

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

FELIPPE TOSE LOPES

**MODELO MATEMÁTICO PARA O PLANEJAMENTO DE
ATRACAÇÃO DE NAVIOS *LINERS* COM POSSIBILIDADE
DE CANCELAMENTO DE ESCALA**

**VITÓRIA
2015**

FELIPPE TOSE LOPES

**MODELO MATEMÁTICO PARA O PLANEJAMENTO DE
ATRACAÇÃO DE NAVIOS *LINERS* COM POSSIBILIDADE
DE CANCELAMENTO DE ESCALA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

Coorientador: Prof. Dr. Leandro Colombi Resendo.

VITÓRIA

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

L864m Lopes, Felipe Tose, 1987-
Modelo matemático para o planejamento de atracação de navios *liners* com possibilidade de cancelamento de escala / Felipe Tose Lopes. – 2015.
83 f. : il.

Orientador: Rodrigo de Alvarenga Rosa.
Coorientador: Leandro Colombi Resendo.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Navios – Carga. 2. Logística naval. 3. Problema de roteamento de veículos. 4. Prêmios. 5. Modelos matemáticos. 6. Problema de alocação de berço (PAB). 7. Janela de tempo. I. Rosa, Rodrigo de Alvarenga. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

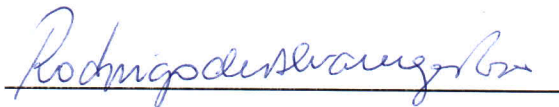
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

MODELO MATEMÁTICO PARA O PLANEJAMENTO DE
ATRACAÇÃO DE NAVIOS LINERS COM POSSIBILIDADE DE
CANCELAMENTO DE ESCALA.

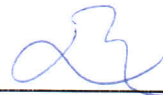
Felippe Tose Lopes

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Transportes.

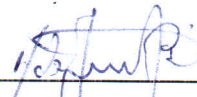
Aprovada no dia 16 de dezembro de 2015 por:



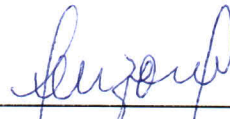
Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Doutor em Engenharia Elétrica
Orientador - UFES



Prof. Dr. Leandro Colombi Resendo
Doutor em Engenharia Elétrica
Co-orientador - IFES



Prof. Dr. Adelmo Inacio Bertoldi
Doutor em Estatística
Examinador Interno - UFES



Prof. Dr. Luciano Lessa Lorenzoni
Doutor em Engenharia Elétrica
Examinador Externo - IFES

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais Ideraldo e Vera Rita pelo incentivo e apoio. À Juliana pelo carinho e companheirismo tão importantes. À memória de meus avôs pelo exemplo de vida e honestidade.

AGRADECIMENTOS

Ao fim da jornada, um forte sentimento de gratidão se faz presente, por todos aqueles que, de alguma forma, fizeram parte dessa conquista.

Antes de tudo, sou grato a Deus, por ser minha luz e fortaleza em todos os momentos. Obrigado por me permitir alcançar mais essa vitória!

Agradeço aos meus pais, pelo incentivo que sempre me deram, pela presença, dedicação e por acreditarem no meu potencial. Aos meus irmãos pela torcida e incentivo.

À Juliana, pela cumplicidade, companheirismo e estímulo. Obrigado por fazer parte da minha vida!

Ao meu orientador, Professor Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa, por acreditar em minha capacidade e compartilhar seus conhecimentos, estando sempre ao meu lado na busca pelas melhores soluções para o desenvolvimento desse trabalho. Obrigado pela parceria, pela paciência, pela amizade, pela dedicação e doação ao desenvolvimento da pesquisa e pelos ensinamentos que levarei para sempre.

Ao meu coorientador Leandro Colombi Resendo e demais membros da banca pela disponibilidade e participação na banca examinadora dessa dissertação e contribuição com importantes sugestões e observações.

Aos amigos, professores e funcionários do PPGEC/UFES, pelas horas de estudo e de descontração compartilhadas.

Muito Obrigado!

“A descoberta consiste em ver o que todo mundo viu e pensar o que ninguém pensou.”
Albert Szent-Gyö

RESUMO

Os portos brasileiros movimentam mais de 90% das cargas internacionais do país, com destaque para a movimentação de contêineres que vem crescendo ano a ano no Brasil e já representam 10,4% de toda a carga movimentada. Os navios de contêineres são usualmente contratados pela categoria de serviço *liners*. Os navios *liners* possuem uma escala fixa de atendimento, previamente divulgada, e caso o navio não seja atracado no porto dentro do intervalo acordado de tempo entre sua chegada até sua atracação, denominado janela de atracação, ocorre uma situação chamada cancelamento de escala e o navio simplesmente não atraca no porto e segue viagem para não comprometer todas as escalas nos outros portos. Portanto, no contexto analisado, é importante disponibilizar aos portos uma ferramenta que minimize o cancelamento de escala, pois tal cancelamento impactará em perdas de receita e contratos para o porto. Para o planejamento da atracação de navios no porto, a literatura científica sugere o Problema de Alocação de Berço (PAB). Esta dissertação tem por objetivo propor um modelo matemático baseado no Problema de Roteamento de Veículos (PRV) com Prêmio, Janela de Tempo e Múltiplos Depósitos aplicado ao planejamento da atracação em portos de navios *liners* com possibilidade de cancelamento de escala, visando maximizar a receita obtida pelo atendimento aos navios e também reduzir o tempo de espera para o navio atracar. Instâncias de teste foram desenvolvidas tendo como base as características operacionais do Terminal de Vila Velha (TVV) e o modelo foi executado no CPLEX 12.6. Os resultados mostraram a eficiência do modelo proposto para planejamento da atracação em portos onde pode haver o cancelamento de escala, reduzindo o número de navios não atendidos e maximizando a receita do porto.

Palavras-chave: Problema de Alocação de Berço (PAB). Cancelamento de Escala. Problema de Roteamento de Veículos com Premio, Janela de Tempo e Múltiplos Depósitos.

ABSTRACT

Brazilian ports handle over 90% of international cargo of the country. Containers have been growing year by year in Brazil and now account for 10.4% of all cargo handled. The container ships are usually hired by a category of service called liners. The liner ships have a fixed service schedule previously made public to all stakeholders, and if the ship doesn't berth at the port within an agreed waiting time, calculated as the berthing time minus its arrival time, called berthing window. There is a condition called canceled schedule and the ship don't berth at the port and continues its voyage to avoid compromising all schedules in the other ports. Therefore, in the analyzed context, it is important to provide the ports a tool that minimizes the number of canceled schedules, with consequent loss of revenue and contract for the port. For planning the berthing of ships in the port, the literature proposed the Berth Allocation Problem (BAP). This paper proposes a mathematical model based on the Vehicle Routing Problem (VRP) with Profits, Time Window and Multiple Depots applied to the planning the berthing of liners ships with the possibility of cancelling a vessel schedule with the objectives: maximize the revenue for the serving ships and also reducing the waiting time for the ship to berth. Test instances have been developed based on the operational features of the Vila Velha Terminal (TVV) and the model was run in CPLEX 12.6. The results showed the efficiency of the proposed model to plan the berthing of vessels reducing the number of canceled schedules and also maximizing the port revenue.

Keywords: Berth Allocation Problem (BAP). Canceled Schedule. Vehicle Routing Problem with Profit, Time Window and Multiple Deposits.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – A Evolução do Comércio Internacional Marítimo	19
Tabela 2 – A Evolução do Comércio Marítimo Brasileiro	20
Tabela 3 – Instâncias Propostas	52
Tabela 4 – Atracação de Navios e Movimentação de Contêineres TVV	56
Tabela 5 – Movimentação de Cargas TVV.....	56
Tabela 6 – Resultados do CPLEX para as instâncias desenvolvidas	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Revisão Bibliográfica	42
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Navios <i>Liners</i> e <i>Tramps</i>	25
Figura 2 – Layout dos Berços no Porto	27
Figura 3 – Sequenciamento de Atendimento de Navios	28
Figura 4 – Terminal Convencional e com Prioridade para mega-navios	35
Figura 5 – Terminal com Berços Recuados	35
Figura 6 – Roteamento de Veículos Múltiplos Depósitos	44
Figura 7 – Definição da equação de tempo de serviço	46
Figura 8 – Terminal de Vila Velha	55
Figura 9 – Diferenças do modelo proposto para o modelo de Cordeau <i>et al.</i>	58
Figura 10 – Definição dos Conjuntos	59
Figura 11 – Funcionamento do Modelo Matemático Proposto	62
Figura 12 – Resultado do CPLEX para instâncias do Bloco 1	65
Figura 13 – Sequenciamento de Navios para a Instância 1	66
Figura 14– Sequenciamento de Navios para a Instância 2	66
Figura 15 – Sequenciamento de Navios para a Instância 3	67
Figura 16 – Sequenciamento de Navios para a Instância 4	67
Figura 17 – Resultado do CPLEX para instâncias do Bloco 2	68
Figura 18 – Sequenciamento de Navios para a Instância 5	69
Figura 19 – Sequenciamento de Navios para a Instância 6	69
Figura 20 – Sequenciamento de Navios para a Instância 7	69
Figura 21 – Sequenciamento de Navios para a Instância 8	70
Figura 22 – Gráfico Comparativo das Instâncias do Bloco 1 e Bloco 2.....	71
Figura 23 – Gráfico Comparativo das Instâncias 4 e 8.....	71
Figura 24 – Resultado do CPLEX para instâncias do Bloco 3	73
Figura 25 – Gráfico Comparativo das Instâncias do Bloco 1 e Bloco 3.....	74

Figura 26 - Resultado do CPLEX para instâncias do Bloco 4 75

LISTA DE SIGLAS

ABRATEC – Associação Brasileira dos Terminais de Contêineres de Uso Público.

AG – Algoritmo Genético.

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários.

BTPS - *Strategic Berth Template Problem*.

CENTRONAVE - Centro Nacional de Navegação.

CNT – Confederação Nacional de Transportes.

CS – *Clustering Search*.

CVRP - *Capacitated Vehicle Routing Problem*.

ETA – *Estimated Time of Arrival*.

FCFS – *first-come-first-served*.

MA – *Memetic Search algorithm*.

MCBAP – *Minimum Cost Berth Allocation Problem*.

MS – *Multi-Start*

OP – *Orienteering Problem*.

PAB – Problema de Alocação de Berços.

PABD – Problema de Alocação de Berços Dinâmico.

PAB – CA - Problema de Alocação de Berço com Cancelamento de Escala.

PAB-MC – Problema de Alocação de Berços para Múltiplas Cargas.

PLIM - Programação Linear Inteira Mista.

PRV – Problema de Roteamento de Veículos.

QCA – *Quay Guindaste Assignment*.

SA - *Simulated Annealing*.

SWO - *Squeaky Wheel Optimization*.

TOP – *Team Orienteering Problem*.

UNCTAD – United Nations Conference of Trade and Development.

VNS – *Variable Neighborhood Search*.

VRP – *Vehicle Routing Problem*.

VRPTW – *Vehicle Routing Problem with Time Windows*.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
1.2 JUSTIFICATIVA	18
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2. REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1 PORTOS	22
2.2 NAVIOS <i>LINERS</i> E <i>TRAMPS</i>	23
2.3 PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇO	25
2.4 PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS	28
2.4.1 Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo	30
2.4.2 Problema de Roteamento de Veículos com Prêmio	30
2.4.3 Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos	32
2.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	32
2.5.1 Modelo matemático proposto por Cordeau et al.	43
3. METODOLOGIA DA PESQUISA	48
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	48
3.2 ETAPAS DESENVOLVIDAS	49
3.3 INSTÂNCIAS DESENVOLVIDAS.....	50
3.4 PORTO ESTUDADO.....	54
4. MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO	57
5. APLICAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
5.1 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS	75
6. CONCLUSÃO	77

6.1 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	78
REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

O transporte marítimo mundial tem crescido fortemente nos últimos anos, desempenhando papel fundamental no comércio internacional. No Brasil, os terminais portuários representam peça fundamental na logística das operações de comércio exterior. Com uma concentração de mais de 90% do volume da movimentação de cargas internacionais do país, a operação dos portos deve ser ágil, segura e com fluxo contínuo de informações para garantir o desempenho e competitividade do comércio internacional do país (CNT, 2006).

Dentre os diversos tipos de cargas que são transportadas, destaca-se o contêiner, que também vem crescendo ano a ano no Brasil. De 2010 para 2014 a movimentação de contêiner teve um crescimento de 36%, passando a representar 10,4% de toda a carga movimentada no país (ANTAQ, 2015).

