) por coluna, começando de baixo para cima da esquerda para a direita. Entretanto, nesta regra as colunas serão preenchidas até uma altura máxima pré-estabelecida de acordo com o número de contêineres existentes no navio e de contêineres a serem colocadas no mesmo no porto atual. A aplicação desta regra, considerando a matriz T da Figura 11 e que o navio se encontra no porto 2, resultará na matriz B da figura 13.

0	0	0	0
5	4	4	0
3	3	4	3
3	3	3	3

} B

FIGURA 13: Matriz de ocupação no porto dois, após a aplicação da regra Rc2. Fonte: Elaboração Própria

Regra Rc3: Esta regra é o espelho da regra **Rc1**. No porto p , a matriz de ocupação B será preenchida por linha, da direita para a esquerda, colocando na parte inferior da linha, as cargas cujo destino é mais distante. A aplicação desta regra

considerando a matriz T da Figura 11 e que o navio se encontra no porto 1, resultará na matriz B da Figura 14.

0	0	0	0
0	0	0	0
0	2	2	3
3	3	3	3

} B

FIGURA 14: Matriz de Ocupação no porto um, após a aplicação da regra Rc3. Fonte: Elaboração Própria

Regra Rc4: Esta regra é o espelho da regra **Rc2**. No porto p , a matriz de ocupação B será preenchida por coluna, da direita para a esquerda, colocando na parte inferior da coluna, as cargas cujo destino é mais distante. A aplicação desta regra considerando a matriz T da Figura 11 e que o navio se encontra no porto 2, resultará na matriz B da Figura 15.

0	0	0	0
0	3	3	4
3	3	4	4
3	3	3	5

} B

FIGURA 15: Matriz de Ocupação no porto dois, após a aplicação da regra Rc4. Fonte: Elaboração Própria

A seguir as regras de descarregamento são descritas.

5.2.2 Regras de Descarregamento

Nesta sessão são descritas as regras de descarregamento do navio Rd1 e Rd2, inicialmente propostas por Azevedo *et al.* (2011).

Regra Rd1: Nesta regra, quando o navio chega a um porto p , são removidos todos os contêineres cujo destino é p e todos os contêineres que estão acima dos contêineres do porto p e cujos destinos são os portos $p+j$, para $j=1, \dots, N$ tal que $(p+j) \leq N$. Suponha, por exemplo, que ao se chegar ao porto 2, a matriz de ocupação B seja a representada na Figura 16(a). De acordo com esta regra, a matriz B ficaria como mostrada na Figura 16(b). Além disso, após a aplicação da regra, a matriz de transporte T tem que ser atualizada, porque foram retirados dois contêineres com destino ao porto 2 e um contêiner com destino ao porto 1, que devem ser recarregados e, portanto, ele será adicionado na matriz de transporte relativa ao porto 3. As figuras 16(c) e 16(d) mostram a matriz de transporte, antes e depois da aplicação desta regra.

3	2
2	5

(a) Antes da aplicação da regra Rd1

	5

(b) Depois da aplicação da regra Rd1

	D2	D3	D4	D5	D6
O2	2	1	3	1	0

(c) Matriz de transporte antes de aplicação de Rd1.

	D2	D3	D4	D5	D6
O2	0	2	0	1	0

(d) Modificação matriz de transporte após Rd1.

FIGURA 16: Matriz de ocupação no porto dois, antes e depois da aplicação da regra Rd1. Fonte: AZEVEDO *et al.* (2011)

Regra Rd2: Nesta regra, quando o navio chega ao porto p , todos os contêineres são removidos para permitir que todas as pilhas sejam reordenadas por

alguma regra de carregamento, a ser aplicada posteriormente. Assim como foi feito na regra Rd1, os contêineres removidos cujo destino é para portos além do porto 2, deverão ser contabilizados na matriz de transporte T.

5.3 Modelo Matemático do Problema de Movimentação de Contêineres em Pátios Portuários

O modelo matemático utilizado neste trabalho para descrever o problema de movimentação de contêineres no pátio é o modelo binário linear apresentado por Caserta, Schwarze e VoSS (2012). O propósito com a apresentação deste modelo é mostrar a complexidade do problema através de um modelo matemático.

No trabalho desenvolvido pelos autores supracitados o objetivo é descrever e analisar o problema bidimensional de realocação de blocos, onde realocações são necessárias para se retirar blocos de um armazém em uma ordem pré-determinada de forma que o número de realocações seja minimizado, que é basicamente o mesmo problema de movimentação de contêineres em pátios portuários, como pode ser observado a seguir.

Dessa forma, deve-se considerar que:

1. Os blocos são uniformes;
2. Os blocos são acessíveis apenas do topo;
3. A ordem de retirada dos blocos é conhecida;
4. Em caso de remanejamentos, um bloco deve ser alocado na mesma área de armazenamento, no topo de outro bloco, ou no chão;
5. Enquanto os blocos estão sendo retirados ou remanejados na área de armazenamento, não há novos blocos sendo colocados nesta área;
6. Para que os blocos possam ser remanejados, é assumido que exista pelo menos um espaço vazio na baía, logo: $R \times C \geq N + (C - 1)$, onde N é o número de blocos, onde R é o número de linhas, C é o número de colunas. A área

de armazenamento pode alocar no máximo $R \times C$ blocos, e ter $C-1$ espaços vazios garante acessibilidade a qualquer contêiner na baía.

7. Quando os blocos foram alocados na área de armazenamento, a sequência de retirada não era conhecida e, portanto, estão armazenados de forma aleatória;

Á vista disso, tem-se que cada espaço para armazenar um bloco é uma coordenada (i,j) , onde $i \in \{1, \dots, R\}$ e $j \in \{1, \dots, C\}$. C e R máximos são parâmetros do problema. N é o número máximo de blocos e $n \in \{1, \dots, N\}$ e t é o período de tempo, onde $t = \{1, \dots, T\}$. Cada período de tempo é definido por um único movimento.

Logo, as variáveis de decisão são divididas em dois grupos:

- (i) *Variáveis de configuração*, que definem configurações factíveis.

$$b_{ijnt} = \begin{cases} 1, & \text{se o bloco } n \text{ está na posição } (i,j) \text{ no período de tempo } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$v_{nt} = \begin{cases} 1, & \text{se o bloco } n \text{ foi retirado no período de tempo } t', \\ & \text{onde } t' \in \{1, \dots, t-1\} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

- (ii) *Variáveis de movimento*, que definem movimentos factíveis.

$$x_{ijklnt} = \begin{cases} 1, & \text{se o bloco } n \text{ é realocado da posição } (i,j) \text{ para} \\ & \text{a posição } (k,l) \text{ no período de tempo } t. \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$y_{ijnt} = \begin{cases} 1, & \text{se o bloco } n \text{ foi retirado da posição } (i,j) \text{ no} \\ & \text{período de tempo } t. \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}.$$

As restrições podem ser formuladas como segue:

$$\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C b_{ijnt} + v_{nt} = 1 \quad n = 1, \dots, N; \quad t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$$\sum_{n=1}^N b_{ijnt} \leq 1 \quad i = 1, \dots, R; \quad j = 1, \dots, C; \quad t = 1, \dots, T \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^N b_{ijnt} \geq \sum_{n=1}^N b_{ij+1nt} \quad i = 1, \dots, R; \quad j = 1, \dots, C-1; \quad t = 1, \dots, T \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C \sum_{k=1}^R \sum_{l=1}^C \sum_{n=1}^N x_{ijklnt} + \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C \sum_{n=1}^N y_{ijnnt} \leq 1 \quad t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^T v_{nt} \geq \sum_{t=1}^T v_{nt+1t} + 1 \quad n = 1, \dots, N-1 \quad (10)$$

$$b_{ijnt} = b_{ijnnt-1} + \sum_{k=1}^R \sum_{l=1}^C x_{ijklnt-1} - \sum_{k=1}^R \sum_{l=1}^C x_{ijklnt-1} - y_{ijnnt-1} \\ i = 1, \dots, R; \quad j = 1, \dots, C; \quad n = 1, \dots, N; \quad t = 2, \dots, T \quad (11)$$

$$v_{nt} = \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C \sum_{t'=1}^{t-1} y_{ijnnt'} \quad n = 1, \dots, N; \quad t = 1, \dots, T \quad (12)$$

$$\text{Min } f(x) = \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^C \sum_{k=1}^R \sum_{l=1}^C \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^N x_{ijklnt} \quad (13)$$

A restrição (6) garante que em cada período de tempo, cada bloco tem que estar na área de armazenamento ou fora dela, enquanto a restrição (7) garante que a posição (i,j) está ocupada por no máximo um bloco. A restrição (8) garante não hajam 'buracos' na área de armazenamento ao restringir que a posição (i,j) acima de um bloco movido deve estar vazia e que nenhum bloco pode ser movido para uma posição acima de posição vazia. As restrições (9) e (10) garantem que em cada período de tempo apenas um movimento é permitido e que os blocos devem ser retirados em uma ordem prescrita, respectivamente. As restrições (11) e (12) são restrições de equilíbrio de fluxo entre variáveis de movimento e configuração e de forma geral, garantem que a cada período de tempo, partindo de uma configuração inicial factível, uma nova configuração factível é atingida após a aplicação de um conjunto de movimentos válidos.

A função objetivo (13) minimiza o número total de realocações.

Segundo Caserta, Schwarze e VoSS (2012), este modelo gera $2RCNT + (RC)^2NT + NT$ variáveis binárias e em um exemplo com $R=3$, $C=5$, 9 blocos e $T = 20$ sendo o limite superior de movimentos, gera 46.080 variáveis binárias, tornando proibitiva a resolução do problema para instâncias de maior porte.

Assim sendo, o emprego de heurísticas para resolver problemas de movimentação de contêineres em pátios portuários se torna necessário.

Nas seções 5.4 e 5.4.1, a seguir, é descrita a representação por regras para o problema de movimentação de contêineres em pátios portuários.

5.4 Representação por Regras para o Pátio

Na figura 7 viu-se que no pátio, assim como no navio, os contêineres são empilhados verticalmente, fazendo com que essa estrutura celular também possa ser representada por meio de um vetor de matrizes. Esse vetor de matrizes é a matriz de ocupação bidimensional P e representa os espaços ocupados pelos contêineres, fornece a quantidade de espaços disponíveis e a localização dos contêineres.

Para ilustrar a matriz P , considere uma dada configuração inicial com uma única baía. A baía tem R linhas horizontais numeradas $r = 1, 2, \dots, R$, (a linha 1 é a linha que está em baixo, e a linha R é a linha do topo da pilha), C colunas verticais numeradas $c = 1, 2, \dots, C$ (coluna 1 é a primeira coluna da esquerda). Cada baía pode alocar no máximo $R \times C$ contêineres, e são adicionadas às considerações de 1 a 7 da seção 5.3 o seguinte:

- 1) Todos os contêineres têm o mesmo tamanho e seu navio e porto de destino são conhecidos;
- 2) A ordem de chegada dos navios no porto é conhecida.

Cada elemento da matriz de ocupação P é representado por uma célula (a, b) , onde a representa o navio de destino daquele contêiner, e b representa seu porto de destino. Assim, no exemplo da Figura 17, o elemento da posição 1×1 , vai ser embarcado no navio 1 e desembarcado no porto 4. Analogamente, o elemento da posição 3×1 , vai ser embarcado no navio 2 e desembarcado no porto 3, e assim por diante. Consequentemente, percebe-se que o índice a representa a ordem de retirada dos contêineres do pátio, uma vez que o navio 1 é o primeiro a atracar no porto e ser carregado, seguido pelo navio 2, até o último navio.

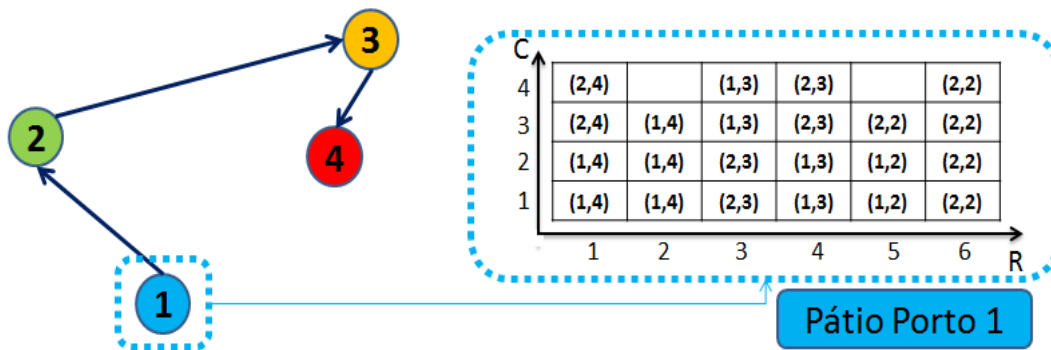


FIGURA 17: Matriz de Ocupação P do Porto 1. Fonte: Elaboração própria.

Observe que, para que o contêiner da posição 2x1, que tem como destino o navio 1, seja retirado, é preciso remanejar os dois contêineres acima dele, que tem destino o navio 2. Para isso, com o objetivo de se realizar o menor número de movimentos possíveis e considerando os itens citados acima, foram desenvolvidas 8 regras de retirada (R_t) inéditas, que são descritas na sessão 5.4.1, a seguir.