Os navios de contêiner são usualmente contratados pela categoria de serviço *liner*. Os navios *liners* são navios com serviços regulares entre um certo número de portos, com rotas e tempo de chegada e partida nos portos definidos e publicados com antecedência e cumpridos com o maior rigor possível. O transporte é contratado por carga, que geralmente são cargas gerais e principalmente contêineres (LIGTERINGER e VELSINK, 2012).

Nos casos dos navios *liners*, mais especificamente os de transporte de contêiner, para manter suas escalas costumam estabelecer contratualmente com o porto um tempo máximo de espera para atracação, que é o tempo entre a chegada do navio ao porto e sua atracação, denominado janela de atracação. Para os casos em que o porto não consegue atracar o navio dentro da janela de atracação estabelecida, o navio cancela sua escala para seguir a rota e não atrasar a atracação nos portos subsequentes, o que levaria ao rompimento de todas as escalas pré-programadas e divulgadas.

Desta forma, alguns portos que operam no limite da capacidade, não conseguem atracar todos os navios dentro da janela de atracação contratada, e devem decidir quais navios irão atracar e quais terão sua escala cancelada. Essa decisão, de forma geral, é tomada em função da receita gerada pela atracação de cada navio.

No Brasil, o aumento significativo do tempo de espera para atracação e embarque de navios porta-contêineres tem provocado diversos cancelamentos de escalas. Segundo um levantamento do Centro Nacional de Navegação (CENTRONAVE), nos

17 principais terminais brasileiros em 2010 ocorreu mais de 850 cancelamentos de escalas, ante 457 no ano de 2009. Já as escalas que foram respeitadas caíram 9,1% nesse mesmo período, ficando em 4.237 em 2010 ante 4.664 em 2009 (RIOS, 2011).

O congestionamento dos terminais causou em 2010 atrasos nas atracções de navios de quatro mil dias. Estes atrasos geraram, somente em Santos, um custo adicional de US\$ 95 milhões ao ano. Isso fez com que toda a cadeia produtiva perdesse competitividade e produtividade (RIOS, 2011).

As horas de espera para atracção têm aumentado gradativamente os cancelamentos de escala nos últimos anos. O porto de Santos tem registrado a alta incidência de atrasos na atracção de navios, provocando um efeito cascata nos demais terminais portuários do país, causando custos extras de aproximadamente 8% do frete das embarcações (RIOS, 2011).

Para um melhor planejamento da atracção dos navios no porto é proposto na literatura científica o Problema de Alocação de Berços (PAB). O PAB tem por objetivo determinar a sequência de atendimento dos navios para cada berço disponível no porto, dado um horizonte de tempo de planejamento e atendendo a restrições operacionais existentes. Geralmente o PAB objetiva minimizar o tempo de permanência dos navios no porto, que é computado como sendo o tempo de término da operação menos o tempo de chegada do navio no porto (BIERWIRTH e MEISEL, 2010).

Muitos pesquisadores têm direcionado seus estudos ao PAB e diversos artigos foram publicados sobre o tema. Pode-se citar, dentre os vários artigos publicados, as revisões realizadas por Bierwirth e Meisel (2015), Rashidi e Tsang (2013), Stahlbock e Voss (2008), Vacca *et al.* (2007), Steenken *et al.* (2004), Vis e Koster (2003) e Meersmans e Dekker (2001).

Na revisão da literatura não foram encontrados artigos que tratassem do cancelamento de escala para terminais de contêineres. Neste sentido, este trabalho objetiva apresentar um modelo matemático que trate o planejamento da atracção de navios *liners*, mais especificamente em terminais de contêineres, com a possibilidade de cancelamento de escalas, ou seja, o não atendimento de alguns navios, que denominaremos Problema de Alocação de Berço com Cancelamento de Escala (PAB-CA).

O modelo matemático proposto é inspirado em Cordeau et al. (2005) que trata o PAB como um Problema de Roteamento de Veículos Múltiplos Depósitos com Janela de Tempo. No entanto, para atender ao cancelamento de escala, o modelo proposto foi elaborado como um Problema de Roteamento de Veículos com Prêmio, Janela de Tempo e Múltiplos Depósitos. Além disso, o modelo proposto por Cordeau *et al.* (2005) tem como função objetivo minimizar o tempo total de serviço, ou seja, tempo de espera e operação do navio. Já o modelo matemático proposto nesta dissertação tem como função objetivo maximizar a receita obtida e ao mesmo tempo minimizar o tempo de espera para atracação.

Para avaliar o modelo proposto, este foi implementado no CPLEX 12.6 e testes computacionais foram realizados em cenários obtidos junto ao TVV, localizado em Vila Velha, no Espírito Santo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo matemático para o planejamento da atracação de navios *liners* com base no Problema de Roteamento de Veículos com Prêmio, Janela de Tempo e Múltiplos Depósitos, visando maximizar a receita obtida e ao mesmo tempo minimizar o tempo de espera.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Levantar os modelos existentes, propostos em bibliografias nacionais e internacionais publicadas, para resolução do PAB.
- Fazer um estudo das características temporais e espaciais do terminal onde será aplicado o modelo desenvolvido.
- Analisar o comportamento do modelo sob diversos impactos para auxílio na tomada de decisões estratégicas de longo prazo e operacionais.

1.2 JUSTIFICATIVA

O crescimento do comércio marítimo internacional é apresentado na Tabela 1, com destaque para o aumento da movimentação de contêineres que em 2013 movimentou 1.524 milhões de toneladas, passando a ter uma representação de 16% das cargas movimentadas anualmente no mundo pelo modal marítimo (UNCTAD, 2014).

TABELA 1 – A EVOLUÇÃO DO COMÉRCIO INTERNACIONAL MARÍTIMO

Ano	Óleo e gás		Granel Sólido		Contêiner		Outras Cargas Gerais		Total	
	ton x 10 ⁶	%	ton x 10 ⁶	%	ton x 10 ⁶	%	ton x 10 ⁶	%	ton x 10 ⁶	%
1980	1.871	50,5	608	16,4	102	2,8	1.123	30,3	3.704	100
1985	1.459	43,8	900	27,0	152	4,6	819	24,6	3.330	100
1990	1.755	43,8	988	24,7	234	5,8	1.031	25,7	4.008	100
1995	2.050	44,1	1.105	23,8	371	8,0	1.125	24,2	4.651	100
2000	2.163	36,1	1.295	21,6	598	10,0	1.928	32,2	5.984	100
2005	2.422	34,1	1.709	24,0	969	13,6	2.009	28,3	7.109	100
2006	2.698	35,0	1.814	23,6	1.076	14,0	2.112	27,4	7.700	100
2007	2.747	34,2	1.953	24,3	1.193	14,8	2.141	26,6	8.034	100
2008	2.742	33,3	2.065	25,1	1.249	15,2	2.173	26,4	8.229	100
2009	2.642	33,6	2.085	26,5	1.127	14,3	2.004	25,5	7.858	100
2010	2.772	33,0	2.335	27,8	1.280	15,2	2.022	24,0	8.409	100
2011	2.794	31,8	2.486	28,3	1.393	15,9	2.112	24,0	8.785	100
2012	2.841	30,9	2.742	29,8	1.445	15,7	2.169	23,6	9.197	100
2013	2.844	29,8	2.920	30,6	1.524	16,0	2.260	23,7	9.548	100

Fonte: UNCTAD (2014).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

A movimentação de contêineres nos últimos anos tem crescido no Brasil, sendo que a movimentação total de contêineres nas instalações portuárias brasileiras em 2014 foi de 101.103.637 toneladas, o que representa aproximadamente 10,4% das 968.853.249 toneladas movimentadas nos portos brasileiros, conforme Tabela 2 (ANTAQ, 2015).

TABELA 2 – A EVOLUÇÃO DO COMÉRCIO MARÍTIMO BRASILEIRO

Ano	Óleo e gás		Granel Sólido		Contêiner		Outras Cargas Gerais		Total	
	ton	%	ton	%	ton	%	ton	%	ton	%
2010	209.904.481	25,0%	510.435.338	60,8%	74.125.419	8,8%	44.896.350	5,3%	839.361.588	100%
2011	212.008.117	23,9%	544.569.746	61,4%	84.259.933	9,5%	46.021.992	5,2%	886.859.788	100%
2012	217.457.054	24,0%	554.699.126	61,3%	87.337.218	9,7%	44.905.346	5,0%	904.398.744	100%
2013	219.281.074	23,6%	569.127.666	61,2%	97.493.576	10,5%	43.446.301	4,7%	929.348.617	100%
2014	231.753.888	23,9%	589.956.001	60,9%	101.103.637	10,4%	46.039.723	4,8%	968.853.249	100%

Fonte: ANTAQ (2014).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

Do ponto de vista prático, a evolução do comércio marítimo mundial e no Brasil apresentados na Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente, e o crescimento da movimentação de contêineres nos últimos anos, justifica o desenvolvimento de metodologias que auxiliem no planejamento de atracação de navios nos portos.

Do ponto de vista acadêmico, apesar de inúmeros trabalhos encontrados para PAB em portos de contêineres, o estudo para o problema do cancelamento de escala utilizando roteamento de veículos com prêmio, janela de tempo e múltiplos depósitos, objetivando maximizar a receita obtida, minimizando o tempo de espera e aplicando a um terminal de contêiner, não foi encontrado na literatura.

Além disso, o modelo a ser desenvolvido será importante operacionalmente para portos que lidam com o problema de cancelamento de escala, necessitando identificar qual navio é mais vantajoso atracar, como no porto em estudo desta dissertação, gerando um melhor atendimento aos navios e, conseqüentemente, benefícios econômicos, uma vez que os cancelamentos de escalas geram prejuízos tanto para armadores como para os exportadores e importadores, que ficam impossibilitados de cumprir seus embarques nos prazos estipulados.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos que são estruturados como segue.

No Capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho que contém a contextualização e definição do problema a ser tratado e a elaboração da hipótese para solução. Fazem parte deste capítulo o objetivo geral e os objetivos específicos, a justificativa do

assunto e a estrutura do trabalho.

No Capítulo 2 é abordado o referencial teórico, introduzindo os principais conceitos de portos, PAB, roteamento de veículos e navios *liners* e *trumps*, seguido pela revisão bibliográfica.

O Capítulo 3 abrange a metodologia, contendo a classificação da pesquisa, as etapas desenvolvidas e a criação das instâncias para teste do modelo proposto.

O Capítulo 4 é dedicado à apresentação e explicação do modelo matemático proposto.

No Capítulo 5 são apresentados e analisados os resultados dos experimentos computacionais obtidos pelo modelo proposto.

O Capítulo 6 é dedicado à conclusão do trabalho e também recomendações para desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo contextualiza a operação portuária de maneira ampla, conceitua os tipos de navios, apresenta os principais conceitos do PAB e descreve os tipos de roteamento de veículos utilizados como metodologia para elaboração do modelo proposto. Por fim, apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais trabalhos publicados na área de PAB ao longo dos últimos anos.

2.1 PORTOS

Os portos e os terminais são elementos fundamentais na infraestrutura do transporte marítimo, estruturados com equipamentos para carga e descarga das mercadorias, de armazéns para estocagem e do que é chamado de retro porto, que é a estrutura que permite a saída e chegada das mercadorias na área portuária, compreendendo ainda, as vias de acesso rodo-ferroviárias, aquaviárias ou aéreas (AGERSCHOU *et al.*, 2004).

No caso do Brasil, a posição geográfica, sua continentalidade, configuração territorial e seu extenso litoral voltado para um único oceano dão aos portos brasileiros uma importância fundamental no quadro geral dos transportes no país (CNT, 2006).

A importância dos portos cresce na medida em que o comércio marítimo entre as nações vem sendo intensificado devido à globalização e ao crescimento econômico mundial. Esses fatores aumentam a demanda pelos serviços portuários. Assim, é comum encontrar em regiões próximas aos portos vários navios aguardando para serem atendidos por não existir posição de berço disponível para atracação. É comum portos operarem perto de suas capacidades máximas (BARROS *et al.*, 2011).

Considerando o aumento da competitividade econômica mundial, acirrado pelo aumento do fluxo de mercadoria entre as nações, os portos, vértices importantes para o advento do comércio exterior, passam a ter uma exigência maior para operarem de maneira eficiente (BARROS *et al.*, 2011).

A administração portuária deve considerar a importância que os portos têm na atividade econômica, isto é, as atividades que ocorrem entre a produção das mercadorias e o consumo das mesmas. Assim, as pressões para que os portos aumentem a produtividade, reduzam custos, mudem serviços, fazem parte da

economia globalizada. Numa economia global radicalmente centrada na competitividade, não há como os elos frágeis entre produtores e consumidores suportarem portos ineficientes, caros e pouco produtivos (LIGTERINGER E VELSINK, 2012).

O conceito clássico de porto vem sofrendo uma profunda reformulação com as mudanças tecnológicas, com a utilização de contêineres, *pallets*, sistema *roll-on-roll-off*, correia transportadora, esteira rolante, dutos de sucção para grãos e eletroímãs, entre outros, diferentemente de quando operava apenas com carga geral não unitizada ou com carga ensacada (AGERSCHOU *et al.*, 2004).

No século XXI, quanto à questão portuária, quem prestar o melhor serviço com o menor custo permanecerá no mercado. Por isso, os portos brasileiros precisam alcançar um padrão de tecnologia operacional da atividade modelando suas estruturas organizacionais para o atendimento a uma atividade cada vez mais comercial e competitiva (SILVA, 1999).

Com o avanço da informática e o desenvolvimento de novas pesquisas, observa-se uma nova tendência na organização e gerenciamento dos grandes portos de todo o mundo. Os terminais são dotados de agilidade gerencial e operacional, interligados por sistemas de informações (PAIXÃO E MARLOW, 2003).

2.2 NAVIOS *LINERS* E *TRAMPS*

As formas de contratação dos navios podem ser subdivididas em duas categorias: *liner* e *tramp*.

Os navios *liners* realizam o transporte marítimo para uma empresa ou um consórcio de empresas que mantém serviços regulares entre determinado número de portos com suas rotas definidas, podendo ser de longas distâncias, entre continentes diferentes, ou curtas distâncias, incluindo na rota portos de um mesmo continente, como por exemplo Rotterdam – Bilbao – Southampton – Rotterdam (LIGTERINGER e VELSINK, 2012).

As principais características dos navios *liners* são:

- A hora de chegada e saída do navio em qualquer porto é conhecida e publicada com um certo período de antecedência e essa programação é cumprida com alto rigor

e credibilidade;

- As tarifas são definidas ao longo de um determinado período;
- A localização dos navios em alguns portos são definidas.

Para os casos de navios de contêineres, um fenômeno peculiar foi desenvolvido. A rota do navio inclui alguns portos principais e outros navios distribuem os contêineres dentro da região em torno do porto principal, num sistema conhecido como *hub-and-spoke*. Isso ocorreu porque os principais navios *liners* foram se tornando grande demais para portos menores. A transferência dos contêineres do navio principal para os navios alimentadores é conhecida como transbordo (LIGTERINGER e VELSIK, 2012).

Ao longo dos últimos anos a concorrência entre as principais companhias de navios *liners* levou a concentração e racionalização. Concentração devido à fusões e aquisições, restando apenas cerca de vinte empresas para prestar os serviços intercontinentais. Como exemplo, tem-se a Maersk que consolidou a posição número um quando se fundiu com a P&O Nedlloyd passando a ter quinhentos navios com capacidade para quinze milhões de contêineres. A racionalização ocorre para maximizar a utilização dos navios, carregando-os até a sua capacidade máxima de contêineres (LIGTERINGER e VELSIK, 2012).

Outra forma de maximizar a utilização dos navios *liners* é o fretamento de um espaço do contêiner, de acordo com a necessidade do cliente. Apesar dessas medidas estarem gerando economia no transporte, o excesso de capacidade está impactando em um baixo desempenho das companhias de navegação (LIGTERINGER e VELSIK, 2012).

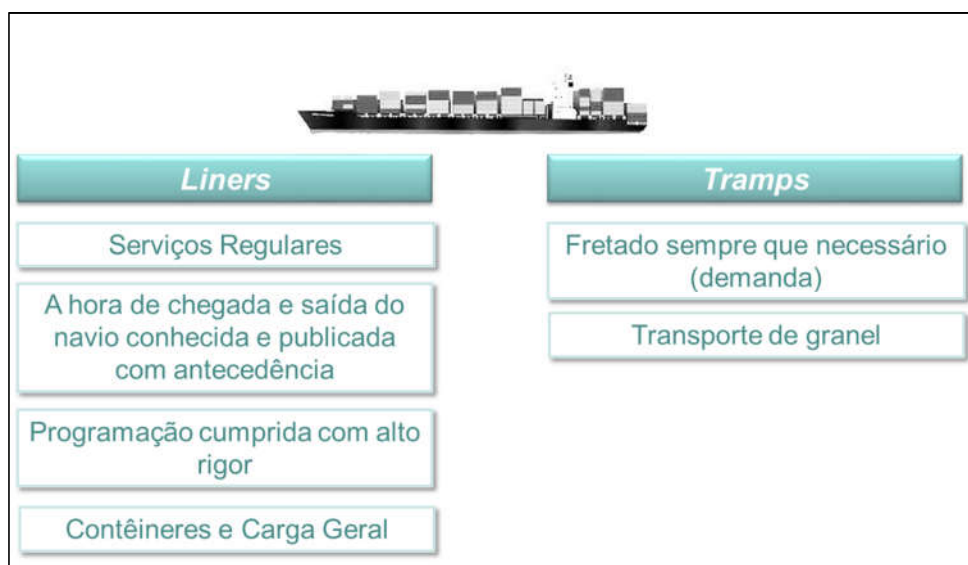
Já os navios *tramps* são o oposto dos navios *liners*. O navio é fretado sempre que necessário, ou seja, quando há demanda. Esse tipo de navio é utilizado principalmente no transporte de granel. As companhias podem contratar os navios *tramps* por contratos de curta ou longa duração, mas, para evitar a variação de custo, geralmente as empresas priorizam os contratos de longo prazo, o que também oferece a possibilidade de utilizar navios mais especializados (LIGTERINGER e VELSIK, 2012).

Para ilustrar a importância dos navios *tramps*, em 1992, 84% da distribuição do petróleo bruto no mundo foi realizado por navios *tramps* independentes alugados por

empresas de petróleo através de contratos de curto e longo prazo. Os outros 15% foram feitos por navios de propriedade das grandes companhias e 1% por navios pertencentes ao governo (LIGTERINGER e VELINK, 2012).

As principais características e diferenças dos navios *liner* e *tramps* são apresentadas na Figura 1:

Figura 1 – Navios *liners* e *tramps*.



Fonte: Autor.

2.3 PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇO

O PAB se refere a um problema de atribuir uma posição e um tempo de atracação para os navios, de tal forma que uma função objetivo seja otimizada. No PAB é dado o layout de um berço com um conjunto de navios que têm de ser atendidos dentro de um dado horizonte de tempo de planejamento da sequência de atendimento a navios (BIERWIRTH e MEISEL, 2015).

O objetivo geral do planejamento de alocação de berço é oferecer serviços rápidos e confiáveis aos navios. Isso se reflete na literatura por funções objetivo diferentes. Modelos de minimizar a soma dos tempos de espera e movimentação de navios claramente prevalecem. Outros objetivos são, por exemplo, a minimização do volume de trabalho de recursos de terminais e a minimização do número de navios rejeitados para ser servido a um terminal. O desempenho de um plano de berço é

frequentemente medido em termos de custos, que permite combinar diferentes objetivos de uma função de custo global (BIERWIRTH e MEISEL, 2015).

Os modelos existentes para PAB podem ser classificados tanto por restrições temporais como por restrições espaciais. Dentre os atributos temporais podem ser citados: data de chegada de navio, data de atracação, tempo de espera na fila de navios dentre outros. Quanto aos atributos espaciais, relativos ao layout do cais, usualmente adotam-se as restrições de calado, comprimento e boca dos navios (Rosa *et al.*, 2013).

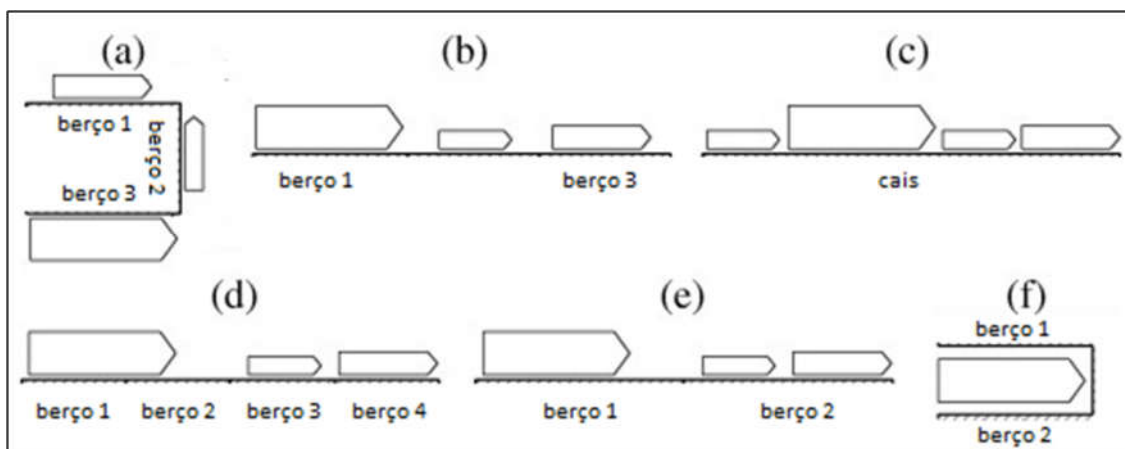
As restrições espaciais também restringem as posições viáveis de atracação de navios de acordo com um pré-particionamento do cais em berços. De acordo com Imai *et al.* (2005), as seguintes situações podem ocorrer: PAB Discreto, PAB Contínuo e PAB Híbrido.

- *Layout* Discreto: o cais é dividido em um número de seções, chamado berços. Apenas um navio pode ser servido a cada berço de cada vez. O particionamento pode acompanhar a construção do cais (FIGURA 2a) ou é organizacionalmente prescrito para aliviar o problema de planejamento (FIGURA 2b).

- *Layout* Contínuo: não há divisão do cais, ou seja, o navio pode atracar em posições arbitrárias dentro dos limites do cais (FIGURA 2c). Para um layout contínuo, o planejamento de vaga é mais complicado do que para um layout discreto. Porém, no layout contínuo tem-se a vantagem de melhor utilizar o espaço do cais.

- *Layout* Híbrido: como no caso discreto, o cais também é dividido em berços, mas grandes navios podem ocupar mais de uma vaga (FIGURA 2d), enquanto pequenos navios podem compartilhar uma vaga (FIGURA 2e). Assim como dois berços opostos podem ser utilizados para atender um grande navio de ambos os lados (FIGURA 2f).

Figura 2 – Layout dos berços no porto



Fonte: Bierwirth e Meisel (2015).

Nota: Adaptado pelo autor.

Já as restrições temporais podem restringir os horários de atracação e os horários de partida das embarcações. De acordo com Imai *et al.* (2001), os seguintes casos destacam-se: chegada estática e chegada dinâmica.

- Chegada Estática: não há horários de chegada estipulados para as embarcações ou os horários de chegada apenas impõem uma restrição suave sobre os tempos de atracação. No primeiro caso, assume-se que os navios já esperam na porta e podem atracar imediatamente. Neste último caso, assume-se que um navio pode ser acelerado em um determinado custo, a fim de satisfazer um tempo de acostagem mais cedo do que a hora prevista de chegada.

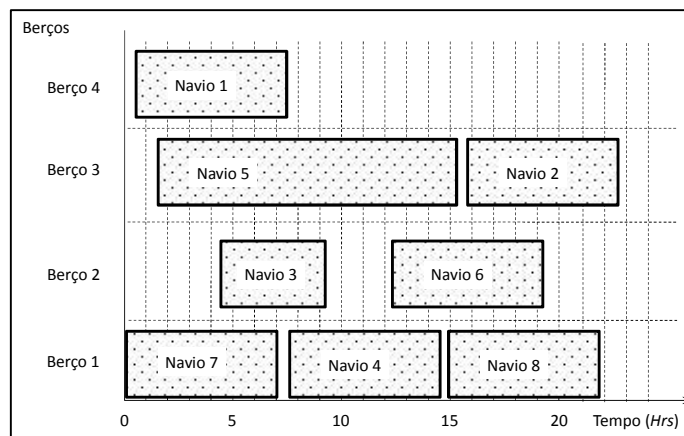
- Chegada Dinâmica: horários de chegada fixos são dados para os navios, portanto, os mesmos não podem atracar antes da hora prevista de chegada. A fim de manter horários regulares, tempos mais recentes de partida das embarcações podem ser prescritos adicionalmente. Em alguns casos, as datas são expressas por um máximo de espera mais tempo para a manipulação de um navio. No caso dinâmico, todo o serviço de um navio deve ser executado dentro da janela de tempo resultante.