5.4.1 Regras de Retirada

Nesta seção, as regras de retirada serão descritas individualmente. Tais regras são parte da inovação proposta por este estudo e são inéditas na literatura. O objetivo nessa etapa é retirar os contêineres do pátio do porto seguindo a ordem que devem ser embarcados nos seus navios de destino.

Regra R_{t1} : Esta regra escolhe a menor combinação (R,C) para mover o contêiner que precise ser remanejado, sendo que o menor C é priorizado antes do menor R, ou seja, a regra percorre a matriz de ocupação em busca de espaços vazios para remanejar um contêiner, começando pela parte inferior, indo da primeira linha até a última linha, da esquerda para direita. Caso um contêiner esteja no topo da coluna é retirado

com apenas um movimento, sem necessidade de remanejamentos. Terminada a retirada do contêiner com destino ao primeiro navio, o procedimento é repetido para os contêineres com destino aos navios seguintes, conforme ilustrado no exemplo da figura 18.

Configuração Inicial do Pátio

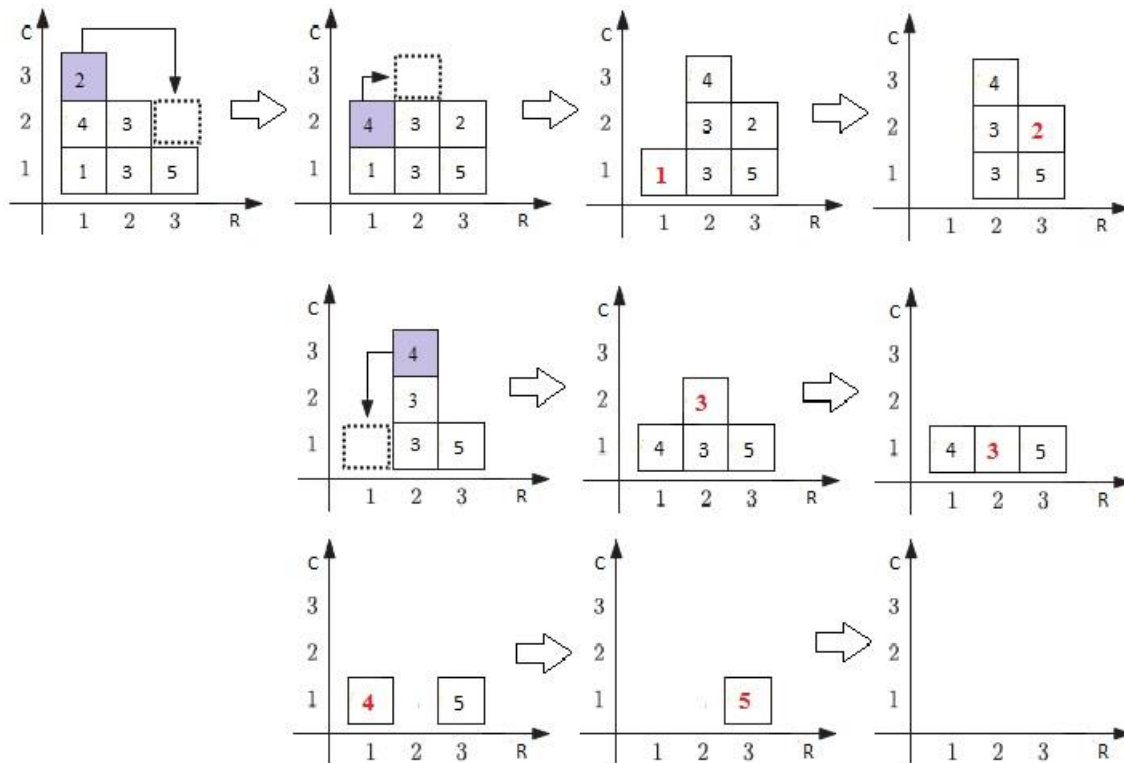


FIGURA 18: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt1.

Fonte: Elaboração própria.

No exemplo acima, foram necessários nove movimentos para retirar todos os contêineres da baía utilizando a regra Rt1.

Regra Rt2: Esta regra escolhe a menor combinação (R,C) para mover o contêiner que precise ser remanejado, sendo que o menor R é priorizado antes do menor C, ou seja, a regra percorre a matriz de ocupação em busca de espaços vazios para

remanejar um contêiner, começando pela parte inferior, indo da primeira coluna até a última coluna, de baixo para cima. Caso um contêiner esteja no topo, é retirado com apenas um movimento, sem necessidade de remanejamentos, conforme ilustrado na figura 19.

Configuração Inicial do Pátio

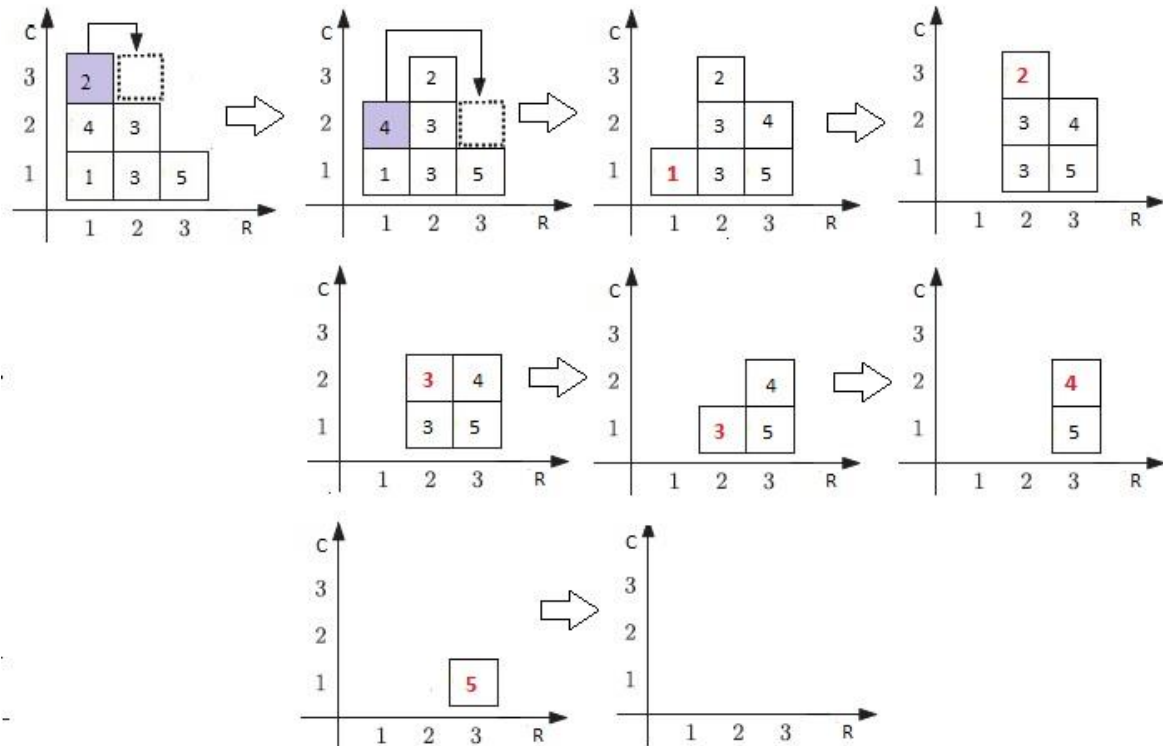


FIGURA 19: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt2.

Fonte: Elaboração própria.

Foram necessários oito movimentos para retirar todos os contêineres da baía utilizando a regra Rt2, um movimento a menos do que a regra Rt1.

Regra Rt3: Esta regra percorre a matriz da mesma forma que a regra Rt1, porém verificando se a posição selecionada para remanejar um contêiner encontra-se imediatamente acima de um contêiner que será retirado antes dele. Caso isso ocorra,

a posição é rejeitada e o contêiner é remanejado para a próxima posição vazia disponível. Se não houverem posições vazias que cumpram esse requisito, o contêiner é armazenado na primeira posição “menos pior”, ou seja, com o maior índice. Por exemplo, se um contêiner com destino ao navio 4 precise ser remanejado e existam posições vazias apenas acima de contêineres com destino aos navios 2 e 3, a regra o colocará em cima do contêiner com destino ao terceiro navio, como mostrado na figura 20.

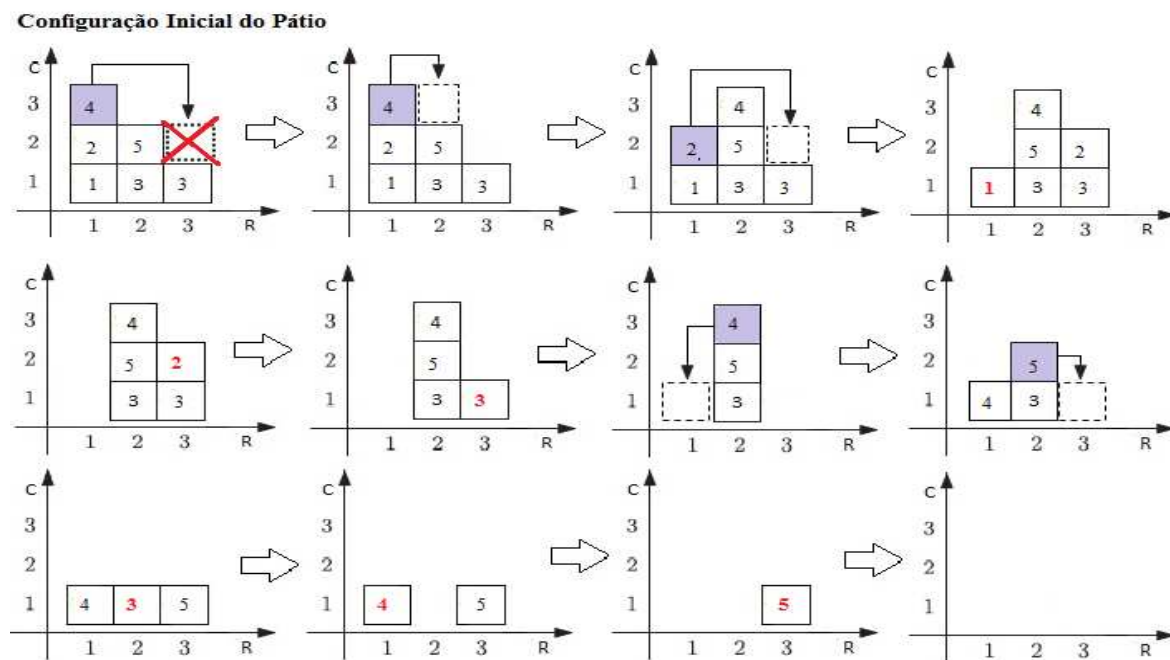


FIGURA 20: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt3.

Fonte: Elaboração própria.

A primeira posição identificada pela regra para mover o contêiner com destino ao navio 4 foi a posição (3,2), que está ineditamente acima do contêiner com destino ao navio 3. Como o contêiner para o navio 3 será retirado antes do contêiner para o navio 4, essa posição é rejeitada, fazendo com que a regra procure uma nova posição vazia. Ao fim, no exemplo da figura 6, foram necessários 10 movimentos para retirar todos os contêineres.

Regra Rt4: Esta regra percorre a matriz da mesma forma que a regra Rt2, porém, assim como a regra Rt3, verificando se a posição selecionada para remanejar um contêiner encontra-se imediatamente acima de um contêiner que será retirado antes dele, como ilustrado na figura 21.