As datas de chegadas dos navios podem ser ainda classificadas como determinísticas e estocásticas. Quando é determinística, as datas estimadas de chegada, conhecidas como *Estimated Time of Arrival (ETA)*, são fixadas como parâmetros do problema. Quando a chegada é estocástica, são estabelecidas com base em dados históricos e curvas estatísticas de distribuição de tempos de chegada, ocasionadas pela incerteza

nas chegadas decorrentes de problemas ocorridos em outros portos e até mesmo de navegação (ROSA *et al.*, 2013).

Outro ponto importante nos modelos do PAB, oriundo do tipo de chegada dos navios, são as abordagens em relação a realizar o escalonamento dos navios nos berços ou não. Existem basicamente duas abordagens: todos os navios devem ser alocados sem consideração de data para o momento atual; deve ser elaborada uma sequência de atendimento dos navios para cada berço. A segunda situação reflete melhor a real necessidade gerencial dos portos e, espera-se alcançar um resultado como o visto na Figura 3 que é o sequenciamento de atendimento dos navios em cada berço do porto (ROSA *et al.*, 2013).

Figura 3: Sequenciamento de atendimento dos navios.



Fonte: Rosa et al. (2013).

Tempos de manipulação do navio são assumidos determinísticos na grande maioria dos modelos publicados de PAB. Ainda assim, a literatura aborda o tempo de manuseio dos navios de diferentes maneiras:

- eles são conhecidos com antecedência e considerados imutáveis, ou seja, eles são fixos.
- eles dependem da posição de atracação dos navios.
- eles dependem do número de equipamentos servindo os navios.
- eles dependem dos horários de trabalho dos equipamentos atribuídos.
- eles obedecem às combinações anteriores (BIERWITH e MEISEL, 2015).

2.4 PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS

Roteirização de veículos é o processo de elaboração de rotas para veículos de uma frota, com o objetivo de visitar um conjunto de clientes geograficamente dispersos, com o menor custo possível (LAPORTE *et al.*, 2000).

O Problema de Roteamento de Veículos (PRV), conhecido na literatura como *Vehicle Routing Problem (VRP)*, foi proposto inicialmente por Dantzig e Ramser (1959), que o definiram da seguinte forma: para um conjunto N de clientes com uma demanda d e uma frota de veículos homogêneos com capacidade Q objetiva-se estabelecer as rotas dos veículos, minimizando os custos através da minimização do número de veículos, distância percorrida ou o tempo, atendendo a demanda dos clientes numa única visita e terminando a rota no mesmo depósito de origem.

Com a atenção especial que o custo de transporte de mercadorias foi ganhando, onde sua minimização passou a ser um grande foco para as empresas que visavam sobreviver e crescer no mercado competitivo, a literatura passou a contribuir de maneira significativa para o problema, sendo proposta subdivisões a fim de se estudar de maneira mais específica as particularidades de situações presentes em instâncias reais.

A variação mais básica do VRP é o *Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP)* que foi introduzida por Dantzig e Ramser (1959) como o *Truck Dispatching Problem* e pode ser descrito da seguinte forma: há um número determinado de clientes, que possuem localização conhecida, e solicitando algum produto conhecido, devendo ser suprido por um único depósito por um único veículo de uma frota de veículos que tem sua capacidade conhecida. Além disso, são conhecidos os custos de viagem entre os clientes e entre os clientes e o depósito. Cada cliente será atendido por um único veículo, que nunca deve exceder sua capacidade, tendo como objetivo a minimização do custo total da rota.

Para instâncias relativamente pequenas os métodos exatos têm capacidade de resolver, porém, para instâncias maiores os métodos heurísticos ou meta-heurísticos possuem maior aplicabilidade prática. Uma das primeiras e mais utilizadas heurísticas na solução desse tipo de problema é o algoritmo de economias de Clarke e Wright (CLARKE e WRIGHT, 1964).

A partir do VRP têm-se três classes de problema as quais o problema estudado nessa dissertação se insere: o Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo, o Problema de Roteamento de Veículos com Prêmio e o Problema de Roteamento de

veículos com Múltiplos Depósitos. Todos estes problemas serão detalhados nas subseções seguintes.

2.4.1 Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo

O Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo, ou *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW) é uma extensão do CVRP onde além da restrição de capacidade, para cada cliente i está associado um intervalo de tempo $[a_i, b_i]$, denominado janela de tempo. O tempo que o veículo deixa o depósito, o tempo viajado t_{ij} entre cada arco $(i, j) \in A$, e um tempo adicional de serviço s_i , para cada cliente i , são todos conhecidos a priori. O veículo deve chegar a cada cliente dentro da janela de tempo $[a_i, b_i]$ determinada para o mesmo, e deve permanecer lá por um tempo s_i determinado (TOTH e VIGO, 2002).

Em muitos casos práticos, as matrizes de custo e tempo de viagem coincidem e se assume que todos os veículos deixam o depósito no tempo 0 (zero). O VRPTW consiste em encontrar um conjunto de K rotas com o menor custo desde que:

- cada rota comece e termine no depósito;
- cada cliente seja atendido por apenas um veículo;
- a soma das demandas de todos os clientes de uma rota não pode exceder à capacidade do veículo;
- para cada cliente i , o atendimento deve começar dentro de uma janela de tempo $[a_i, b_i]$ e o veículo deve permanecer no local por um tempo s_i (TOTH e VIGO, 2002).

2.4.2 Problema de Roteamento de Veículos com Prêmio

O Problema de Roteamento de Veículos com Prêmio é definido por Archetti *et al.* (2013) como o PRV onde nem todos os clientes podem ser atendidos. Um lucro associado a cada cliente é recebido quando o mesmo é visitado. Ele pode ser imposto na função objetivo do problema ou em alguma restrição, impondo, por exemplo, um limite de lucro inferior a ser adquirido. Assim, o melhor subconjunto de clientes a ser atendido deve ser identificado.

Para Ahn *et al.* (2012), o problema de roteamento com ganhos é uma nova classe do problema de roteamento que combina o problema de roteamento de veículos com os

lucros, através de estratégias e táticas de rotas a serem empregadas. O problema determina simultaneamente as estratégias, clientes a atender e rotas para realização das visitas, para maximizar o valor dos lucros, sob restrições de consumo de recursos.

Dejax *et al.* (2005) dividiram os problemas envolvendo ganho em três categorias:

- *Prize-Collecting Traveling Salesperson Problem* (Balas, 1989), onde o objetivo é determinar um circuito que minimiza os custos de viagem de tal forma que o ganho obtido não seja menor que um valor definido previamente. Neste caso o ganho é delimitado por uma restrição.

- *Profitable Tour Problem* (Dell'Amico *et al.*, 1995), onde o objetivo é determinar um circuito que minimiza os custos de viagem subtraído do ganho obtido.

- *Orienteering Problem (OP)* (Golden *et al.*, 1987), onde o objetivo é maximizar o ganho desde que a duração da rota não exceda um valor previamente determinado.

O OP foi estudado inicialmente por Tsiligirides (1984) e Golden *et al.* (1987) e seu nome é baseado no esporte de mesmo nome, o *Orienteering*, que consiste numa competição na qual seus participantes recebem um mapa contendo uma série de pontos que podem ser visitados apenas uma vez e para cada um deles é atribuída uma pontuação predefinida. Então, o competidor sai do ponto de origem, visita o maior número possível de pontos e retorna a origem antes do fim do tempo definido. O competidor que obtiver o maior número de pontos vence a competição.

Vansteenwegen e Van Oudheusden (2007) apresentaram um modelo matemático onde se tem um conjunto de N pontos de controle i onde o primeiro ponto é o início da rota e o ponto N é a chegada, cada um com uma pontuação S_i onde S_1 e $S_N = 0$. O tempo t_{ij} de viagem entre cada ponto de controle i até o ponto de controle j já é conhecido e nem todos os pontos de controle serão visitados devido ao tempo limite T_{max} . E por fim, as variáveis: x_{ij} , que é uma variável binária, que quando seu valor é igual a 1, indica que um arco (i, j) foi usado, e zero caso contrário; e u_i , que indica a posição de um ponto de controle i na rota.

Como extensão do OP temos o *Team Orienteering Problem (TOP)* que permite múltiplas rotas, onde cada uma delas é limitada por um tempo predefinido. É basicamente uma competição de *Orienteering* em *times* e, assim como no OP, cada ponto só pode ser visitado uma única vez, tendo os membros do time que se organizar para obter a maior soma da pontuação dos pontos de controle visitados possível (GOLDEN *et al.*, 1987).

Como o OP, o TOP também é um problema NP-difícil e não foi criado um algoritmo com tempo polinomial para solução ótima do problema (GOLDEN *et al.*, 1987).

Vansteenwegen e Van Oudheusden (2007) propuseram uma alteração no modelo do OP substituindo a variável x_{ij} por x_{ijp} , também binária, com valor igual a 1 caso seja utilizado um arco (i, j) em uma rota p , e u_{ip} indicando a posição de um ponto de controle i em uma rota p , sendo usada uma nova variável y_{ip} , indicando que um ponto de controle i faz parte de uma rota p .

2.4.3 Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos

Este problema considera que existem vários depósitos para atender aos clientes. Ele pode ser resolvido agrupando-se os clientes aos depósitos, resultando em um conjunto de PRV a serem resolvidos separadamente. Uma outra abordagem para o problema é que os vários clientes e depósitos estão na mesma rota, dificultando a sua solução. O veículo sai de um depósito, atende clientes, passa por outro depósito, atende outros clientes, e assim por diante. Ao fim da rota, o veículo não precisa necessariamente retornar ao depósito de origem. Nesse tipo de problema, cada cliente é inserido na rota de forma a minimizar o custo final total do transporte (GOLDBARG e LUNA, 2005).

2.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Imai *et al.* (2001) propuseram a resolução do PAB para casos dinâmicos (PABD), ou seja, em que os navios chegam enquanto o trabalho está em andamento, para terminais de contêineres em portos públicos. Porém, considerando-se que a hora de chegada dos navios é conhecida de antemão. O modelo considera que cada berço pode atender somente um navio por vez, ou seja, os berços são discretos. Além disso, generalizou-se que o tempo de manipulação do navio independe do berço em que está atracado. O objetivo do problema é minimizar a soma do tempo de espera para a disponibilidade do berço mais o tempo de manuseio dos navios.

Para obter uma boa solução com consideravelmente pequeno esforço computacional, foi desenvolvido um procedimento heurístico baseado na relaxação Lagrangiana do problema original.

O modelo proposto por *Imai et al.* (2003) tem por objetivo minimizar o tempo de serviço total, diferenciando prioridades aos navios por variação de seus tempos de serviço, incluindo o tempo de espera para uma vaga ociosa, na solução.

Utilizou-se inicialmente a formulação de PAB dinâmico existente, proposto por *Imai et al.* (2001), considerando que cada berço atende apenas um navio, e que não existem restrições físicas e técnicas, tais como profundidade do navio, com tempo de operação dependente do berço onde o navio é operado. Propôs-se o melhoramento do modelo a fim de lidar com navios que tenham prioridades de serviços diversos.

Neste estudo, a prioridade foi avaliada pelo tempo de serviço resultante para cada navio. Afinal, o tempo de espera de cada navio considera o tempo de operação cumulativa de todos os navios operados anteriores ao mesmo. A formulação proposta tem a vantagem de que qualquer tipo de peso pode ser anexado a navios individuais. O modelo permite priorizar em função do volume de carga do manuseio do navio no porto, ou qualquer navio que precise ser operado rapidamente para uma determinada razão.

Para resolver o PAB com prioridade primeiramente foi analisado um método subgradiente usando uma técnica de relaxamento Lagrangiana. No entanto, devido à sua complexidade no processo de solução, foi proposta uma heurística baseada em Algoritmo Genético (AG).

O PAB foi proposto para berços contínuos por *Imai et al.* (2005) com o objetivo de minimizar o tempo de serviço total, considerando que o tempo de operação do navio depende da localização do berço que ele ocupar, assumindo que esse tempo aumenta proporcionalmente à distância do melhor local no berço.

A chegada de navios é considerada como dinâmica, considerando eficiência total, ignorando violações de tempo em partidas comprometidas. O PAB foi tratado como um problema determinístico. Por conveniência, a distância necessária entre os navios atracados lado a lado foi incluída no comprimento do navio. E a folga de tempo entre um navio atracado no local em que o navio anterior foi atendido foi incluída no tempo de manuseamento de cada navio.

Já *Boile et al.* (2006) trataram o PAB como um problema linear discreto e dinâmico, com o objetivo de minimizar o tempo de serviço total ponderado. Assumiu-se que não há restrições físicas e / ou técnicas, tais como a relação entre o projeto de navio e a

profundidade efetiva da água. Além disso, o tempo de atendimento do navio é assumido dependendo do berço onde é atribuído para a operação.

O modelo foi abordado com prioridade de serviço, adequado a situações que envolvem vários tamanhos de navios, diferentes volumes de movimentação e diferentes sequências de serviço. Prioridades também são determinadas por meio de acordos contratuais entre o operador portuário e o transportador.

Foi apresentado por Zhou *et al.* (2006) um modelo de alocação de berços dinâmico com prioridades de atendimento de navios para minimizar o tempo total de manuseio no terminal. O tamanho do navio, considerando o volume a ser operado, foi considerado como um índice para a prioridade. Entretanto, quando um pequeno navio, com pequeno volume de manuseamento, precisa ser atendido com uma prioridade mais elevada, pode-se definir um peso para aumentar o valor de avaliação na formulação. Nesta formulação tem-se a vantagem de que qualquer tipo de peso poder ser anexado a navios individuais.

Neste modelo foi ignorada a ordem de chegada do navio para minimizar o tempo total médio de espera dos navios no porto. Além disso, um tempo de espera aceitável especial para cada navio é levado em consideração.

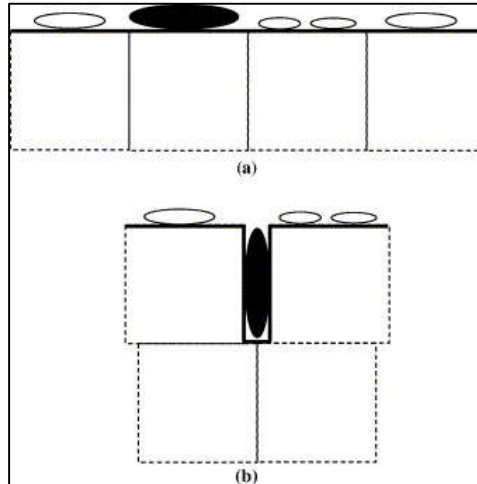
Para a solução deste problema desenvolveu-se um algoritmo heurístico baseado em Algoritmo Genético para obter uma solução próxima de ótima. A redução do espaço de busca básica do algoritmo é proposta.

Imai *et al.* (2007a) abordaram o PAB discreto para um terminal de contêineres multiusuários. O problema foi formulado para dois conceitos:

- Terminal convencional, considerando as seguintes características específicas para o modelo: tempo de tratamento do navio diferente para cada berço; até dois navios podem ser simultaneamente atendidos no mesmo berço, desde que o comprimento total seja menor que o comprimento do berço; todos os berços são considerados com a mesma profundidade (Figura 4a).
- Terminal convencional, porém com prioridade de atendimento para mega-navios. (Figura 4b).
- Terminal com berços recuados, onde um navio pode ser operado de ambos os lados, considerando as seguintes características específicas para o modelo: supõe-se que

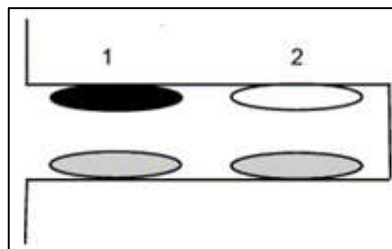
mega-navios são atendidos apenas em berços recuados, que também servem navios normais quando ocioso. Quando ocorre o atendimento de dois navios em berços recuados, o navio de trás fica dependendo do navio da frente para atracar ou desatracar, conforme Figura 5.

Figura 4: Terminal Convencional e com prioridade de atendimento para mega-navios.



Fonte: Imai *et al.* (2007).

Figura 5: Terminal com Berços Recuados



Fonte: Imai *et al.* (2007).

Os autores apresentaram uma formulação linear para o problema, e para resolvê-lo aplicaram o algoritmo genético que trabalha com o princípio da evolução de uma população de soluções de teste, sob muitas interações.

Monaco e Sammarra (2007) analisaram o PAB discreto, formulado como um problema de programação dinâmica, descrito por Imai *et al.* (2001). Uma nova formulação do problema foi proposta, mais compacta e mais forte, que usa menos variáveis e restrições, porém, que introduz uma variável de tempo ocioso a fim de representar corretamente qualquer horário possível. O problema é resolvido através de um

algoritmo heurístico baseado em uma relaxação Lagrangeana.

O PAB foi abordado por Imai *et al.* (2007b) com dois objetivos: um para a satisfação do cliente, que é a minimização do tempo de atraso total na partida do navio e outro para a eficiência do terminal, que é a minimização do tempo de serviço total. Lidou-se com os dois objetivos de forma independente para que não entrem em conflito um com o outro.

As suposições feitas neste estudo foram:

- a alocação do cais ignora a regra FCFS (*first-come-first-served*);
- cada berço pode lidar com um navio de cada vez;
- o tempo de processamento de um navio depende do berço alocado;
- o manuseio de um navio é realizado de forma contínua, sem qualquer interrupção;
- não explicitamente cobram-se os custos incorridos pela partida atrasada de um navio.

Listaram-se como proposta para solução duas heurísticas: uma por um procedimento de otimização subgradiente utilizando uma Relaxação Lagrangeana e outra por A.G.

Hansen *et al.* (2008) propuseram um modelo novo para berços discretos, denominado *Minimum Cost Berth Allocation Problem* (MCBAP), considerando algumas particularidades. O modelo não considera, ao designar um berço para atracação de um navio, apenas o tempo de manuseio do mesmo, mas sim o custo gerado, que pode ser diferente em cada berço dado os equipamentos utilizados no manuseio, o transporte da carga ao local de armazenagem, por exemplo.

Precocidade ou atraso da atracação e operações de movimentação de contêineres geralmente implicam benefícios ou custos. Muitas vezes, um período de tempo que separa a chegada e a partida do navio está especificado no contrato. Se as operações forem concluídas antes do tempo devido, permitindo partida antecipada do navio, um prêmio será pago pelos proprietários dos navios a empresa que opera o porto, se estas operações forem concluídas após essa data, atrasando assim a partida de navios, uma penalidade tem de ser aplicada à empresa que opera o porto para os armadores. Além disso, tais prêmios ou penalizações são ponderados para expressar o fato de que os atrasos são mais ou menos importantes de acordo com o tamanho do navio e os compromissos da empresa proprietária do navio, particularmente, a data prevista de chegada ao próximo porto visitado.

Dentre as características particulares do modelo destacam-se: os berços só podem atender um navio de cada vez (discreto); todos os navios podem ser atendidos em todos os berços; o objetivo geral é que os custos totais, ou seja, a soma dos custos de espera, precocidade, manuseio e atraso para todos os navios sejam minimizados; assume-se que navios podem chegar a qualquer momento, isto é, antes ou depois dos berços estiverem disponíveis.

O problema é expresso através de programação linear 0-1 mista. Considerando o grande tempo para solução exata de instâncias de tamanho realista, através de testes realizados no CPLEX 8.1, uma solução através da heurística *Variable Neighborhood Search* (VNS) foi proposta, e realizadas comparações com *Multi-Start* (MS), algoritmo genético e *Memetic Search algorithm* (MA). Concluiu-se que a heurística VNS fornece as melhores soluções para todos os casos resolvidos em instâncias grandes.

Imai *et al.* (2008) abordaram uma variação do problema de alocação de berço para terminais multi-usuários, como os navios que normalmente seriam atendidos no terminal, mas o tempo de espera estimado excede o limite de tempo, então são atribuídos a um terminal externo. É uma configuração operacional aplicada pelo porto de Colombo, no Sri Lanka, onde a infraestrutura portuária é insuficiente para atender o tráfego crescente de navios de contêineres. A função objetivo busca minimizar o número de navios atendidos em berços externos.

Foram abordados o problema estático de alocação de berço com um terminal externo e o PAB dinâmico, também com um terminal externo. Os pressupostos do problema são: o operador do primeiro terminal define um limite de tempo que é a chave para o navio passar para o terminal externo e considera-se que não haverá tempo de espera no segundo terminal.

A formulação para o problema estático considera que todos os navios chegam ao porto antes de começar a programação, com o objetivo de minimizar o tempo de serviço total de navios que estão alocados para o terminal externo, assegurando que cada berço atende apenas um navio por vez e que os navios não esperem mais do que o limite de tempo quando eles são atendidos no próprio terminal.

Já a formulação para o problema dinâmico assume que todos os navios não necessariamente chegaram antes de agendar a alocação do berço, requerendo restrições adicionais que asseguram que os navios devem ser alocados em berços

após a sua chegada.

Descreve-se o algoritmo genético por um método de solução, e consideram o uso da Otimização Subgradiente com a relaxação Lagrangiana para resolver o PAB estático.

Geralmente o agendamento de berço e os problemas de escalonamento de guindaste de cais foram considerados independentes um do outro. No entanto, a duração de atracação de um navio depende do número de guindastes atribuídos a ele. Quando o número de guindastes atribuído a um navio aumenta, a duração da operação do navio é reduzida. Por isso, Liang *et al.* (2009) propuseram um modelo que contemple esses dois problemas simultaneamente.

Para este modelo considerou-se: berços discretos; cada navio tem um número máximo de guindastes a ser atribuído; o tempo de tratamento depende do número de guindaste que manuseia o navio; o tempo de chegada de todos os navios é conhecido com antecedência; a manipulação do navio deve ser feita sem interrupção, uma vez que começar; cada berço pode servir um navio de cada vez; o tempo de transferência de guindastes entre berços é ignorado.

A função objetivo do modelo é minimizar a soma do tempo de manuseio, o tempo de espera e o tempo de atraso para cada navio. Para solucioná-la, combinou-se algoritmo genético com heurística.

Zhen *et al.* (2011) resolveram o PAB considerando a hora de chegada do navio incerta. O modelo propõe obter um cronograma inicial (horário de referência) para alocação no berço, porém com tempo de chegada ou tempo de operação incertos. A incerteza é representada por um conjunto finito de cenários discretos.

Os autores abrangeram duas estratégias para lidar com as incertezas: programação pró-ativa e reativa. A estratégia pró-ativa incorpora um grau de antecipação de incerteza e variabilidade durante a execução do programa. Já a estratégia de recuperação reativa ajusta a agenda para lidar com cenários realistas, com custo mínimo para desviar do cronograma inicial.

Basicamente, o modelo é projetado para minimizar custos, seja do cronograma inicial, ou os custos de recuperação, decorrentes de quando o cronograma realista desvia-se do cronograma inicial. É resolvido através da abordagem meta-heurística recozimento simulado.

O modelo de Oliveira *et al.* (2012) resolveu PAB dinâmico para berços discretos, a formulação matemática para este tipo de PAB segue um modelo descrito por Cordeau *et al.* (2005), em que os navios são vistos como clientes e berços como garagens. A função objetivo minimiza a soma do tempo de serviço, ponderada por um custo associado.

Propôs-se uma aplicação de um método híbrido conhecido como *Clustering Search* (CS) que é um método iterativo que visa dividir o espaço de busca e localizar regiões promissoras, usando um algoritmo de recozimento simulado para gerar soluções.

Xu *et al.* (2012) consideraram um problema de alocação de berço dos terminais de contêineres em que a atribuição de navios para berços é limitada pela profundidade da água e as condições de maré, de modo que alguns berços podem acomodar todos os tipos de navios, enquanto outros berços só podem acomodar navios mais rasos. Além disso, devido aos diferentes níveis das marés em horas diferentes do dia, se um navio pode ser atribuído a uma vaga é também dependente do momento.

Este modelo é dividido no horizonte de planejamento em períodos de baixa-maré e alta-maré, onde a atribuição de navio em um período de baixa-maré é mais restritiva. O objetivo é minimizar o tempo de serviço total dos navios. Por simplicidade considerou-se apenas um horizonte de planejamento de curto prazo (24 horas ou menos).

Foram analisados os casos estático e dinâmico do problema. No caso estático todos os navios estão prontos para o serviço no tempo zero, ao passo que no caso dos navios dinâmicos podem ter tempos de chegada diferentes de zero. Além disso, assume-se que existem vários berços disponíveis, cada berço pode lidar com um navio de cada vez, e cada navio atracado ocupa apenas um.

Apresentou-se uma heurística para o caso estático e uma para o caso dinâmico. A segunda difere-se da primeira apenas na questão de que quando um navio é inserido na programação existente, o tempo de início do navio é limitado pelo tempo de chegada dele.

Ma *et al.* (2012) tiveram como objetivo maximizar o desempenho do terminal em termos de qualidade de serviço. Para isso, visou-se minimizar o tempo de serviço total e taxa de operação de navio, coordenando adequadamente PAB e *Quay Guindaste Assignment* (QCA).

O modelo prevê eventos inesperados, que ocasionam problemas de agenda, como o mau tempo e a chegada adicional. Para isso, o terminal, por vezes, vai transferir alguns dos seus clientes para outros terminais (terminais externos) para evitar longo tempo de espera induzido.