Configuração Inicial do Pátio

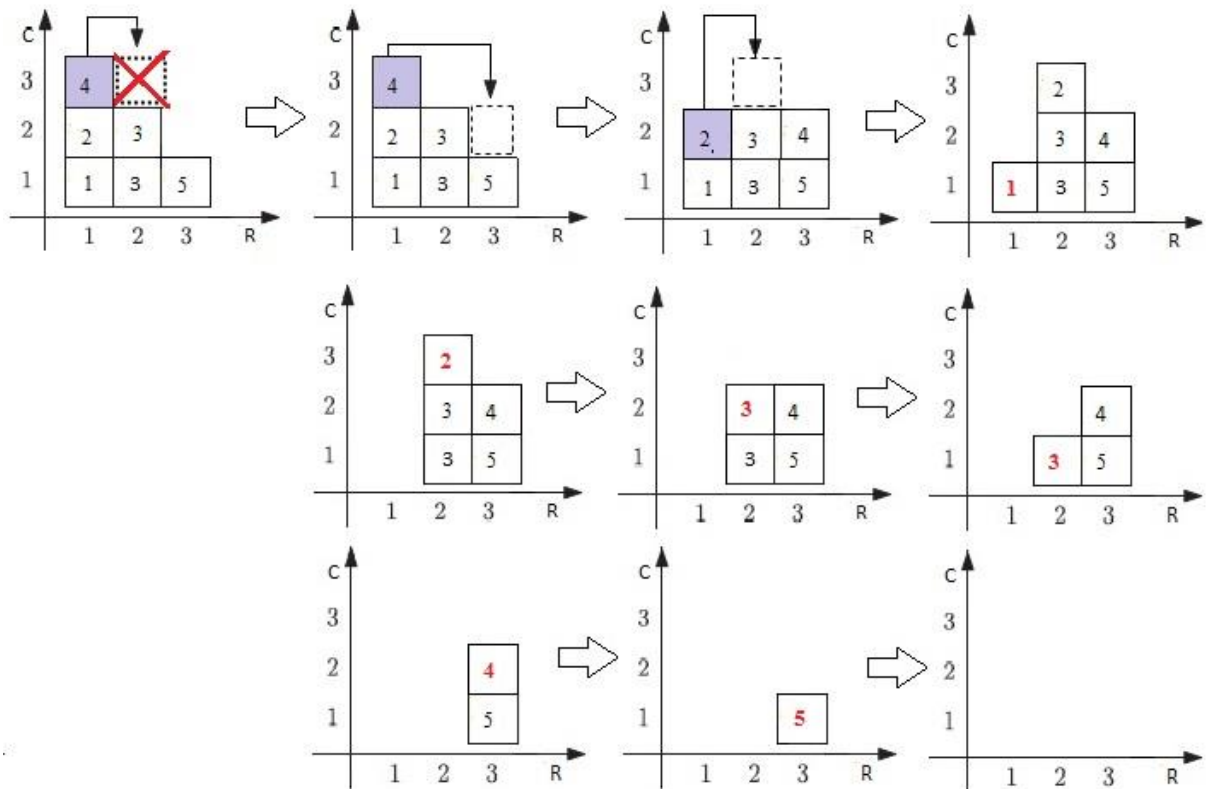


FIGURA 21: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt4.

Fonte: Elaboração própria.

No exemplo acima foram necessários 8 movimentos para retirar todos os contêineres utilizando-se da regra Rt4.

Regra Rt5: Esta regra é o espelho da regra Rt1. A matriz de ocupação é percorrida por linha, começando pela parte inferior, indo da primeira linha até a última

linha, da direita para a esquerda, conforme ilustrado na figura 22.

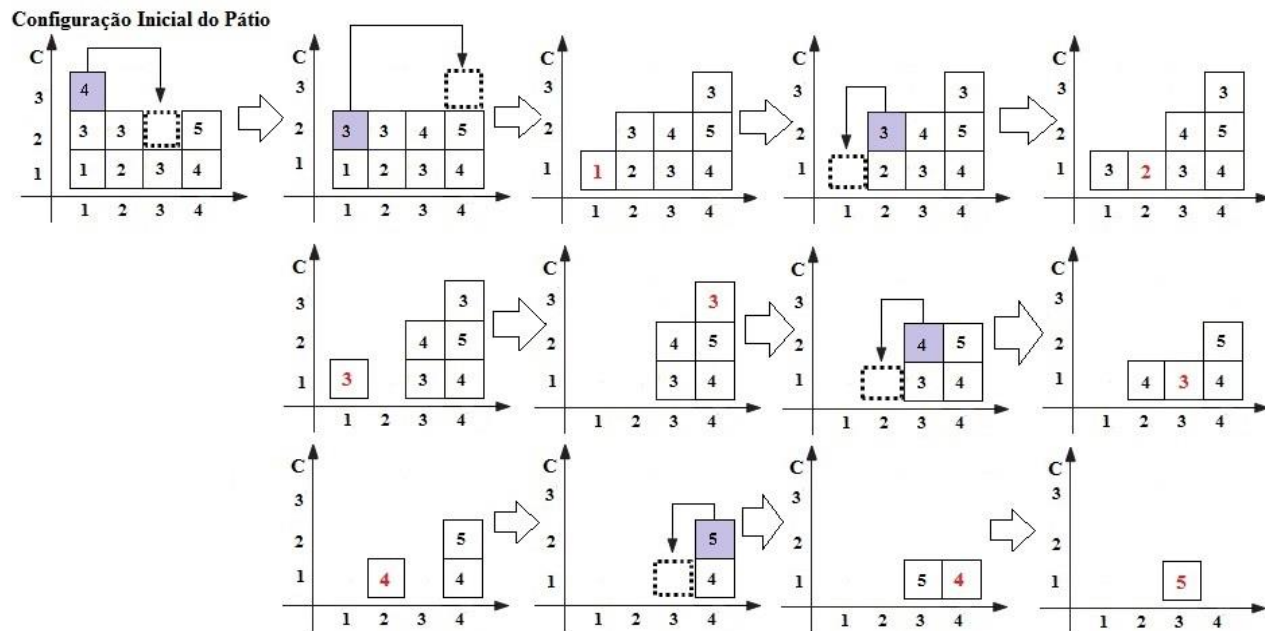


FIGURA 22: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt5.

Fonte: Elaboração própria.

Regra Rt6: Esta regra é o espelho da regra Rt2. A matriz de ocupação é percorrida por coluna, começando pela parte inferior, indo da primeira coluna até a última coluna, da direita para a esquerda, conforme ilustrado na figura 23.

Configuração Inicial do Pátio

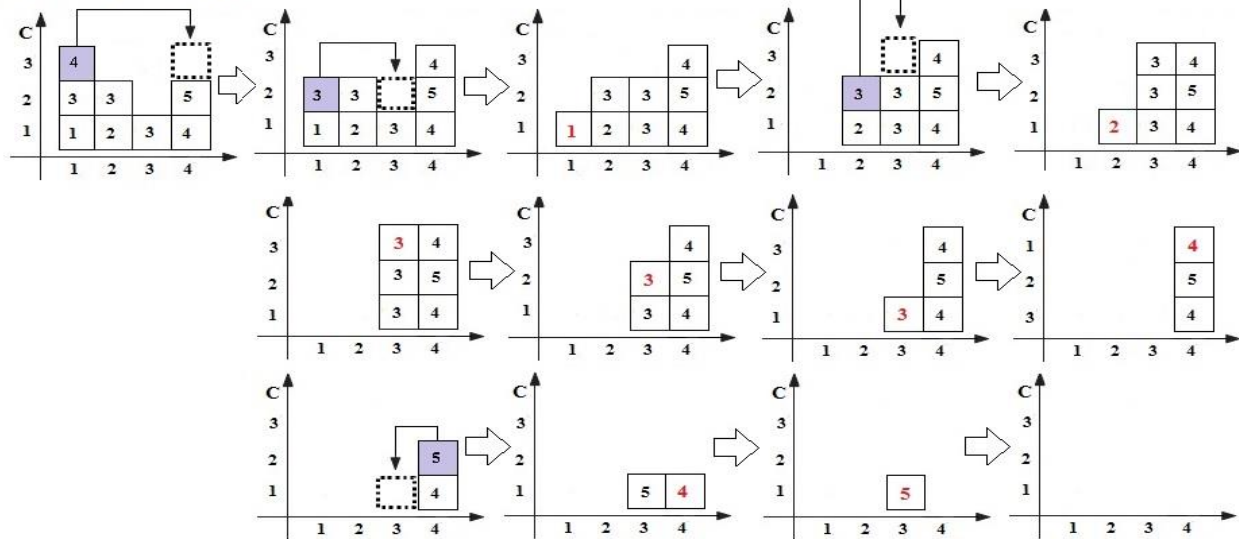


FIGURA 23: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt6.

Fonte: Elaboração própria.

Regra Rt7: Nesta regra, a matriz é percorrida da mesma forma que na regra Rt5, porém, verificando se a posição selecionada para remanejar um contêiner encontra-se imediatamente acima de um contêiner que será retirado antes dele (vide figura 24).

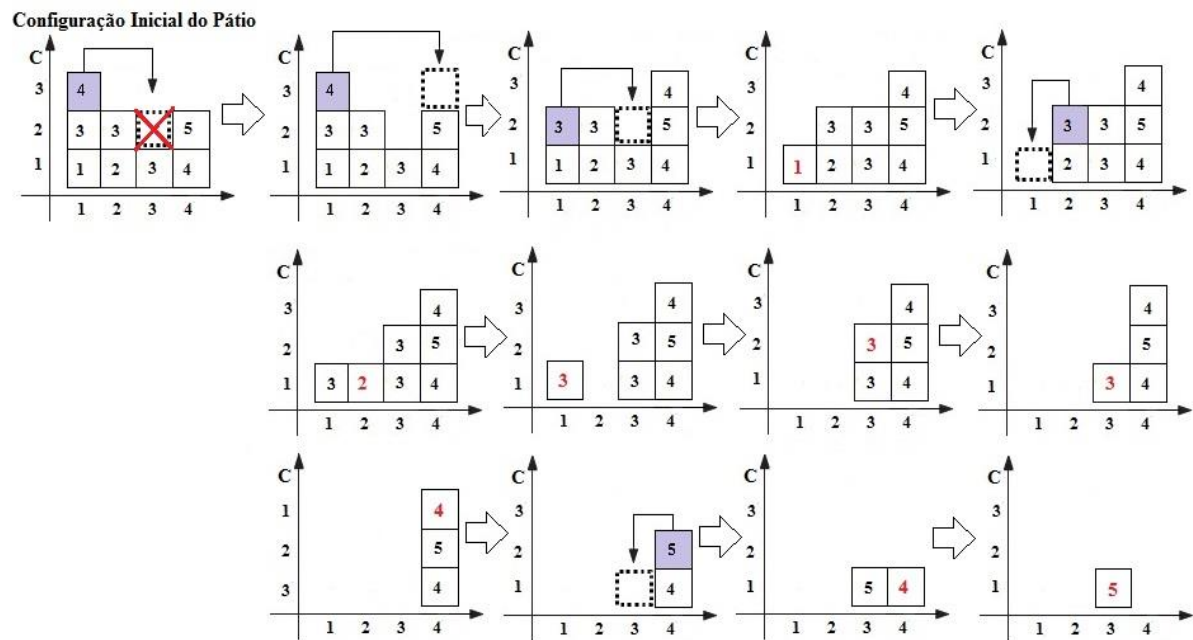


FIGURA 24: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt7.

Fonte: Elaboração própria.

Regra Rt8: Nesta regra, a matriz é percorrida da mesma forma que na regra Rt6, porém, verificando se a posição selecionada para remanejar um contêiner encontra-se imediatamente acima de um contêiner que será retirado antes dele (vide figura 25).

Configuração Inicial do Pátio

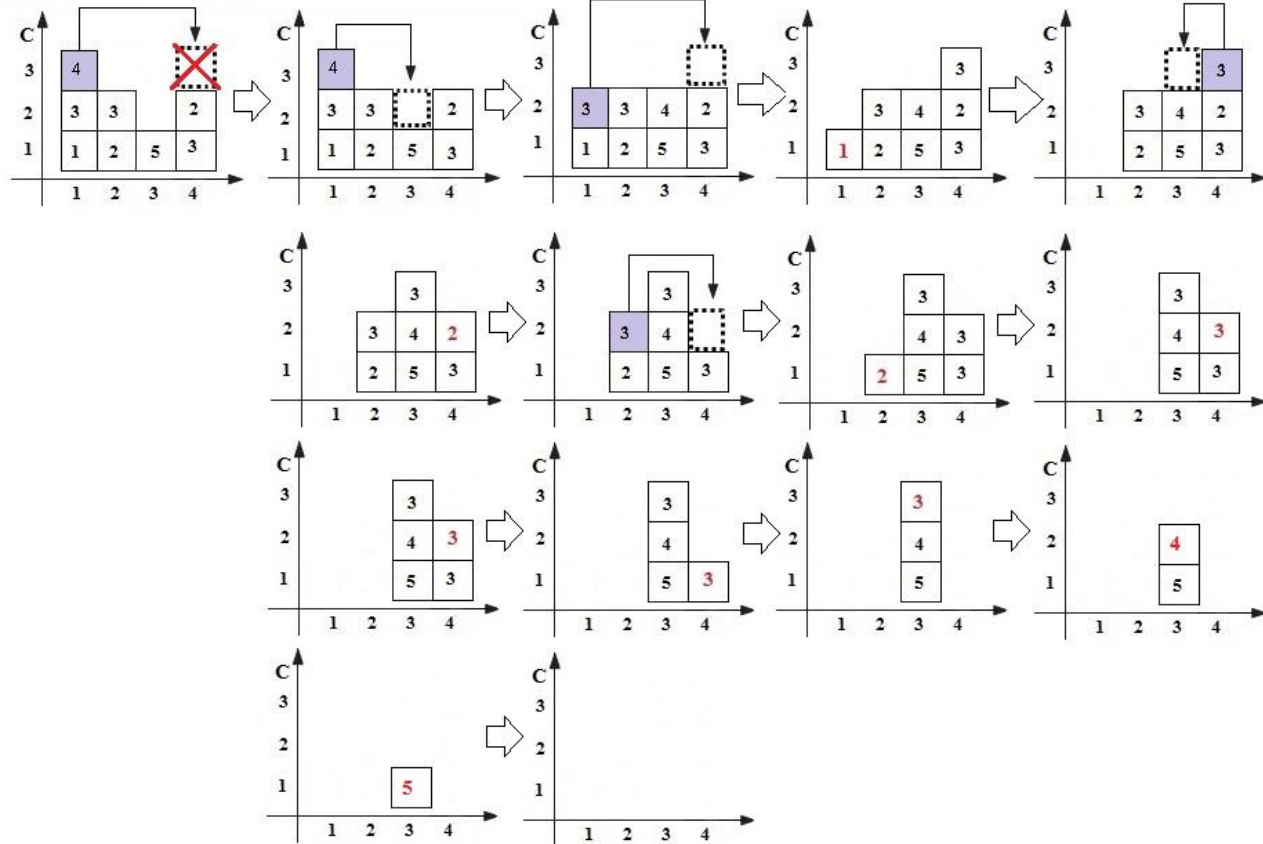


FIGURA 25: Sequência de movimentação dos contêineres no pátio com a regra Rt8.

Fonte: Elaboração própria.

Ao final da utilização das regras R_t , é gerado um vetor T com as informações do porto j de destino (matriz de transporte) que é utilizado pelas regras de carregamento do navio (R_c).

A seguir é demonstrada a forma na qual as regras do pátio e do navio são integradas para que sejam utilizadas pelo programa de simulação.

5.5 Integração das Regras

O programa de simulação integrado ao algoritmo genético permite avaliar para uma dada sequência de regras qual será o número de movimentos a serem realizados no navio e no pátio ao longo de N portos.

Dessa forma, para que as regras sejam utilizadas pelo programa de simulação elas precisam ser combinadas em um conjunto de regras de decisão, chamado de Re_j .

Logo, conforme descrito nas seções 5.2.1, 5.2.2 e 5.4.1, foram criadas oito regras para retirada do pátio ($Rt_1, Rt_2, Rt_3, Rt_4, Rt_5, Rt_6, Rt_7$ e Rt_8), quatro para o carregamento (Rc_1, Rc_2, Rc_3, Rc_4) e duas para o descarregamento (Rd_1, Rd_2), que combinadas geram 64 regras de decisão Re_j . A figura 26, a seguir, deixa essa ideia mais clara.

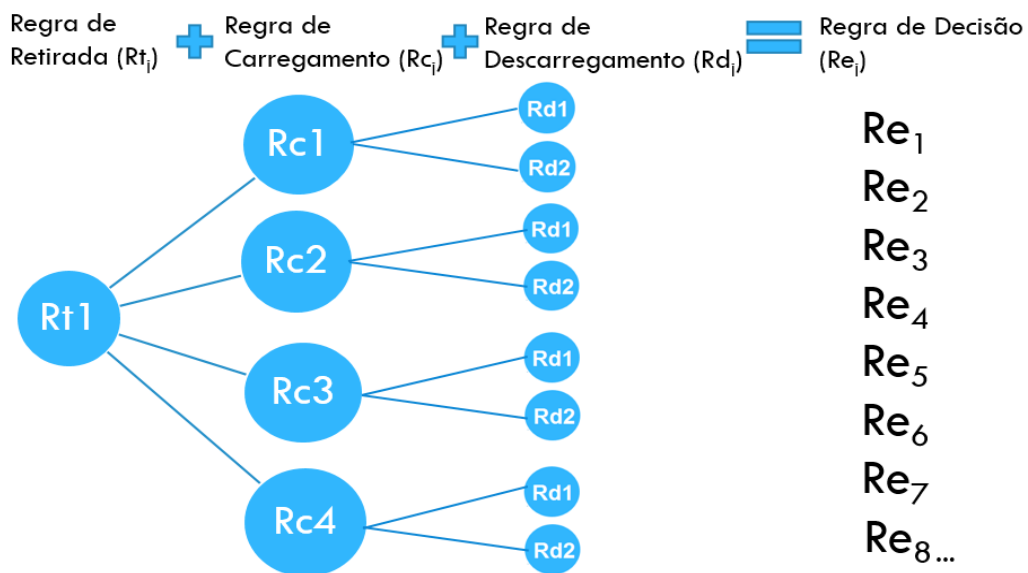


FIGURA 26: Integração das regras de retirada, carregamento e descarregamento em uma única regra de decisão Re_j . Fonte: Elaboração própria.

As Tabelas de 1 a 3, mostradas a seguir, fornecem as 64 regras Re_j a serem utilizadas nos portos p . A aplicação das regras Re_j em cada porto p , vai atualizar a matriz de ocupação B no porto p . Vale lembrar que, inicialmente, no porto 1, a matriz B tem todos elementos iguais a zero.

TABELA 1: Regras Re_j a serem utilizadas em cada porto p – Parte1

Regra de retirada	Rt1	Rt1	Rt1	Rt1	Rt1	Rt1	Rt1	Rt1	Rt2	Rt2	Rt2	Rt2	Rt2	Rt2	Rt2	Rt2
Regra de carregamento	Rc1	Rc1	Rc2	Rc2	Rc3	Rc3	Rc4	Rc4	Rc1	Rc1	Rc2	Rc2	Rc3	Rc3	Rc4	Rc4
Regra de descarregamento	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2
Regra Re_k usada no porto p	Re_1	Re_2	Re_3	Re_4	Re_5	Re_6	Re_7	Re_8	Re_9	Re_{10}	Re_{11}	Re_{12}	Re_{13}	Re_{14}	Re_{15}	Re_{16}

Fonte: Elaboração própria.

TABELA 2: Regras Re_j a serem utilizadas em cada porto p – Parte2

Regra de retirada	Rt3	Rt3	Rt3	Rt3	Rt3	Rt3	Rt3	Rt3	Rt4	Rt4	Rt4	Rt4	Rt4	Rt4	Rt4	Rt4
Regra de carregamento	Rc1	Rc1	Rc2	Rc2	Rc3	Rc3	Rc4	Rc4	Rc1	Rc1	Rc2	Rc2	Rc3	Rc3	Rc4	Rc4
Regra de descarregamento	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2
Regra Re_k usada no porto p	Re_{17}	Re_{18}	Re_{19}	Re_{20}	Re_{21}	Re_{22}	Re_{23}	Re_{24}	Re_{25}	Re_{26}	Re_{27}	Re_{28}	Re_{29}	Re_{30}	Re_{31}	Re_{32}

Fonte: Elaboração própria.

TABELA 3: Regras Re_j a serem utilizadas em cada porto p – Parte3

Regra de retirada	Rt5	Rt5	Rt5	Rt5	Rt5	Rt5	Rt5	Rt5	Rt6	Rt6	Rt6	Rt6	Rt6	Rt6	Rt6	Rt6
Regra de carregamento	Rc1	Rc1	Rc2	Rc2	Rc3	Rc3	Rc4	Rc4	Rc1	Rc1	Rc2	Rc2	Rc3	Rc3	Rc4	Rc4
Regra de descarregamento	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2
Regra Re_k usada no porto p	Re_{33}	Re_{34}	Re_{35}	Re_{36}	Re_{37}	Re_{38}	Re_{39}	Re_{40}	Re_{41}	Re_{42}	Re_{43}	Re_{44}	Re_{45}	Re_{46}	Re_{47}	Re_{48}

Fonte: Elaboração própria.

TABELA 4: Regras Re_j , a serem utilizadas em cada porto p – Parte4

Regra de retirada	Rt7	Rt7	Rt7	Rt7	Rt7	Rt7	Rt7	Rt7	Rt7	Rt8	Rt8	Rt8	Rt8	Rt8	Rt8	Rt8
Regra de carregamento	Rc1	Rc1	Rc2	Rc2	Rc3	Rc3	Rc4	Rc4	Rc1	Rc1	Rc2	Rc2	Rc3	Rc3	Rc4	Rc4
Regra de descarregamento	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2	Rd1	Rd2
Regra Re_k usada no porto p	Re_{49}	Re_{50}	Re_{51}	Re_{52}	Re_{53}	Re_{54}	Re_{55}	Re_{56}	Re_{57}	Re_{58}	Re_{59}	Re_{60}	Re_{61}	Re_{62}	Re_{63}	Re_{64}

Fonte: Elaboração própria.

A seguir será discutida a estrutura geral do Algoritmo Genético e o programa de simulação contido nele.

5.6 Estrutura Geral do Algoritmo Genético

No programa de simulação utilizado neste projeto, que será descrito detalhadamente na seção 5.6.4, o conjunto de regras de retirada, carregamento e descarregamento é construído de modo a garantir que o estado da matriz B de ocupação, obtida em cada porto, seja factível. Cabe ao Algoritmo Genético apenas definir a sequência de regras que fornece o menor número de remanejamentos dos contêineres ao longo dos N portos, isto é o Algoritmo Genético fornece como resultado a matriz A que contém quais regras de carregamento, descarregamento e retirada serão utilizadas em cada em cada porto. De posse da matriz A obtém-se facilmente o número total de movimentos e assim definem-se de forma indireta os valores que as variáveis x_{ijv} assumem para cada solução.

Nas subseções a seguir é feita uma breve introdução à estrutura geral de um Algoritmo Genético para que em seguida, se possa descrever com detalhes o AG utilizado neste trabalho e o programa de simulação implementado no software Matlab 7.10.0 (R2010a).

5.6.1 Algoritmos Genéticos

Holland introduziu o conceito de algoritmos genéticos (AG) em 1975 (HOLLAND, 1975), e segundo Azevedo *et al.*, (2010), algoritmos genéticos:

“baseiam-se nos mecanismos existentes na genética e na teoria da evolução natural, onde as populações tem uma evolução aleatória. [...] Eles são uma classe de métodos de busca de propósito geral, pois tentam estabelecer um equilíbrio entre dois objetivos aparentemente conflitantes: o aproveitamento das melhores soluções e a exploração do espaço de busca (*exploitation x exploration*). Por esta razão o Algoritmo Genético pode ser aplicado a problemas combinatórios, tal como PCCTP, cuja dimensão inviabiliza a solução por métodos exatos.”

A figura 27, a seguir, mostra a estrutura geral do Algoritmo Genético, segundo Michalewicz (1996).

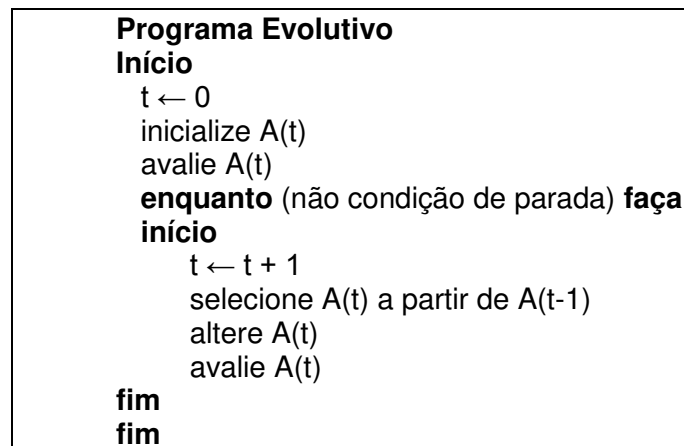


FIGURA 27: Estrutura geral de um algoritmo genético. Fonte: AZEVEDO *et al.* (2010).

O AG possui as seguintes etapas: inicialização, avaliação, seleção, cruzamento, mutação, atualização e finalização, que são descritas a seguir.

Na inicialização é gerada uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos. Cada indivíduo desta população possui um código genético, chamado de cromossomo, que representa as possíveis soluções do problema. Para representá-lo é necessário definir sua codificação genética, que varia de acordo com o problema.

Esquemas de codificação são importantes porque fornecem uma maneira de traduzir o conhecimento específico do problema diretamente no framework do AG, e assim, desempenham um papel fundamental na determinação do seu desempenho (MELIN e CASTILLO, 2005). Na seção 5.6.3 é detalhado o esquema de codificação dos cromossomos deste projeto.

Na sequência, esta população é avaliada por meio de um mecanismo de seleção. Nessa etapa, a aptidão de cada indivíduo, chamada de fitness, é medida e somente os indivíduos mais aptos (os mais próximos da solução ótima) serão mantidos na nova população. Alguns mecanismos de seleção são: ranqueamento, roleta, torneio e amostragem universal estocástica. Na seção 5.6.5 é detalhado o mecanismo de seleção utilizado neste projeto.

Os membros mantidos pela seleção podem sofrer modificações em suas características através de operadores genéticos, como mutação e cruzamento. O princípio básico é transformar a população através de sucessivas gerações, estendendo a busca até chegar a um resultado satisfatório.

Segundo Reeves (2003), não há razão para supor que o cruzamento seja sempre utilizado. Dessa forma, pode-se seguir uma estratégia de cruzamento-e-mutação, ou de cruzamento-ou-mutação. Neste projeto, ambos cruzamento e mutação são utilizados.

No caso do cruzamento, é utilizado o operador 'taxa de cruzamento', que seleciona dois indivíduos pais e determina um 'ponto de corte' no código genético dos mesmos. Em seguida, é feita uma troca de genes entre estes dois indivíduos, alterando seus códigos genéticos e assim criando novos indivíduos. O objetivo do cruzamento é explorar o potencial da população atual, na esperança de manter as características boas

da geração anterior ao criar indivíduos novos (MELIN e CASTILLO, 2005). A figura a seguir detalha dois métodos diferentes de cruzamento: com um ponto de corte, e com dois pontos de corte.