No modelo matemático proposto, os problemas de PAB e QCA estudados estão em um berço de layout discreto. Para cada navio que chega, a hora de chegada fixa é dada. Além disso, os clientes são classificados em três tipos de nível de acordo com a sua relação com o terminal, sendo o terceiro definidos como o mais importante, com parceria de longo prazo. Assim, a prioridade foi tratada considerando-se dois fatores simultaneamente: volume de contêineres e relação entre o cliente e o terminal. É proposto um algoritmo genético para a solução do problema.

Rosa *et al.* (2013) propuseram um modelo matemático baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para resolução do PAB para Múltiplas Cargas (PAB-MC) aplicado a um porto de granel. O modelo foi desenvolvido com algumas características próprias: admite berços que operam mais de um tipo de carga e que tenham taxas de operação diferentes para cada uma; os berços possuem profundidade, comprimento e largura que limitam os navios a atracar; os navios que operam no porto podem carregar ou descarregar algum tipo de carga a granel e só podem atracar nos berços que operam as suas cargas; o modelo proposto elabora a sequência de atendimento dos navios em cada berço. O modelo foi implementado no CPLEX e testes foram realizados com dados reais para sua avaliação.

Umang *et al.* (2013) propuseram um modelo baseado na realidade do porto SAQR nos Emirados Árabes Unidos, o maior porto do Oriente Médio. A definição do problema foi dada da seguinte maneira: considerou-se um conjunto de navios, para ser ancorado num cais contínuo de dado comprimento num horizonte de tempo definido. Adotou-se a chegada dos navios como dinâmica e um *layout* de cais, uma extensão do processo híbrido. O cais foi dividido em conjuntos de seções de comprimentos variáveis. Em um trabalho de atracação viável, um determinado navio pode ocupar mais de uma seção, no entanto, um determinado berço não pode ser ocupado por mais de um navio ou por parte de um navio, em qualquer dado momento. Particionamento do espaço de cais em seções de comprimento variável traz maior flexibilidade para o modelo.

Turkogullari *et al.* (2014) desenvolveram um modelo que resolve o PAB e o Problema

de Alocação de Guindaste nos berços. O modelo possui algumas características específicas, são elas: o horizonte de planejamento é dividido em períodos iguais, todos os berços são considerados de mesmo tamanho, o tempo de alocação do guindaste é desprezível, cada navio tem um número mínimo e máximo de guindastes que podem ser atribuídos. Quando desconsiderados os guindastes, o modelo matemático gera soluções ótimas para até 60 navios. Porém, para os casos com alocação de guindaste foi resolvido através de uma heurística.

Imai *et al.* (2014) propuseram um problema denominado *Strategic Berth Template Problem* (BTPS), onde é definida a alocação de navios que possuem contrato de atracação de longo termo e, por essa razão, pressupõe que sempre os navios repetirão suas visitas ao porto de maneira cíclica. Assim, eles definiram um planejamento cíclico denominado *Cylinder* que representa o período planejado, no caso do artigo o período é uma semana. Como um cilindro, a cada volta, o planejamento vai se repetindo. Como os navios são planejados com base em contratos, esta programação não é alterada frequentemente, porém, eventualmente, com a entrada de novos contratos, faz-se necessário replanejar este *Cylinder*. O BTPS tem por objetivo minimizar a diferença entre o tempo de atracação e o tempo de chegada, enquanto o PAB tem por objetivo minimizar o tempo total de serviço, ou seja, o tempo total de término de operação menos o tempo de chegada. No artigo, eles consideraram também a possibilidade do não atendimento de alguns navios por meio de penalidades impostas pelo operador portuário para os navios que não são estrategicamente importantes para o porto.

Hu (2015a) criou um problema para o PAB discreto que minimiza o atendimento ao navio no período noturno e o atraso no atendimento. Hu (2015b) propõe um modelo para o PAB com balanceamento de guindastes para um terminal de contêineres com penalidades para chegadas antecipadas ou atraso nas partidas.

Zhen (2015) formulou um modelo para o PAB considerando na alocação dos navios nos berços o seu tempo de operação. Porém, esse tempo de manuseio é incerto. Assim, o autor propõe uma formulação de programação estocástica, que pode lidar com distribuições de probabilidade arbitrárias para o desvio de tempo das operações dos navios, e uma formulação robusta que é aplicável a situações em que limitadas informações sobre distribuições de probabilidade está disponível. A relação entre os dois modelos é também investigada de forma analítica. Alguns algoritmos de meta-

heurística são sugeridas para resolver os modelos.

Frojan *et al.* (2015) apresentaram um modelo para o PAB com berços contínuos com comprimentos conhecidos e um conjunto de navios com características conhecidas, comprimento, hora de chegada, tempo de operação, hora de partida desejada e posição desejada em cada berço. O problema consiste em determinar o tempo de atracação, o berço e a posição no berço para cada navio, de tal maneira que o custo total seja minimizado.

O Quadro 1 mostra a relação de todas as referências bibliográficas citadas neste capítulo.

Quadro 1 – Revisão bibliográfica

(continua)

Ano	Autor(es)	Artigo	Publicação	Solução
2001	Imai <i>et al.</i>	The dynamic berth allocation problem for a container port.	Transportation Research	Relaxação Lagrangiana
2003	Imai <i>et al.</i>	Berth allocation with service priority.	Transportation Research	Algoritmo Genético
2005	Cordeau <i>et al.</i>	Models and tabu search heuristics for the berth-allocation problem.	Transportation Science	Busca Tabu
2005	Imai <i>et al.</i>	Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach.	Transportation Research	Algoritmo Heurístico
2006	Boile <i>et al.</i>	Berth Allocation with service priorities: a linear reformulation.	Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering	Heurística baseada no conceito de otimização em linha com a migração limitada
2006	Zhou <i>et al.</i>	A dynamic berth allocation model based on stochastic consideration.	Proceedings of the Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA 2006)	Algoritmo Genético
2007	Imai <i>et al.</i>	Berth allocation at indented berths for mega-containerships	European Journal of Operational Research	Algoritmo Genético
2007	Monaco e Sammarra	The berth allocation problem: a strong formulation solved by a Lagrangean approach.	Transportation Science	Relaxação Lagrangiana
2007	Imai <i>et al.</i>	The Berth Allocation Problem with Service Time and Delay Time Objectives.	Maritime Economics & Logistics	Relaxação Lagrangeana; Algoritmo Genético
2008	Hansen <i>et al.</i>	Variable neighborhood search for minimum cost berth allocation.	European Journal of Operational Research	Variable Neighborhood Search (VNS)
2008	Imai <i>et al.</i>	Berthing ships at a multi-user container terminal with a limited quay capacity.	Transportation Research	Algoritmo Genético
2009	Liang <i>et al.</i>	A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for the berth allocation planning.	Computers & Industrial Engineering	Algoritmo Genético
2011	Zhen <i>et al.</i>	A decision model for berth allocation under uncertainty.	European Journal of Operational Research	Simulated Annealing (SA)
2012	Oliveira <i>et al.</i>	Clustering Search for the Berth Allocation Problem.	Expert Systems With Applications	Clustering Search (CS)
2012	Xu <i>et al.</i>	Berth allocation with time-dependent physical limitations on vessels.	European Journal of Operational Research	Heurísticas
2012	Ma <i>et al.</i>	Berth allocation planning for improving container terminal performances.	Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management	Algoritmo Genético

Quadro 1 – Revisão bibliográfica

(continuação)

2013	Rosa <i>et al.</i>	Proposta de um Modelo Matemático para o Problema de Alocação de Berços para Múltiplas Cargas (PAB-MC) com Restrições Temporais e Espaciais.	Transporte em Transformação XVII	Programação Linear Inteira Mista
2013	Umang <i>et al.</i>	Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports.	Transportation Research	Squeaky Wheel Optimization (SWO)
2014	Turkogullari <i>et al.</i>	Optimal berth allocation and time-invariant quay crane assignment in container terminals.	European Journal of Operational Research	Cutting Plane Algorithm
2014	Imai <i>et al.</i>	The strategic berth template problem.	European Journal of Operational Research	Relaxação Langrangiana com Método de Subgradiente
2015	Hu	Multi-objective genetic algorithm for berth allocation problem considering daytime preference.	European Journal of Operational Research	Algoritmo Genético Multi Objetivo
2015	Hu	Heuristics for solving continuous berth allocation problem considering periodic balancing utilization of cranes.	European Journal of Operational Research	Neighborhood Search
2015	Zhen	A decision model for berth allocation under uncertainty.	European Journal of Operational Research	Simulated Annealing (SA)
2015	Frojan <i>et al.</i>	The continuous berth allocation problem in a container terminal with multiple quays.	European Journal of Operational Research	Algoritmo Genético

Fonte: Autor.

Após esta revisão bibliográfica não foram encontrados artigos publicados que tratem especificamente da possibilidade de cancelamento de escala em navios *liners* e, portanto, o modelo matemático proposto nesta dissertação é uma contribuição no estudo e desenvolvimento da classe de problemas PAB. Também não foi encontrado nenhum artigo que tratasse o PAB por meio de um modelo de Roteamento de Veículos com Prêmio, Janela de Tempo e Múltiplos Depósitos.

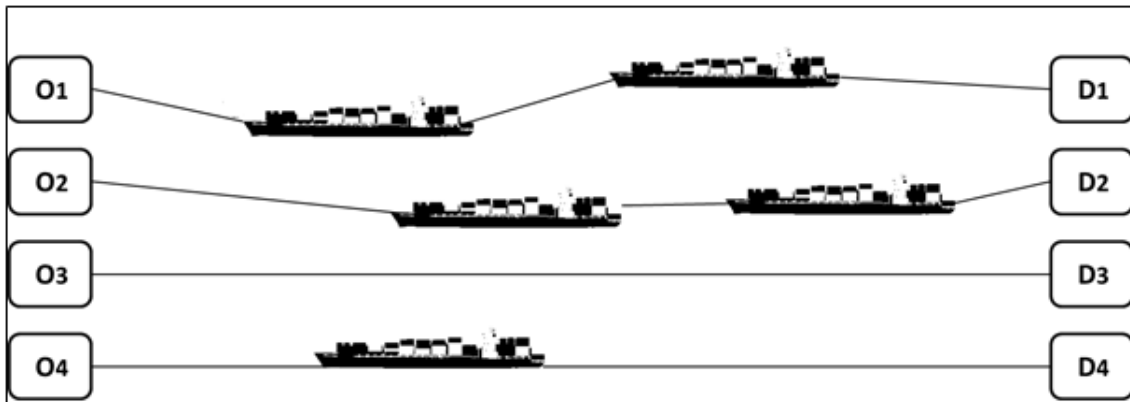
Das referências bibliográficas pesquisadas, a que mais se assemelha a abordagem tratada nesta dissertação é a abordagem proposta por Cordeau *et al.* (2005) onde eles propuseram tratar o PAB como um problema de roteamento de veículos. Assim sendo, a próxima seção apresentará a abordagem do PAB proposta por Cordeau *et al.* (2005).

2.5.1 Modelo matemático proposto por Cordeau *et al.* (2005)

O modelo matemático proposto nesta dissertação é inspirado em Cordeau *et al.* (2005) que trata o PAB como um Problema de Roteamento de Veículos Múltiplos Depósitos com Janela de Tempo, onde os navios são vistos como clientes e os berços como garagens em que um veículo fictício está localizado. Há, então, um veículo para

cada garagem. Cada veículo começa e termina sua rota em sua garagem. Os navios são modelados como vértices em um multigrafo. Cada garagem está dividida em um vértice de origem e um vértice de destino e janelas de tempo podem ser impostas em cada vértice. Nos vértices de origem e de destino, as janelas de tempo correspondem ao período de disponibilidade do berço correspondente, conforme Figura 6.

Figura 6: Roteamento de Veículos Múltiplos Depósitos.



Fonte: Autor.

Conjuntos:

N : Conjunto de navios e $n = |N|$;

M : Conjunto de berços, $m = |M|$;

Parâmetros:

t_i^k : Tempo de operação do navio i no berço k ;

a_i : Horário de chegada do navio i ;

s^k : Horário do início da disponibilidade (abertura) do berço k ;

e^k : Horário do final da disponibilidade (fechamento) do berço k ;

b_i : Tempo máximo para atendimento do navio i ;

v_i : Valor do tempo de serviço do navio i .

O problema é modelado em um multi-grafo $G^k = (V^k, A^k) \forall k \in M$, onde $V^k = N \cup \{o(k), d(k)\}$ e $A^k \subseteq V^k \times V^k$.