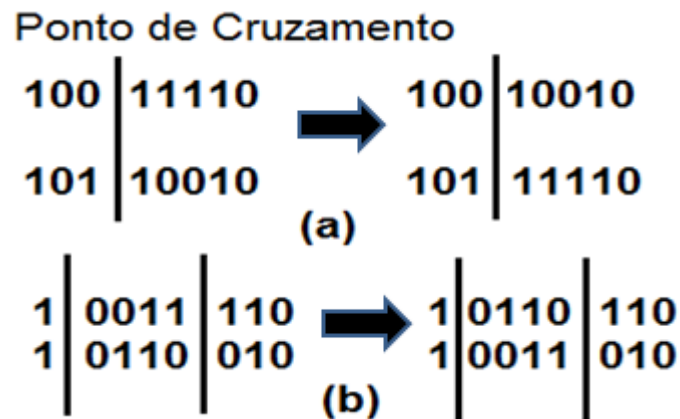


FIGURA 28: Operadores de Cruzamento: (a) cruzamento com um ponto de corte; (b) cruzamento com dois pontos de corte. Fonte: Adaptado de MELIN e CASTILLO (2005)

Aqui, o método de cruzamento utilizado é o de um ponto de corte.

Enquanto o cruzamento cria novos indivíduos através da combinação de dois ou mais indivíduos, a mutação cria novos indivíduos através de pequenas modificações nos genes de um único indivíduo. Com isso, o objetivo da mutação é, ao diversificar a população, percorrer novos pontos do espaço de busca e contornar mínimos locais. Normalmente, a taxa de mutação é pequena, abaixo de 0,1 (Melin e Castillo), pois caso contrário a população será diversificada de forma exagerada.

A escolha do gene a ser modificado pela mutação pode ser feita de diversas maneiras. O jeito mais comum é trocar um bit com probabilidade mais próxima da taxa de mutação (MELIN e CASTILLO, 2005), entretanto, o correto, levando-se em consideração o tempo computacional consumido, seria desenhar uma variação aleatória de uma distribuição Poisson com um parâmetro λ , onde λ seria o número médio de alterações por cromossomo (REEVES, 2003). A figura a seguir mostra um exemplo de

mutação.

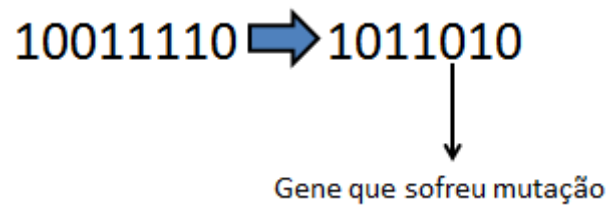


FIGURA 29: Operador de Mutação. Fonte: Adaptado de MELIN e CASTILLO (2005).

Após um número de gerações, a condição de parada deve ser atendida, seja porque existe, na população, um indivíduo que represente uma solução aceitável para o problema, seja porque o número máximo de gerações foi atingido.

5.6.2 Função Objetivo e Inicialização

A função que emprega o algoritmo genético possui os seguintes argumentos de entrada:

nr – número de linhas do navio;

nc – número de colunas do navio;

np – número de portos a ser percorrido pelo navio;

T – matriz de transporte do navio, que indica o número de contêineres com origem no porto i e destino em j que devem ser carregados;

patio – matriz de células do tamanho $npx1$, onde cada célula contém o pátio de um porto que o navio percorre.

Lbound – número da primeira regra, no caso, 1.

Ubound – número da última regra, no caso, 64.

Além disso, são utilizados os seguintes parâmetros:

POPSIZE = 10, tamanho da população;

MAXGENS = 200, número máximo de gerações;

PXOVER = 0.8, probabilidade de cruzamento;

PMUTATION = 0.15, probabilidade de mutação;

generation = 0, número inicial de gerações;

NVARS = np -1, número de variáveis.

5.6.3 Esquema de Codificação

A codificação empregada para a representação do cromossomo (indivíduo) é feita por meio de um vetor S , cujo elemento $s[j]$ de valor igual a k indica qual regra de decisão Re_j será utilizada no porto j (Tabelas de 1 a 4). Na figura 30 é apresentado um exemplo de codificação de um cromossomo para uma rota constituída de 3 portos.

P1	31
P2	2
P3	15
P4	60

} S

FIGURA 30: Codificação do cromossomo. Fonte: Adaptado de AZEVEDO *et al.* (2010).

Cada cromossomo irá representar uma solução para o problema. Então, no exemplo da figura acima, tem-se que no porto 1, foi utilizada a regra $Re_j = 31$, no porto 2 a regra $Re_j = 2$ e no porto 3 a regra $Re_j = 15$. Nota-se que a codificação utilizada emprega a representação por números inteiros, assim como os demais os demais operadores.

Com isto os indivíduos são codificados em uma notação compacta que sempre fornece soluções factíveis. Deste modo, uma população com b indivíduos (soluções), pode ser armazenada em uma matriz A de dimensão $[(Np-1)*b]$, onde np é o número de portos e b , representa a quantidade de melhores soluções que serão guardadas. De modo geral pode-se adotar b como sendo igual a cem. Então, cada coluna da matriz representa uma solução (indivíduo) para o problema PCCTP. Assim, cada elemento $A[i,s]$ da matriz A , representa a decisão tomada de se aplicar a regra k no porto i para o indivíduo (solução) s . Então se $A[1,1]=7$, significa que a regra q foi utilizada no porto 1 para o indivíduo 1, se $A[2,1]=17$ significa que a regra 17 foi utilizada no porto 2 pelo indivíduo 1, e assim por diante. Observe então que cada coluna de A é formada por vetores S . A figura 31, a seguir, mostra a matriz A , para um exemplo com quatro portos. Note que o porto 4 não precisa ser representado na matriz A , pois este é o último porto então a regra utilizada não irá interferir no resultado.

	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5
Porto 1	31	2	64	7	48
Porto 2	11	1	13	21	13
Porto 3	2	20	57	1	12




FIGURA 31: Representação das b melhores soluções de uma população de 5 indivíduos através de matriz. Fonte: Adaptado de AZEVEDO *et al.* (2010).

5.6.4 Programa de Simulação

O processo de avaliação de uma solução s combina avaliação das regras com a simulação do estado do navio após a aplicação de cada regra, ao longo dos portos. Dessa forma, primeiramente será exposto o processo de simulação e depois o método de avaliação das soluções obtidas através da simulação.

A figura a seguir esclarece como o processo de simulação ocorre dentro do algoritmo genético.

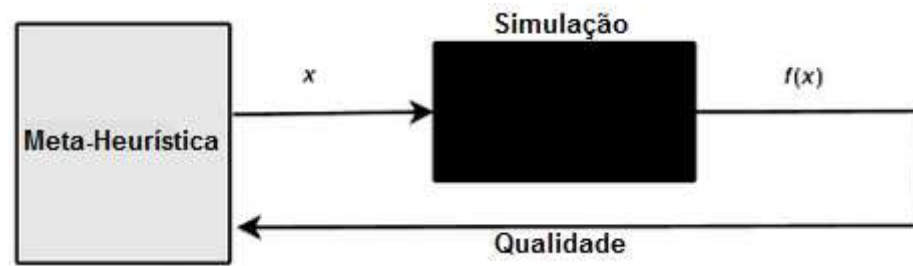


FIGURA 32: Cenário de Caixa-Preta para a Função Objetivo. Fonte: Adaptado de TALBI (2009)

Na simulação, não há avaliação analítica da função objetivo. Esta é feita pelo algoritmo genético.

Sendo assim, a simulação sempre começa no porto 1, com número de movimentos igual a zero e roda até que o navio chegue ao último porto.

O primeiro passo da simulação é extrair a regra Re_j do primeiro gene da primeira solução S contida na população inicial (matriz A). Essa função traduz a regra Re_j nas regras de retirada (Rt), carregamento (Rc) e descarregamento (Rd) conforme descrito das tabelas de 1 a 4 na seção 5.5.

Com as regras em mãos, é verificado em qual porto o navio está. Caso esteja no primeiro porto não há operação de descarregamento, uma vez que o navio está vazio. Por conseguinte, os contêineres do pátio com destino àquele navio são retirados e embarcados no navio.

Terminada todas as operações do primeiro porto, é extraída a regra Re_j do segundo gene da mesma solução S , que serão aplicadas no pátio do segundo porto e nas matrizes de ocupação B atualizadas. A partir do segundo porto até o penúltimo porto, a sequência de operações é: descarregamento do navio – retirada do pátio – carregamento do navio. Obviamente, os contêineres que são descarregados são somente aqueles com destino àquele porto, assim como os que são retirados do pátio e embarcados no navio são somente os contêineres com destino àquele navio. No último porto somente a operação de descarregamento é efetuada e o navio fica vazio novamente.

Depois de cada operação é retornado o número de movimentos realizados. O número de movimentos realizados durante toda a viagem do navio, considerando as operações de retirada, carregamento e descarregamento, é chamado de f_k (função de aptidão do indivíduo k).

A simulação é feita para todos os indivíduos da população inicial.

A figura 33 traz o esquema do programa de simulação.

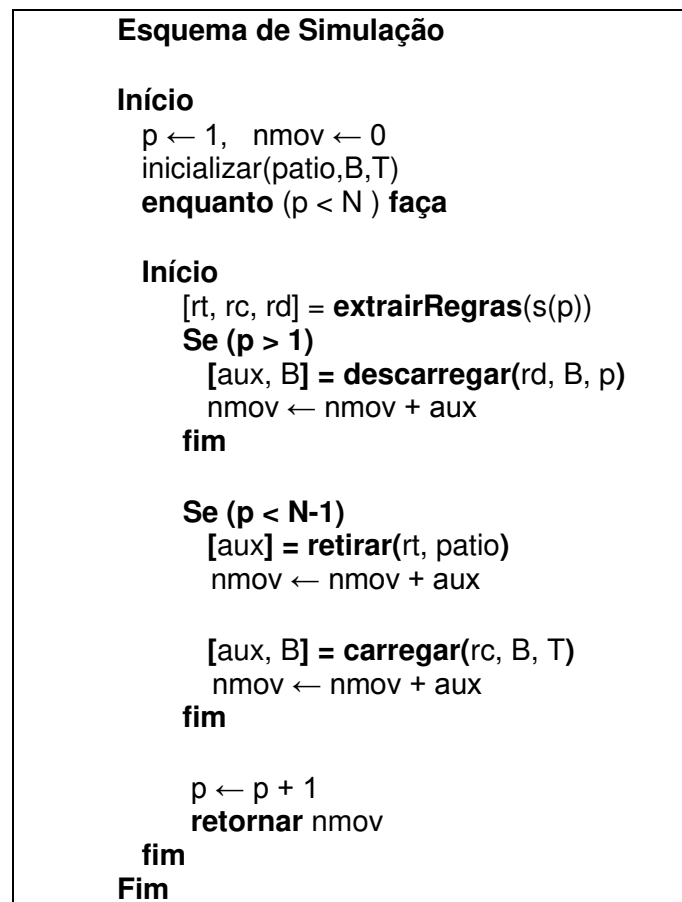


FIGURA 33: Programa de simulação para a movimentação de cargas no pátio do porto.

Fonte: Adaptado de AZEVEDO *et al.* (2011)

Os símbolos e funções empregados no algoritmo da figura 32 são descritos a seguir:

p	- variável contadora, que indica o porto atual da simulação.
patio	- matriz de células do tamanho $n \times 1$, onde cada célula contém o pátio de um porto que o navio percorre.
B	- matriz de ocupação que indica o estado do navio em cada porto i.
T	- matriz de transporte que armazena dados dos contêineres a serem carregados e descarregados no navio ao longo dos portos.
N	- número total de portos.
S	- vetor tal que o elemento $s(i)$ contém a regra k, a ser aplicada no porto i e modificar a matriz B adequadamente.
extrairRegras	- função que define a correspondência entre a regra k, contida em $s(i)$, com as regras de descarregamento e carregamento a serem armazenadas nas variáveis rd, rc e rt, respectivamente.
Nmov	- número de movimentos realizados para carregar ou descarregar o navio e o pátio ao longo dos N portos.
Rc	- variável que contém o nome da regra de carregamento a ser aplicada.
Rt	- variável que contém o nome da regra de retirada do pátio a ser aplicada.
Rd	- variável que contém o nome da regra de descarregamento a ser aplicada.
inicializar	- função que preenche a matriz B, com valores iguais a zero.
retirar	- função que aplica a regra de retirada contida em rd na matriz B no porto i, e retorna o número de movimentos realizados, e B e T atualizadas.

- descarregar - função que aplica a regra de descarregamento contida em rd na matriz B no porto i, e retorna o número de movimentos realizados, e B e T atualizadas.
- carregar - função que aplica a regra de carregamento contida em rc, na matriz B, no porto i e retorna o número de movimentos realizados e B e T atualizadas.

As funções **carregar**, **descarregar** e **retirar**, empregadas no algoritmo da figura 33, utilizam as regras descritas nas seções 5.2.1, 5.2.2 e 5.4.1, respectivamente.

A seguir é detalhado o método de avaliação das soluções obtidas através da simulação e o método de seleção das melhores soluções.

5.6.5 Método de Avaliação e Seleção

Terminada a simulação das regras contidas em um gene, tem-se o número de movimentos total e a matriz de ocupação B, que mostra o estado do navio. Quando toda a população daquela geração foi simulada, é aplicado o método de avaliação.

O que método de avaliação faz é calcular o fitness de cada solução gerada pelo simulador e garantir que as melhores soluções sejam mantidas na população pelo método de seleção.

Neste caso, uma vez que o objetivo é minimizar o número total de movimentos, para que a solução com o menor f_k seja mantida na população, o método de avaliação utiliza a seguinte função para calcular o fitness:

$$g_k = 1/(1 + f_k) \quad (14)$$

Onde f_k é a função de aptidão do indivíduo k , e é obtida somando-se os resultados das equações (1) e (13), apresentadas nos modelos matemáticos das seções 5.1 e 5.3, respectivamente.

Dessa forma, em posse do fitness de cada solução o método de seleção utilizado é a roleta. Neste método, é atribuída uma porção da roleta a cada indivíduo de acordo com seu fitness. Com isso, os indivíduos com alta aptidão possuem uma porção maior da roleta, enquanto os de aptidão mais baixa possuem uma porção menor da roleta. A probabilidade de seleção de um indivíduo proporcional ao fitness é calculada na função (15), a seguir.

$$P_k = g_k / \sum_{k=1}^n g_k \quad (15)$$

Onde n é o tamanho da população.

Calculada a porção que cada indivíduo ocupará, a roleta é girada para toda a população, e um valor aleatório entre 0 e 1 é escolhido. O indivíduo dentro deste valor é escolhido para participar da nova população. Na figura abaixo é possível visualizar um exemplo de roleta.

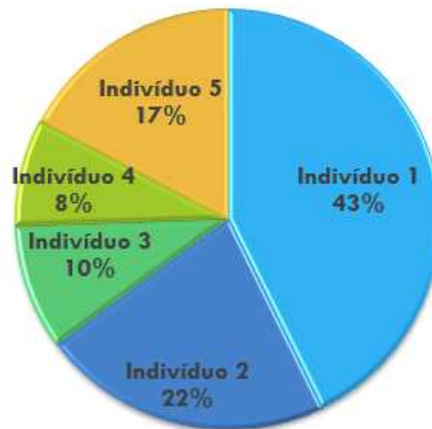


FIGURA 34: Exemplo de atribuição de uma porção da roleta a cada indivíduo de acordo com seu fitness. Fonte: Elaboração Própria.

5.6.6 Critério de Parada

Nos algoritmos genéticos, após um número de gerações, a condição de parada deve ser atendida, seja porque existe na população um indivíduo que represente uma solução aceitável para o problema, seja porque o número máximo de gerações foi atingido.

No programa de simulação descrito, o critério de parada é atendido quando o número de gerações chega a 200.

6. Resultados

A seguir são descritos os cenários de testes utilizadas para validar o método aqui proposto e os resultados obtidos com tais cenários. Esta seção está dividida em duas subseções.

Na primeira subseção serão demonstrados os cenários gerados para testar somente as regras de retirada do pátio (Rt). A justificativa para tal é que, o problema de movimentação de contêineres no pátio já é um problema em si complexo, conforme relatado na seção 4.1, Revisão Bibliográfica e demonstrado na seção 5.3, Modelo Matemático do Problema de Movimentação de Contêineres em Pátios Portuários. Além disso, as regras de retirada são uma contribuição nova deste estudo.

Na segunda subseção são descritos os cenários de teste gerados para testar o problema conjunto do plano de estiva e movimentação de contêineres em pátios portuários utilizando a metodologia descrita por toda a seção 5. E por fim, são apresentados os resultados obtidos.

6.1 Resultados dos Cenários de Teste para as Regras de Retirada (Rt)

Inicialmente, foram feitos testes individuais nas regras de retirada de contêineres do pátio com fins de avaliação de desempenho, pois dependendo da regra empregada, o número de movimentos pode ser maior ou menor.

Foram gerados aleatoriamente nove cenários contendo pátios de tamanhos variados, cujos contêineres eram destinados a cinco navios e dois portos diferentes. As tabelas 6 e 7 mostram os resultados obtidos por cada regra Rt, para cada cenário. Nela, estão identificados o cenário, o número mínimo de movimentos a serem realizados com os contêineres (*NMin*), valores da função objetivo em termos de número

total de movimentos realizados pela regra para retirar todos os contêineres do pátio (FO) e tempo computacional gasto em segundos (T).

Para o cálculo do número mínimo de movimentos, assume-se que o pátio é ideal, ou seja, é possível acessar um contêiner com apenas um movimento. Por exemplo, em um pátio de 200 contêineres, o número mínimo de movimentos é 200.

O software utilizado para os testes foi o Matlab 7.10.0 (R2010a), em um computador Intel® Core™ i5 4ª Geração 2.7 GHz, 8GB RAM, Windows 8.

TABELA 5: Resultados dos Testes Numéricos para as Regras de Retirada Rt1 a Rt4.

Regras de Retirada									
Cenário	NMin	Rt1		Rt2		Rt3		Rt4	
		FO	T	FO	T	FO	T	FO	T
1	15	20	2,45	22	2,65	20	2,27	20	2,48
2	45	71	2,58	82	2,39	67	2,51	66	2,52
3	55	83	2,83	88	2,79	79	2,40	82	2,80
4	120	235	2,79	240	2,74	218	2,75	200	2,55
5	265	535	4,19	602	5,90	497	3,91	458	3,82
6	800	1933	38,13	2019	59,95	1800	29,64	1473	23,69
7	2310	6409	372,55	6497	451,79	5887	275,53	4780	202,20
8	8420	19960	180,83	21125	2.316,84	17669	1109,70	15690	903,08
9	10973	27048	4063,33	27144	5.056,75	25974	2882,22	20968	2105,66

Fonte: Elaboração própria.

TABELA 6: Resultados dos Testes Numéricos para as Regras de Retirada Rt5 a Rt8.

Regras de Retirada									
Cenário	NMin	Rt5		Rt6		Rt7		Rt8	
		FO	T	FO	T	FO	T	FO	T
1	15	19	2,41	20	2,62	19	2,62	19	2,61
2	45	73	2,89	81	2,82	69	2,82	67	2,68
3	55	82	2,77	93	2,54	79	2,87	84	2,67
4	120	223	2,84	250	3,17	212	3,17	211	2,41
5	265	536	5,08	580	5,85	506	5,85	456	3,49
6	800	1940	44,21	2059	50,35	1751	50,35	1550	25,97
7	2310	6377	430,64	6479	453,26	5706	453,26	4533	182,67
8	8420	20002	1871,54	21000	2336,46	17727	1195,58	15433	861,63
9	10973	27037	5337,89	27148	5442,14	26166	3463,88	21336	2147,97

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados mostram que foi possível obter sequências de movimentos factíveis em todas as regras, e em tempo computacional razoável. Cenários com até 800 contêineres foram processados por todas as regras em menos de um minuto.

Na figura abaixo é possível observar a diferença de desempenho entre as regras em um cenário de teste. No caso, o número mínimo de movimentos é 8420 (linha vermelha) e a regra que ficou mais próxima disso foi a regra Rt4, com 15690 movimentos.

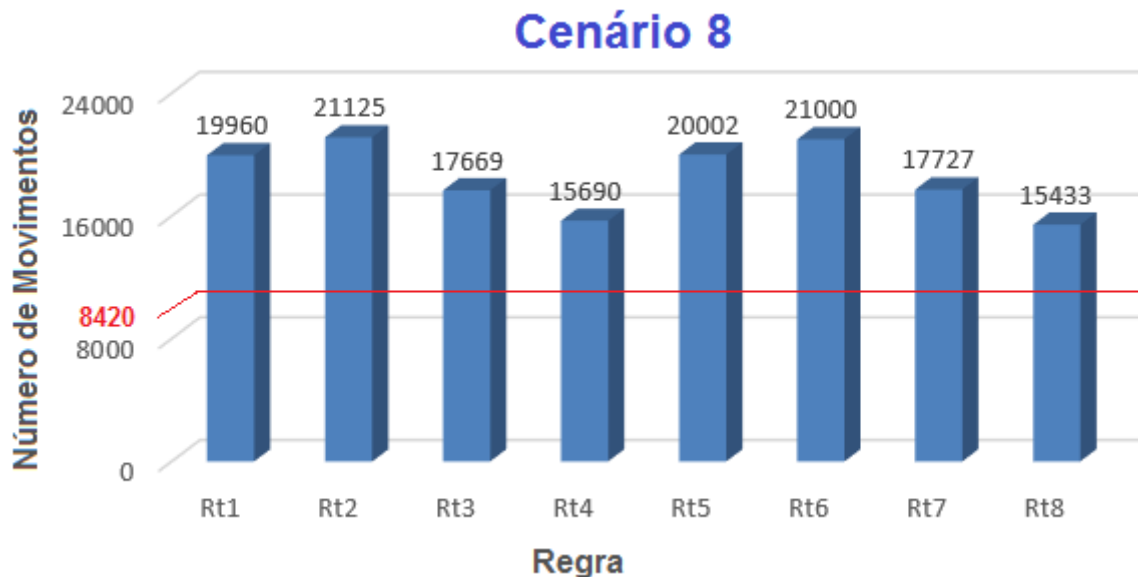


FIGURA 35: Comparação do desempenho das regras de retirada no cenário de teste 8.

Fonte: Elaboração Própria.

A tabela 7 mostra qual regra utilizou o menor número de movimentos, ou seja, a regra que teve o melhor desempenho para retirar todos os contêineres do pátio em cada um dos cenários e a média de movimentos por contêineres obtida pela mesma.

TABELA 7: Melhor Regra para Cada Cenário de Teste e Média de Movimentos por Contêineres.

Regras de Retirada				
Cenário	NMin	FO	Média	Melhor Regra
1	15	19	1,26	Rt5, Rt7 e Rt8
2	45	66	1,46	Rt4
3	55	79	1,43	Rt3, Rt7
4	120	200	1,66	Rt4
5	265	456	1,72	Rt8
6	800	1473	1,84	Rt4
7	2310	4533	1,96	Rt8
8	8420	15433	1,83	Rt8
9	10973	20968	1,91	Rt4

Fonte: Elaboração própria.

Um ponto importante acerca dos resultados obtidos é que, apesar de as regras Rt4 e Rt8 terem tido o melhor desempenho na maioria dos testes, o resultado final tem grande dependência da configuração inicial do pátio. Existe a possibilidade de, em uma configuração diferente, outra regra tenha um melhor desempenho, por isso há a necessidade de diversas regras.

Outro fato que evidencia a necessidade de diversas regras é a grande diferença entre o tempo de processamento de um mesmo cenários por regras diferentes, como por exemplo, no cenário 8, o tempo exigido pela regra Rt8 foi menos da metade do tempo exigido pela regra Rt6. Entretanto, como dito anteriormente, este resultado pode ser invertido no caso de uma configuração que favoreça a regra Rt6.

A média de movimentos realizados pela melhor regra inicialmente apresentou uma tendência de crescimento conforme o aumento na quantidade de contêineres no cenário, entretanto, no cenário 8 essa média apresentou uma redução para o nível do cenário 6, que possui 800 contêineres (Tabela 7).

Para efeitos de comparação, será utilizado o trabalho de Caserta *et al.* (2012), onde, utilizando um método heurístico, os autores fazem testes com instâncias de tamanho 10x10 e 100x100, onde cada instância está com seu espaço de armazenamento 1/3 vazia ou com duas colunas vazias. Os autores apresentam como

resultados os valores médios da função objetivo, que é minimizar o número de movimentos ao se retirar todos os ‘blocos’ da área de armazenamento, tomadas ao longo de cinco execuções. Os resultados de Caserta *et al.* (2012) são apresentados na Tabela 8.

TABELA 8: Resultados Apresentados em Caserta *et al.* (2012)

Tamanho da Pilha		Heurística		Kim e Hong, 2006	
Altura	Largura	2 vazias	1/3 vazias	2 vazias	1/3 vazias
10	10	147,4	135,0	178,6	164,1
100	100	94.131,0	76.843,8	109.782,4	91.743,5

FONTE: Adaptado de CASERTA *et al.* (2012)

Nas instâncias de tamanho 10x10 com duas colunas vazias, o valor médio da função objetivo é 147,4; e com 1/3 do espaço vazio o valor médio é de 135. Ou seja, uma média de movimentos por contêiner de 1,84 e 2,01.

Nas instâncias de tamanho 100x100, com duas colunas vazias, o valor médio da função objetivo é 94.131,3 e com 1/3 do espaço vazio o valor médio é de 76.845,8. Ou seja, uma média de movimentos por contêiner de 9,6 e 11,52, respectivamente.

Em relação ao tempo computacional, as instâncias 10x10 foram resolvidas em menos de um segundo e as instâncias 100x100 em menos de 2 segundos (CASERTA *et al.*, 2012).

Dessa forma, percebe-se que a metodologia utilizada neste estudo atingiu valores para a função objetivo notavelmente menores, apesar de o tempo computacional ter sido maior.