As seguintes variáveis e constantes são definidas:

$x_{ij}^k \in \{0,1\}$ $k \in M, (i,j) \in A^k$, $x_{ij}^k = 1$ se e somente se o navio j é atendido após o navio i no berço k ;

T_i^k $k \in M, i \in N$: Horário de atracação de navio i no berço k ;

$T_{o(k)}^k$ $k \in M$: Tempo do começo de operação do berço k , ou seja, o momento em que o primeiro navio atraca no berço;

$T_{d(k)}^k$ $k \in M$: Tempo do término de operação do berço k , ou seja, o momento em que o último navio desatraca no berço;

$M_{ij}^k = \max \{b_i + t_i^k - a_j, 0\}$ $k \in M; i, j \in N$.

Função Objetivo:

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} v_i [T_i^k - a_i + t_i^k \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k] \quad (1)$$

Restrições:

$$\sum_{k \in M} \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{o(k),j}^k = 1 \quad \forall k \in M \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{o(k)\}} x_{i,d(k)}^k = 1 \quad \forall k \in M \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k - \sum_{j \in N \cup \{o(k)\}} x_{ji}^k = 0 \quad \forall k \in M, \forall i \in N \quad (5)$$

$$T_i^k + t_i^k - T_j^k \leq (1 - x_{ij}^k) M_{ij}^k \quad \forall k \in M, \forall (i,j) \in A^k \quad (6)$$

$$a_i \leq T_i^k \quad \forall k \in M, \forall i \in N \quad (7)$$

$$T_i^k + t_i^k \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k \leq b_i \quad \forall k \in M, \forall i \in N \quad (8)$$

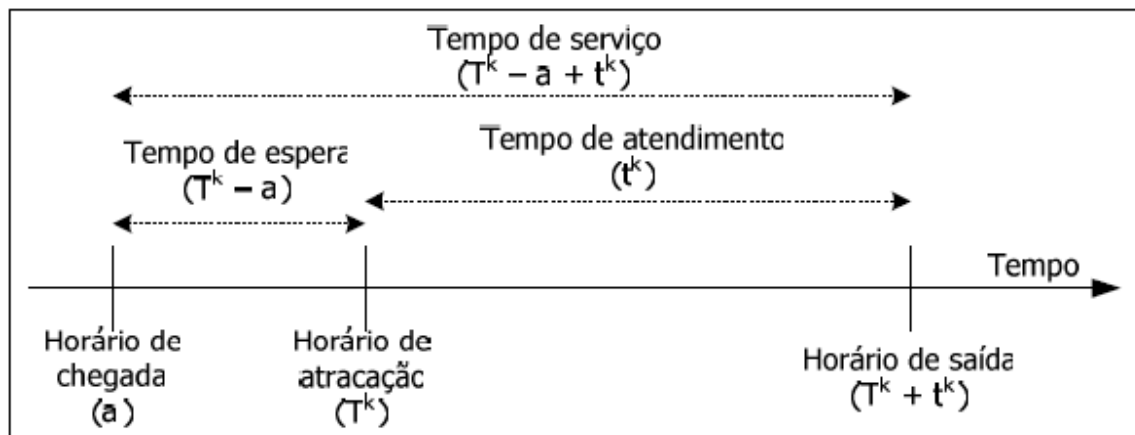
$$s^k \leq T_{o(k)}^k \quad \forall k \in M \quad (9)$$

$$T_{d(k)}^k \leq e^k \quad \forall k \in M \quad (10)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall k \in M, \quad \forall (i,j) \in A^k \quad (11)$$

A função objetivo é a minimização da soma ponderada dos tempos de serviço, ou seja, minimiza o tempo decorrido desde o momento em que os navios chegam, atracam e são atendidos, conforme detalhada na Figura 7, considerando um custo de serviço para esse tempo. Quando navio i não atraca no berço k , o termo correspondente na função objetivo é zero porque $\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k = 0$ e $T_i^k = a_i$ e o objetivo é minimizado.

Figura 7: Definição da equação de tempo de serviço.



Fonte: Cordeau *et al.* (2005).

As Restrições (2) garantem que cada navio i é atendido por apenas um berço. As Restrições (3) e (4) garantem, respectivamente, que um navio será o primeiro a ser atendido em cada berço, e outro será o último, enquanto a conservação do fluxo (atendimento para os demais navios) é assegurada pelas Restrições (5). As Restrições (6) fazem o cálculo do horário de atracação dos navios, a consistência da variável T_i^k com a sequência no berço é garantida pela restrição. As Restrições (7) e (8) garantem, respectivamente, que o horário de atracação seja após a chegada do

navio, e que o horário do término do atendimento do navio seja anterior ao horário limite do tempo máximo para atendimento. E, a não violação das janelas de tempo nos berços são garantidas pelas Restrições (9) e (10). As Restrições (11) definem a variável x_{ij}^k como binária.

Vale ressaltar que esta dissertação difere do modelo proposto por Cordeau *et al.* (2005) por tratar o PAB como um problema de roteamento com prêmios, ou seja, permite que navios não sejam atendidos e, portanto, possam ter suas escalas canceladas.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo é apresentada a classificação da pesquisa, as etapas desenvolvidas no estudo, uma breve apresentação do TVV, tomado como exemplo para aplicação do modelo proposto, e as instâncias desenvolvidas para os testes.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Conforme proposto por Vergara (2013), esta pesquisa pode ser classificada quanto aos fins e quanto aos meios. Quanto aos fins, ela se classifica como aplicada e metodológica. Quanto aos meios de investigação, é dita como bibliográfica, documental e de campo.

Quanto aos fins, as evidências das classificações são apresentadas a seguir:

- Aplicada: a pesquisa tem por objetivo gerar conhecimento para aplicação prática que neste caso é resolver um problema concreto existente na alocação de navios nos berços dos portos e a resolução de tal problema consiste em minimizar o cancelamento de escalas.
- Metodológica: uma vez que a pesquisa tem como objetivo desenvolver um modelo matemático que faça o planejamento de atracação de navios nos berços dos portos.

Com relação aos meios de investigação, as evidências da classificação são apresentadas abaixo:

- Bibliográfica: a pesquisa tem como base estudos prévios desenvolvidos e publicados em artigos, revistas, dissertações, teses, jornais, relatórios e legislação específica para o desenvolvimento do referencial teórico e definição do método referencial para a resolução do problema.
- Documental: para a realização do estudo, as instâncias criadas serão baseadas em dados reais fornecidos pelo TVV.
- De campo: foram realizadas visitas e entrevistas com funcionários do porto em estudo.

3.2 ETAPAS DESENVOLVIDAS

A realização deste projeto deu-se a partir do desenvolvimento de um modelo matemático para o planejamento de atracação de navios *liners* para terminais de contêineres com possibilidade de cancelamento de escala, baseado no PRV com Prêmio, Múltiplos Depósitos e Janela de Tempo.

Após uma revisão bibliográfica sobre o PAB, utilizou-se como referência a abordagem proposta por Cordeau *et al.* (2005), onde o PAB é considerado como um PRV. Porém, no modelo proposto por Cordeau *et al.* (2005), todos os navios são atendidos. Para tratar as questões referentes à possibilidade de cancelamento de escala proposta nesta dissertação, o PAB é tratado com base no PRV com prêmio que considera que alguns navios podem não ser atendidos em função do tempo de espera para atracação ser maior do que a janela de atracação contratada entre o navio e o porto. A janela de atracação é o período compreendido entre o tempo de chegada do navio ao porto e o tempo de atracação.

Como o porto pode não atender toda a demanda de navios, ocorrendo o problema de cancelamento de escala, é preciso definir quais navios maximizam a sua receita em um tempo de serviço reduzido, visando ter disponibilidade para atracar o maior número de navios possível.

A decisão sobre quais navios atender irá recair no valor a ser recebido de receita pelo porto para atender o navio. Assim, enquanto o modelo proposto por Cordeau *et al.* (2005) tem por objetivo minimizar o tempo de serviço, que é o tempo de espera mais o tempo de operação, o objetivo do modelo proposto nesta dissertação é de maximizar a receita do porto e ao mesmo reduzir o tempo de espera do navio para atendimento.

Para avaliar a qualidade do modelo proposto, decidiu-se aplicá-lo ao porto TVV onde podem ocorrer cancelamento de escalas, visto que devido a alguns contratos comerciais, caso o atendimento não ocorra dentro de uma determinada janela de atracação, o navio não atraca e cancela sua escala no TVV e se encaminha para o próximo porto da sua sequência de viagem.

Para levantar as informações sobre o cancelamento de escala e características do porto, foram realizadas visitas ao TVV. Como fonte primária de dados foram utilizadas as seguintes informações correspondentes a todas as atracações dos meses de julho, agosto e setembro de 2014: horário de chegada ao porto, horários de atracação e

desatracação, berço utilizado e carga do navio.

Tendo em vista que os navios que cancelaram escala não atracaram no porto, este não possui os registros dos mesmos. Além disso, valores referentes às receitas dos navios não foram fornecidos por questões de sigilo comercial. Assim, optou-se por criar instâncias baseadas nos dados reais introduzindo de maneira randômica navios que possuam janela de atracação e que não poderiam ser atracados. As informações financeiras foram formuladas com base em referencial de mercado.

O modelo foi executado no solver CPLEX 12.6 (IBM, 2015). A execução foi em um computador com processador *Intel Core i7* e 16GB de memória RAM. Os resultados obtidos foram analisados.

3.3 INSTÂNCIAS DESENVOLVIDAS

A partir dos dados levantados, as instâncias foram elaboradas conforme apresentado na Tabela 3. A coluna Bloco informa o grupo das instâncias que serão analisadas. A coluna Instância informa o número da instância.

A coluna Tipo de Chegada dos Navios define se os navios têm chegada estática, estando todos no momento zero disponíveis para atracação, ou chegada dinâmica, com tempos de chegada definidos como constante e nenhum navio sendo possível atracar em tempo inferior a sua hora de chegada. Vale ressaltar que a chegada estática não reflete a realidade da maioria dos portos, inclusive do porto em estudo, mas se justifica na hipótese remota de um congestionamento do porto.

Na coluna N° de Navios definimos a quantidade de navios para cada uma das instâncias. Utilizamos como padrão 20 navios que representa a média da realidade no porto estudado para um horizonte de planejamento de 15 dias, período usualmente utilizado para programação no Porto. Porém, objetivando testar a robustez do modelo proposto, foram criadas instâncias com 40 e 80 navios.

A coluna N° de Berços estabelece a quantidade de berços para as instâncias definidas. O porto utilizado como estudo de caso para esta dissertação possui dois berços, que foi definido como padrão para a maioria das instâncias. Porém, portos com 4 e 6 berços formaram instâncias maiores também para analisar a robustez do modelo.

Na coluna Janela de Atracação, em horas, é informado o tempo máximo que o porto tem para atender o navio e evitar o cancelamento de escala. Foram criadas quatro possibilidades de janela de atracação para teste do modelo matemático proposto. Primeiramente, 12 horas e 24 horas, para se analisar o comportamento do modelo com o aumento da janela de atracação. Depois, variando de 12 a 36 horas, o que, segundo informações do TVV, abrange a maioria de seus contratos comerciais. E, sem tempo limite para janela de atracação, que não é o foco deste trabalho, mas é importante para se verificar se o modelo é adaptável a essa situação.

A coluna final da Tabela 3, intitulada Função Objetivo, informa se a função objetivo daquela instância possui receita ou não. A função objetivo do modelo proposto objetiva maximizar receita e minimizar tempo de atendimento. Porém, considerando que o valor da receita é sempre muito superior ao tempo de atendimento, este último critério apenas será utilizado na escolha do navio em situações em que as receitas de dois navios forem iguais ou muito próximas. Por isso, algumas instâncias foram analisadas sem a receita na função objetivo para comparar o comportamento do modelo matemático neste caso.

TABELA 3 - INSTÂNCIAS PROPOSTAS

Bloco	Instância	Tipo de Chegada dos Navios	Nº de Navios	Nº de Berços	Janela de Atracação (h)	Função Objetivo
1	1	Dinâmica	20	2	12	Com Receita
	2				24	
	3				Variando de 12 a 36	
	4				Sem tempo limite para atendimento	
2	5	Estática	20	2	12	Com Receita
	6				24	
	7				Variando de 12 a 36	
	8				Sem tempo limite para atendimento	
3	9	Dinâmica	20	2	12	Sem Receita
	10				24	
	11				Variando de 12 a 36	
	12				Sem tempo limite para atendimento	
4	13	Dinâmica	20	2	24	Com Receita
	14		40	2		
	15		80	2		
	16		20	4		
	17		40	4		
	18		80	4		
	19		20	6		
	20		40	6		
	21		80	6		

Fonte: Autor.