Adicionalmente, vale a pena ressaltar que no trabalho de Caserta *et al.* (2012), os resultados obtidos foram comparados com o trabalho de Kim e Hong (2006), onde foram obtidos médias de movimentos por contêineres ainda maiores.

A seguir são descritos os cenários de teste gerados para testar o problema conjunto do plano de estiva e movimentação de contêineres em pátios portuários e os resultados destas.

6.2 Resultados dos Cenários de Teste Para o Problema Conjunto do Plano de Estiva e Movimentação de Contêineres em Pátios Portuários

Para validação da metodologia proposta ao longo da seção 5, foram utilizados nove cenários de testes gerados aleatoriamente. Os cenários foram gerados de forma que a capacidade do navio não seja ultrapassada em nenhum porto e são classificadas de acordo com a quantidade de portos percorridos e seu tipo de matriz de transporte.

O navio simulado possui capacidade para 1482 contêineres, e todos os pátios tem dimensão de 10 linhas por 200 colunas, com uma taxa média de ocupação de 75%.

De acordo com Avriel *et al.*(1998), as matrizes de transporte são consideradas factíveis se todos os contêineres a serem embarcados não excedem a capacidade do navio em nenhum porto, conforme a seguinte função:

$$\sum_{i=1}^p \sum_{j=p+1}^N T_{ij} \leq R \times C \quad \text{para todo } p = 1, \dots, N \quad (16)$$

Onde, T_{ij} é o número de contêineres com origem no porto i e destino em j , R é o número de linhas, C é o número de colunas do navio e p é o número de portos.

Em relação as matrizes de transporte, estas podem ser de três tipos (Avriel *et al.*, 1998): 1- Mista, 2- Longa Distância e 3- Curta Distância.

Na matriz do tipo 2, os contêineres percorrem muitos portos antes de serem desembarcados, ficando em média um período relativamente longo de tempo a bordo, enquanto isso, na matriz do tipo 3, os contêineres percorrem poucos portos antes de serem desembarcados e ficam em média um curto período de tempo a bordo do navio.

Na matriz do tipo 1 são misturados elementos das matrizes do tipo 2 e 3, ou seja, existem contêineres que percorrem diversos portos antes de serem desembarcados e contêineres que percorrem poucos portos.

Os parâmetros adotados na validação do programa de simulação foram detalhados anteriormente, e a tabela 9 mostra os resultados obtidos para cada cenário de teste, onde a primeira coluna I indica o número do cenário de teste, N indica o número de portos percorridos pelo navio em cada cenário, que varia de 3 a 10 portos, M indica o tipo de matriz de transporte, sendo 1 – mista, 2- longa distância e 3 – curta distância. NMin indica o número mínimo de movimentos a serem realizados com os contêineres e FO o número de movimentos realizados pelo simulador. Em seguida são apresentados a média de movimentos realizados por contêineres (número de contêineres / número de movimentos realizados) e T, que é o tempo em horas da simulação.

Novamente o software utilizado foi o Matlab 7.10.0 (R2010a) e executado em um computador Intel Core™ i5 4ª Geração 2.7 GHz, 8GB RAM, Windows 8.

TABELA 9: Resultados das Simulações

I	N	M	NMin	FO	Média	T - horas
1	3	1	2820	4518	1,60	16,97
2	3	2	3428	5053	1,47	16,21
3	3	3	2719	4367	1,61	15,95
4	5	1	3636	4804	1,32	23,29
5	5	2	4557	8208	1,80	27,43
6	5	3	4890	7972	1,63	26,93
7	10	1	7575	14620	1,93	43,37
8	10	2	7250	16221	2,24	45,63
9	10	3	7533	13566	1,80	46,37

Fonte: Elaboração Própria

A observação mais importante em relação aos resultados obtidos é referente ao aumento da complexidade do problema quando o pátio é incluído na simulação. Em Azevedo *et al.* (2011), considerando-se somente o plano de estiva, foram obtidos resultados factíveis para 30 portos em menos de 8 minutos. Incluindo a operação de retirada dos contêineres do pátio, instâncias com 10 portos demoraram mais de 40 horas para serem processadas.

Isto pode ser justificado porque, diferentemente do navio, que começa vazio e recebe os contêineres desde o começo de sua viagem seguindo alguma regra, no pátio os contêineres chegam em ordem não conhecida e são organizados de forma aleatória. A figura 36 abaixo ilustra a ocupação inicial de um pátio com contêineres destinados a 6 navios diferentes, onde cada cor representa um navio de destino, e pode ser comparada com a figura 37, que ilustra a ocupação do navio saindo do primeiro ao terceiro porto do cenário 4 e seguindo para os próximos.

Em vista disto, percebe-se que o fato do arranjo dos contêineres no pátio ser aleatório justifica o maior tempo requerido por uma regra de retirada processar um pátio em comparação ao tempo que uma regra de descarregamento ou carregamento precisam para processar um navio.

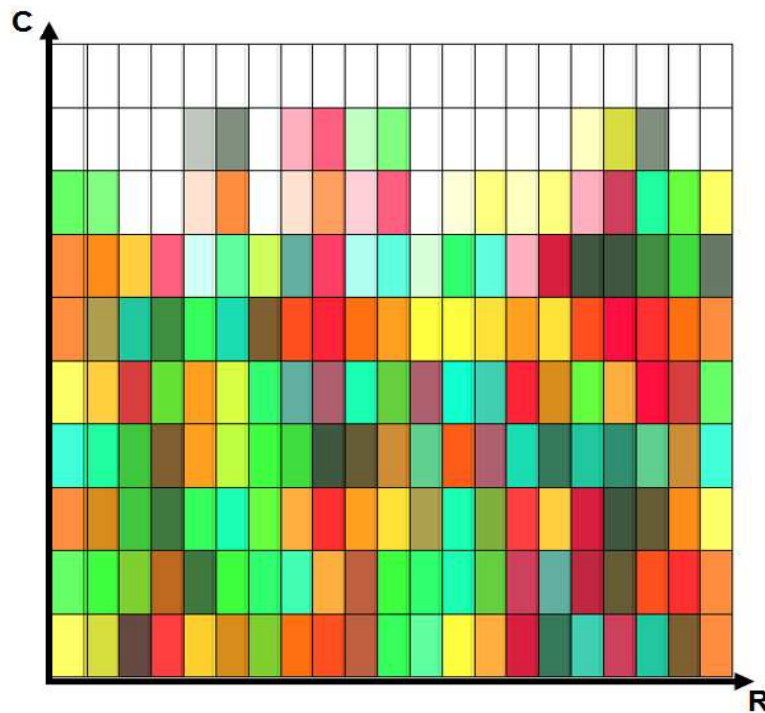


FIGURA 36: Ocupação Inicial de um Pátio. Fonte: Elaboração Própria

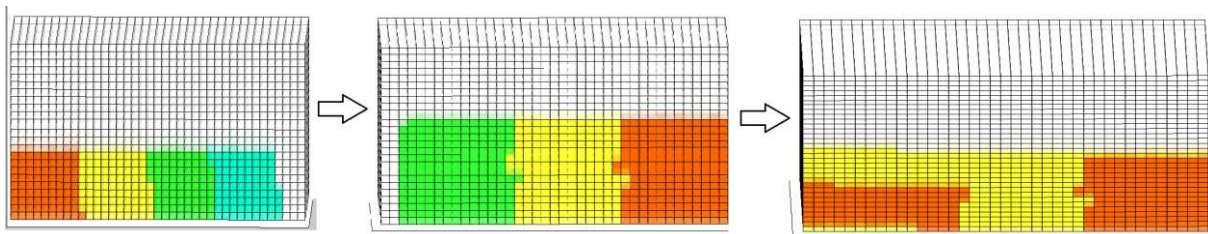


FIGURA 37: Matriz de Ocupação (B) do Navio nos Portos Um a Três no Cenário 4. Fonte: Elaboração Própria

Entretanto, apesar do tempo de processamento alto, todos os cenários de teste geraram resultados factíveis e com número de movimentos médio abaixo de 2, com exceção do cenário 8.

Para efeitos de comparação, todos os cenários foram simulados uma segunda vez, mas com os pátios planos. A vantagem do pátio plano é que o acesso a todos os contêineres é feito com somente um movimento.

Este é um estudo importante no sentido de se verificar a necessidade do acoplamento entre os problemas do PCCTP e o arranjo dos contêineres no pátio. Neste experimento é possível inferir como a consideração do pátio no problema pode afetar o arranjo dos contêineres no navio. Assim, se o número de movimentos crescer significativamente quando da consideração não só do PCCTP, mas também do problema de movimentação de contêineres no pátio, então, ambos os problemas devem ser considerados em conjunto.

Sendo assim, os resultados são apresentados na tabela 10, onde FO1 é o número de movimentos realizados pelo simulador com os pátios normais (objetivo 1), e FO2 é o número de movimentos realizados pelo simulador com os pátios planos (objetivo 2). MovMédia1 é a média de movimentos realizados por contêineres (número de contêineres / número de movimentos realizados) para o objetivo 1 e MovMédia2 para o objetivo 2 e T1 e T2 são os tempos computacionais em horas para os objetivos 1 e 2, respectivamente.

TABELA 10: Resultado das Simulações - Comparação com Pátio Plano

I	N	M	Nmin	FO1	FO2	MovMédia1	MovMédia2	T1	T2
1	3	1	2820	4518	2194	1,602	1,285	16,97	0,06
2	3	2	3428	5053	3889	1,474	1,134	16,21	0,06
3	3	3	2719	4367	3291	1,606	1,210	15,95	0,07
4	5	1	3636	4804	3911	1,321	1,076	23,29	0,10
5	5	2	4557	8208	5788	1,801	1,270	27,43	0,27
6	5	3	4890	7972	5510	1,630	1,127	26,93	0,18
7	10	1	7575	14620	9057	1,930	1,196	43,37	0,46
8	10	2	7250	16221	10743	2,237	1,482	45,63	0,46
9	10	3	7533	13566	7985	1,801	1,060	46,37	0,35

Fonte: Elaboração Própria

Pelos resultados obtidos, percebe-se que, ao assumir-se que o pátio é plano, a complexidade do problema é reduzida consideravelmente, fazendo com que o número de movimentos realizados seja muito mais próximo do ótimo. O tempo

computacional gasto para o processamento dos cenários com pátio plano também foi reduzido drasticamente.

Assim sendo, pode-se concluir mais uma vez que a consideração do pátio para elaborar o plano de estiva do navio incrementa substancialmente a complexidade do problema.

Adicionalmente, a consideração do pátio no problema pode afetar o arranjo dos contêineres no navio, conforme ilustrado na figura 38, que mostra a ocupação do navio durante a execução do cenário 4 com pátios planos. Nota-se um arranjo diferente da figura 37.

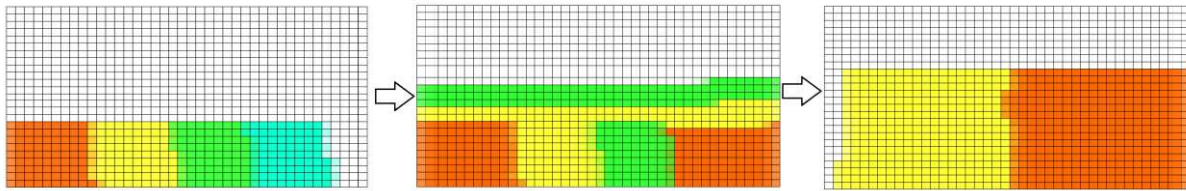


FIGURA 38: Matriz de Ocupação (B) do Navio nos Portos Um a Três no Cenário 4 com Pátios Planos. Fonte: Elaboração Própria.

A seguir são apresentadas as conclusões deste estudo e sugestões para trabalhos futuros.

7. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou a adaptação da metodologia baseada em representação por regras, empregada com sucesso no problema do PCCTP em Azevedo *et al.* (2011), para o problema de movimentação de contêineres no pátio portuário e sua integração com o problema de carregamento do navio, com o objetivo de reduzir o número de movimentos durante tais operações.

Como contribuição adicional deste trabalho foram desenvolvidas e testadas regras de retirada de contêineres do pátio e foram feitos testes individuais que tiveram como objetivo validar o funcionamento de tais regras, posteriormente incluídas no programa de simulação descrito na seção 5.6.4.

Ao comparar os resultados obtidos com os resultados de Azevedo *et al.* (2011), foi possível comprovar o aumento da complexidade do problema quando o pátio é incluído na simulação. Além disso, foi constatado que consideração do pátio no problema também pode afetar o arranjo dos contêineres no navio, evidenciando a importância da modelagem e otimização conjunta dos dois problemas.

Além disso, acredita-se que foi possível reduzir a quantidade de informações necessárias para se representar a tomada de decisões, uma vez a resolução dos exemplos deste trabalho por um modelo matemático não seria possível em tempo computacional viável.

E por fim, apesar do aumento da complexidade do problema, foi possível obter sequências de movimentos factíveis tanto no pátio quanto no navio e reduzir o número de movimentos desnecessários durante as operações de carregamento e descarregamento de contêineres para um dado plano de estiva e sua correspondente movimentação no pátio.

Futuramente, como o objetivo de diminuir o tempo computacional exigido para a execução das instâncias propostas, pretende-se fazer uso do simulador em outras

linguagens de programação, como C.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAC). *Anuário Estatístico Aquaviário*. >. Acessado em 11/01/2014. Disponível em <<http://www.antaq.gov.br/porta/Anuarios/Anuario2013/index.htm>>.
- AMBROSINO, D.; SCIOMACHEN A.; TANFANI, E. Stowing a containership: The Master Bay Plan problem. *Transportation Research Part A*, 81–99, 2004
- AMBROSINO, D.; SCIOMACHEN A.; TANFANI, E. A decomposition heuristics for the container ship stowage problem. *J. Heuristics*, v.12, p. 211–233, 2006.
- AVRIEL, M.; PENN, M. Container ship stowage problem. *Computers and Industrial Engineering*, v. 25, p. 271-274, 1993.
- AVRIEL, M.; PENN, M., SHPIRER, N., & WITTEBOON, S. Stowage planning for container ships to reduce the number of shifts. *Annals of Operations Research*, 76 , 55-71, 1998
- AVRIEL, M.; PENN, M.; SHPIRER, N. Container ship stowage problem: Complexity and connection to the coloring of circle graphs. *Discrete Applied Mathematics*, 103, 271-279, 2000
- AZEVEDO, A. T.; RIBEIRO, C. M.; DEUS, N. M. Resolução do Problema de Carregamento e Descarregamento de Contêineres em Terminais Portuários via Algoritmo Genético. *INGEPRO – Inovação, Gestão e Produção*, 02, 10, 2010
- AZEVEDO, A. T.; RIBEIRO, C. M.; NETO, L. L. S.; SILVA, M. P. E.; SILVESTRE, M. C. Resolução do problema de carregamento e descarregamento 3D de contêineres em terminais portuários, via representação por regras e algoritmo genético. *GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas* – Ano 6, nº 4, 91-110, Out-Dez/2011.
- AZEVEDO, A. T.; RIBEIRO, C. M.; SENA, G.J.; CHAVES, A.A.; SALLES, L.L.; MORETTI, A.C. Solving the 3D Container Ship Loading Planning Problem by Representation by Rules and Beam Search. *In ICORES*. 12, 132-141, 2012.

BANDEIRA, D. L. Alocação e Movimentação de Contêineres Vazios e Cheios – Um Modelo Integrado e Sua Aplicação. 2005. 124 p. Tese (Doutorado em Administração). Escola de Administração. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/6048?locale=pt_BR>.

BAZZAZI, M.; SAFAEI, N.; JAVADIAN, N. A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal. *Computers & Industrial Engineering*. 56: 44-52, 2009.

BERNHOFEN, D. M.; EL-SAHLI, Z.; KNELLER, R. Estimating the effects of the container revolution on world trade. *CESifo Working Paper*. CESifo, Center for Economic Studies and Ifo Institute. Series 4136. Munich. 2013

BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in combinatorial optimization overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, v. 35, n. 3, p. 268 -308, 2003.

BORGMAN, B.; ASPEREN, E.; DEKKER, R. Online Rules for Container Stacking. *Operations Research Spectrum*, 32:687–716, 2010.

CARLO, H.J.; VIS, I.F.A.; ROODBERGEN, K.J. Storage yard operations in container terminals: Literature overview trends, and research directions. *European Journal of Operational Research* 235 412–430, 2014.

CASERTA, M.; SCHWARZE, S.; VOSS, S. A mathematical formulation and complexity consideration for blocks relocation problem. *European Journal of Operational Research*, 219 96-104, 2012.

CASTILHO, B.D.; DAGANZO, C.F.. Handling strategies for import containers at marine terminals. *Transportation Research B* 27B/2 151±166, 1993.

CHEN, L.; LU, Z. The storage location assignment problem for outbound containers in a maritime terminal. *Int. J. Production Economics*, 135, 73 - 80, 2012.

CUDAHY, B. J., Box Boats: How Container Ships Changed the World. First Edition. *Fordham University Press*. 2006. Acessado em 28/01/2014. Disponível em <<http://books.google.com.br/books?hl=pt->

BR&lr=&id=42zZ6NrWmJEC&oi=fnd&pg=PR7&dq=+Box+Boats:+How+Container+Ships
+Changed+the+World&ots=L7eeusZM5L&sig=ktpoy2ZLKDGmi2Rqevsa-
l6A_BA#v=onepage&q&f=false>

CUDAHY, B. J., The Containership Revolution - Malcom McLean's 1956 Innovation Goes Global. 2006. *The Transportation Research Board of the U.S. National Academies of Sciences published*. Acessado em 26/01/2014. Disponível em <http://www.worldshipping.org/pdf/container_ship_revolution.pdf>.

Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering (DSME). Disponível em <<http://www.dsme.co.kr/epub/main/index.do>>. Acessado em 14/03/2014. Às 14h43min.

DELGADO, A.; JENSEN, R. M.; JANSTRUP, K.; ROSE, T. H.; ANDERSEN, K. H. A Constraint Programming model for fast optimal stowage of container vessel bays. *European Journal of Operational Research*, 251–261, 2012.

DUBROVSKY, O.; LEVITIN, G.; PENN, M. A Genetic Algorithm with a Compact Solution Encoding for the Container Ship Stowage Problem. *Journal of Heuristics*, 585–599, 2002.

FITZGERALD, D. A History of Containerization in the California Maritime Industry: The Case of San Francisco. 1986. *University of California, Santa Barbara Publication Info: Research Theses and Dissertations, California Sea Grant College Program, UC San Diego*. Acessado em 28/01/2014. Disponível em: <<http://escholarship.org/uc/item/02k7415n#page-12>>

GAGLIARDI, J-P., RENAUD, J., RUIZ, A., A Simulation Modeling Framework of Multiple-Aisles Automated Storage and Retrieval Systems, *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 1-15, 2012.

GOLDRATT, E.; COX, J. A meta: Um Processo de Aprimoramento Contínuo. 2.ed. São Paulo. Educator. (2ª ed.). São Paulo: Educator, 1996.

GUAN, Y.; YANG, K-H.; ZHOU, Z. The Crane Scheduling: models and solution approaches, *Annals of Operations Research*, 203: 119-139, 2013.

- HAN, Y.; LEE, H. L.; CHEW, E. P.; TAN, C. K. A yard storage strategy for minimizing traffic congestion in a marine container transshipment hub. *OR Spectrum* 30: 697-720, 2008.
- HOLLAND, J. H., Adaptation in natural and artificial systems. *The University of Michigan Press*, 1975.
- IMAI, A.; SASAKI, K.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks. *European Journal of Operational Research*, 171, 373 - 389, 2006.
- JEONG, Y.-H.; KIM, K.; WOO, Y.; SEO, B. A Simulation Study on a Workload-based Operation Planning Method in Container Terminals. *Industrial Engineering & Management Systems*, 11, 103-113, 2012.
- JIANG, X.; LEE, L. H.; CHEW, E. P.; HAN, Y.; TAN, K. C. A container yard storage strategy for improving land utilization and operation efficiency in a transshipment hub port. *European Journal of Operational Research*. 221:64-73, 2012.
- KANG, J.; RYU, K.; KIM, K. Deriving stacking strategies for export containers with uncertain weight information. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17: 399–410, 2006.
- Kim, K.H.; Hong, G.P. A heuristic rule for relocating blocks. *Computers and Operations Research* 33, 940–954, 2006.
- KIM, K. H.; PARK, K. T. A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers. *European Journal of Operational Research* 148 92–101, 2003.
- KIM, K. H.; PARK, Y. M.; RYU, K.-R.. Deriving decision rules to locate export containers in container yard. *European Journal of Operational Research*, 124 89–101, 2000.
- LEE, Y.; LEE, Y. A heuristic for retrieving containers from a yard. *Computers & Operations Research*, 37 1139-1147, 2010.
- LEE, B. K.; KIM, .H. Optimizing the yard layout in container terminals, *OR Spectrum*, 35 (2) 363–398, 2013.

LEE, D. H.; WANG, H. Q.; MIAO, L. Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals. *Transportation Research E*, 44, 124–135, 2008.

LEVINSON, M. The Box - How the Shipping Container Made the World Smaller and the World Economy Bigger. First Edition. Princeton University Press. 2006. Acessado em 20/01/2014. Disponível em <http://books.google.com.br/books?id=ljHq6-HnW1QC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&redir_esc=y#v=onepage&q=1956&f=false>

MAURI, G. R.; OLIVEIRA, A. C. M.; LORENA, L. A. N.. Resolução do problema de alocação de berços através de uma técnica de geração de colunas. *Pesquisa Operacional*, Rio de Janeiro, v. 30, n. 3, 2010. Acessado em 28/03/2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382010000300003&lng=en&nrm=iso>

MELIN, P.; CASTILLO, O (Coaut. de). Hybrid intelligent systems for pattern recognition using soft computing: an evolutionary approach for neural networks and fuzzy systems. Berlin; Heidelberg: Springer, c2005. 272 p., il. (Studies in fuzziness and soft computing, v. 172). ISBN 9783642063251 (broch.).

MICHALEWICZ, Z. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, 3rd edition, *Springer-Verlag*, 1996.

Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior - Aprendendo a Exportar: Planejamento Estratégico – Transporte Marítimo
http://www.aprendendoaexportar.gov.br/maquinas/planejando_exp/plan_estrategico/logistica/trans_m.asp. Acessado em 02/01/2014 às 16:29.

MONACO, M.; SAMMARRA, M.; SORRENTINO, G. The Terminal-Oriented Ship Stowage Planning Problem. *European Journal of Operational Research*, 239, 256–265, 2014.

MURTY, K. G.; LIU, J.; WAN, Y.; LINN, R. A decision support system for operations in a container terminal. *Decision Support Systems*. 39 309– 332, 2005.

NISHIMURA, E., IMAI, A., PAPADIMITRIOU S. Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms. *European Journal of Operational Research*, 131, 282-292, 2001.

PRESTON, P.; KOZAN, E. An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals. *Computers & Operations Research* 28 (1) 983-995, 2001.

REEVES, C. Genetic Algorithms. In: GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G. A. (ed.). *Handbook of metaheuristics*. Boston: Kluwer Academic, 2003. 55 – 82.

SAURÍ, S.; MARTÍN, E. Space allocating strategies for improving import yard performance at marine terminals. *Transportation Research Part E*, 47 1038–1057, 2011.

SCIOMACHEN, A.; TANFANI, E. The master bay plan problem: A resolution method based on its connection to the three dimensional bin packing problem. *IMA, Journal of Management Mathematics*, 14 (3), 251–269, 2003

SCIOMACHEN, A.; TANFANI, E. A 3D-BPP Approach for optimising stowage plans and terminal productivity. *European Journal of Operational Research*, 1433–1446, 2007.

STEENKEN, D.; VOSS, S.; STAHLBOCK, R. Container terminal operation and operations research - a classification and literature review, *OR Spectrum*, 26 (1) 3–49, 2004.

STAHLBOCK, R.; VOSS, S. Operations research at container terminals: a literature update, *OR Spectrum*, 30 (1) 1–52, 2008.

TALBI, EL-GHAZALI. *Metaheuristics: from design to implementation*. Estados Unidos da América. John Wiley & Sons. Inc. 2009. 624 páginas.

TIERNEY, K.; PACINO, D., JENSEN, M. R. On the complexity of container stowage planning problems. *Discrete Applied Mathematics*, 169, 225–230, 2014.

United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), *Review of maritime transport*, 2013. Foreword.

United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), *Review of maritime transport*, 2012. Foreword.

WILSON, I.; ROACH, P. Container stowage planning: a methodology for generating computerised solutions, *Journal of the Operational Research Society*, v. 51, p. 1248-1255, 2000.

WILSON, I.; ROACH, P.; WARE, J. Container stowage pre-planning: using search to generate solution, a case of study. *Knowledge Based Systems*, 14, 137-147, 2001.

WOO, Y.; KIM, K. Estimating the space requirement for outbound container inventories in port container terminals. *Internation Journal of Production Economics*, 133, 293–301, 2011.

YANG, J.; KIM, K. A grouped storage method for minimizing relocations in block stacking systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17, 453–463, 2006.

ZENG, M.; LOW, M.; HSU, W., HUANG, S.; LIU, F.; WIN, C. A. Automated Stowage Planning for Large Containerships With Improved Safety and Stability. *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, 10, 1976 - 1989, 2010.

ZENG, Q.; YANG, Z. Integrating simulation and optimization to schedule loading operations in container terminals. *Computers & Operations Research*, 36, 1935-1944, 2009.

ZHANG, C., WAN, Y., LIU, J., LINN, R. J. Dynamic crane deployment in container storage yards. *Transportation Research Part B* 36: 537-555, 2002.

ZHANG, C.; CHEN, W.; SHI, L.; ZHENG, L. A note on deriving decision rules to locate export containers in container yards. *European Journal of Operational Research*, 205 483–485, 2010

ZHU, Y., LIM, A. Crane scheduling with non-crossing constraint, *Journal of the Operational Research Society*, 57(12), 1464–1471, 2006.