As instâncias propostas na Tabela 3 são apresentadas e analisadas em blocos, para criar situações em que se possa avaliar a aplicabilidade do modelo matemático proposto em casos reais.

No Bloco 1, as Instâncias de 1 a 4 variam apenas a janela de atracação dos navios. Foi estabelecida a chegada de navios como dinâmica para um porto de 2 berços com 20 navios para atracar, conforme a realidade do porto estudado. O objetivo deste bloco é analisar o impacto da janela de atracação, considerando que pode variar de acordo com o contrato comercial estabelecido. Foram definidas quatro instâncias de teste: 1) com janela de atracação de 12 horas; 2) com janela de atracação de 24 horas; 3) com janela de atracação variando de 12 a 36 horas; 4) sem janela de atracação,

conforme explicado na apresentação da Tabela 3.

Para a instância sem janela de atracação, o horizonte de planejamento inicia-se no tempo zero e termina no limite de tempo de planejamento. Assim, a primeira parcela da função objetivo deixa de influenciar a função objetivo alcançada pelo modelo, dado que todos os navios serão atracados em qualquer horizonte de tempo. O que passaria a definir o sequenciamento dos navios para esta situação seria a segunda parte da função objetivo do problema, que tem por finalidade minimizar o tempo entre a chegada do navio e sua atracação.

Para este bloco, a análise do impacto da variação da janela de atracação dar-se-á pelo comparativo da receita adquirida e do atraso total para cada instância.

O Bloco 2 tem por objetivo analisar a situação onde todos os navios já se encontram no porto prontos para atracar no tempo 0, ou seja, todas as datas de chegada ao porto são iguais a 0. Neste bloco é realizado um comparativo das instâncias correspondentes no bloco anterior, ou seja, instâncias similares que diferem somente por considerarem que os navios têm datas diferentes de chegada ao porto. As instâncias comparadas serão: 1 e 5; 2 e 6; e 3 e 7; e 4 e 8.

Embora a maioria dos portos trabalhem com chegadas dinâmicas, inclusive o porto em estudo nesta dissertação, a análise realizada nas instâncias do Bloco 2 é necessária para situações em que ocorram congestionamento no porto. Nestas situações, há uma tendência de redução da quantidade de navios atendidos, visto que todos estão disponíveis no mesmo tempo, zero, o que pode levar ao extrapolamento da janela de atracação e conseqüentemente reduzir a capacidade do porto em atendê-los. Por isso, existe a necessidade de análise do impacto desta redução na receita do porto.

No Bloco 3, pelos motivos descritos anteriormente, na apresentação da Tabela 3, foi retirada da função objetivo a maximização da receita. Buscou-se verificar com estas instâncias qual seria o comportamento do modelo matemático quando objetiva-se apenas reduzir o tempo de espera para atendimento.

Além das análises referentes ao número de navios atracados e ao tempo de espera total para atendimento, a receita para cada instância é calculada manualmente, visto que a mesma não será mais uma saída do processamento do modelo, para verificar se houve uma redução na receita e em qual proporção. Para isso, uma comparação

com as instâncias do Bloco 1 é realizada, considerando que a única diferença entre as instâncias do Bloco 1 e 3 é a função objetivo.

Por fim, o Bloco 4 apresenta instâncias com cenários maiores que os possíveis no TVV para testar o tempo de execução do CPLEX para cada instância e o seu respectivo GAP, que será definido no capítulo 6 na apresentação dos resultados.

Para testar estas instâncias foi mantida a chegada dos navios como dinâmica, que é o mais próximo da realidade dos portos, a função objetivo com receita, que é a proposta deste trabalho, e um tempo máximo de atendimento de 24 horas para dar mais possibilidade de atracação dos navios e, assim, ampliar o horizonte de solução, dificultando mais a resolução do modelo de forma ótima pelo CPLEX, que é o objetivo deste bloco.

Para cada uma das instâncias do Bloco 4, é realizada uma análise do impacto do aumento de número de berços e navios, sob a ótica do número de navios atracados, da receita total do porto e do atraso gerado.

3.4 PORTO ESTUDADO

Para testar a eficiência do modelo, pretende-se aplicá-lo a um caso real, no TVV. O TVV, mostrado na Figura 8, é um terminal portuário do Cais de Capuaba, Vila Velha, com 02 berços, que operam principalmente navios de contêiner, mas operam também navios *roll-on roll-off*, carga geral e mármore e granito. No caso dos três primeiros, são navios *liners* e, portanto, estão sujeitos a possibilidade do cancelamento de escala. Para os demais navios, *tramps*, instâncias sem janela de atracação serão testadas.

Figura 8 – Terminal de Vila Velha



Fonte: CODESA (2011).

Este terminal possui uma norma de programação e atracação, Resolução 03/2007, para casos de contratos comerciais específicos, onde o ítem 4.1 desta norma estabelece que poderão ser concedidos a armadores horários fixos de operação, e tempo máximo para atendimento, ou seja, janela de atracação. Por isso, modelos matemáticos que auxiliem este porto a atender o máximo de navios respeitando as janelas de atracação são importantes no sentido de atender e manter contratos comerciais e atrair novos armadores com seus navios.

O TVV é considerado um dos terminais brasileiros com o melhor índice de produtividade nas operações de embarque e descarga de navios, segundo a Associação Brasileira dos Terminais de Contêineres de Uso Público (ABRATEC). Nas Tabelas 4 e 5 são apresentados os dados de atracação de navios, movimentação de cargas e de contêineres, nos anos de 2013 e 2014.

TABELA 4 – ATRACAÇÃO DE NAVIOS E MOVIMENTAÇÃO DE CONTÊINERES TVV

		2013	2014
Atracação de Navios (und.)	Berço 203	105	119
	Berço 204	185	232
	Total	290	351
Movimentação de Contêineres (TEU)	Embarque	83.667	92.552
	Desembarque	86.404	91.097

Fonte: CODESA

Nota: Dados adaptados pelo autor.

TABELA 5 – MOVIMENTAÇÃO DE CARGAS TVV

		2013	2014
Embarque (t)	Longo Curso	1.574.878	1.962.107
	Cabotagem	51.301	48.196
Desembarque (t)	Longo Curso	1.011.600	897.009
	Cabotagem	12.593	7.561

Fonte: CODESA

Nota: Dados adaptados pelo autor.

É possível verificar nas Tabelas 4 e 5 a crescente demanda de atracação de navios, movimentação de contêineres e da tonelagem total de cargas do ano de 2013 para 2014 no TVV, o que justifica uma ferramenta que auxilie no planejamento de atracação de navios no porto.

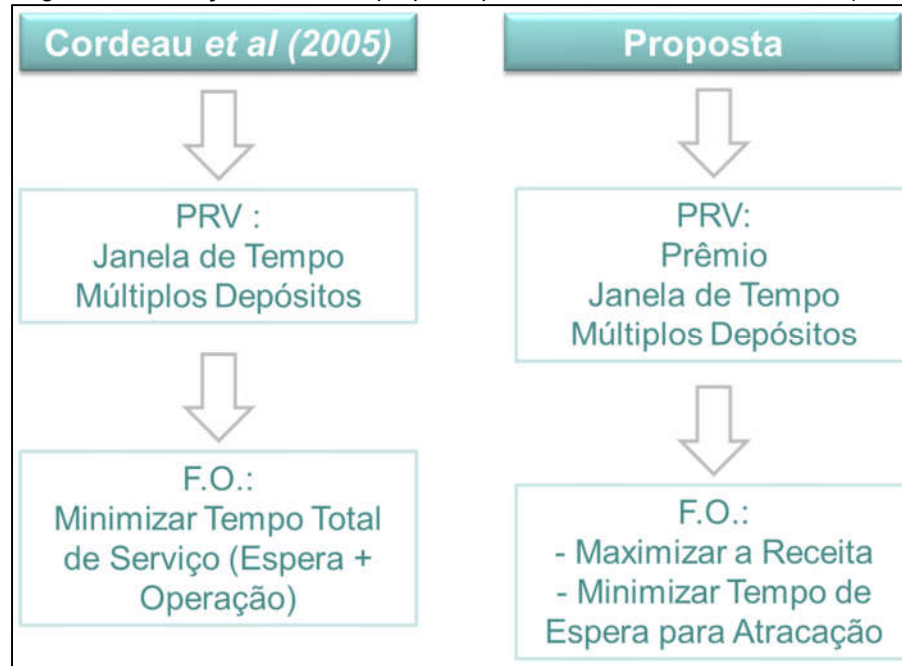
4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

Os navios de contêiner geralmente são contratados pela categoria de serviço *liner*, possuindo uma escala de atracação nos portos definida e publicada com antecedência. Ocorre que, caso atrase a atracação do navio em algum porto da rota, o navio atrasa sua atracação nos portos subsequentes, levando ao rompimento da escala. Para evitar isto, geralmente é estabelecido com o porto um tempo máximo para o navio atracar após a sua chegada, que denominados como janela de atracação. Portanto, se o porto não atraca o navio dentro desta janela de atracação estabelecida, o navio não atraca e segue sua rota, cancelando sua escala naquele porto.

Este problema, denominado cancelamento de escala, é crescente no Brasil nos últimos anos devido ao crescimento da movimentação marítima e de contêineres gerando prejuízos financeiros para o porto e para os navios. Assim, para auxiliar o planejamento da atracação nos portos que não conseguem atracar todos os navios previstos dentro da sua janela de atracação contratada, é proposto nesta dissertação um modelo matemático que auxilie na decisão de quais navios atracar e quais terão sua escala cancelada.

O modelo proposto, Problema de Alocação de Berços com Cancelamento de Escala (PAB-CA), utiliza a abordagem de modelar o PAB como um Problema de Roteamento de Veículos Múltiplos Depósitos com Janela de Tempo como proposto por Cordeau *et al.* (2005). Contudo, diferentemente de Cordeau *et al.* (2005), o modelo proposto nesta dissertação modela matematicamente o PAB como um Problema de Roteamento de Veículos com Prêmio considerando janela de tempo e múltiplos depósitos com função objetivo de maximizar a receita do porto advinda do atendimento dos navios e também reduzir o tempo de espera para atracar. O modelo proposto difere dos demais modelos por considerar a possibilidade de navios não serem atracados por conta do limite da janela de atracação. As principais diferenças do modelo proposto nesta dissertação para o modelo proposto por Cordeau *et al.* (2005) podem ser visualizadas na Figura 9.

Figura 9: Diferenças do modelo proposto para o modelo de Cordeau *et al.* (2005).



Fonte: Autor.

Para definição dos conjuntos, faz-se inicialmente necessário estabelecer alguns parâmetros:

nb : Número de berços;

nn : Número de navios;

M : Valor muito grande para lógica do modelo.

Os seguintes conjuntos foram definidos a seguir e são apresentados graficamente na Figura 10.

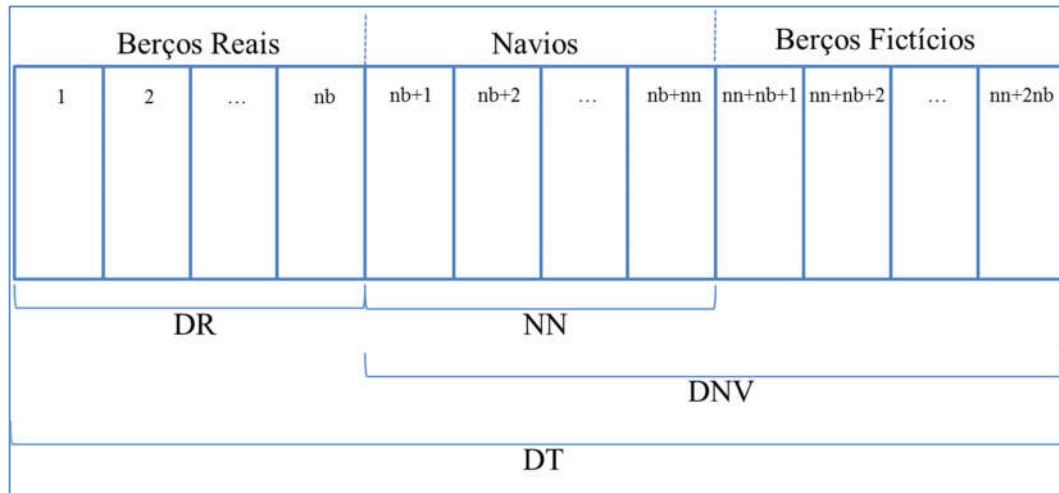
DR : Conjunto de berços reais $1...nb$;

NN : Conjunto de navios $(nb+1)...(nb+nn)$;

DNV : Conjunto de navios e berços fictícios $(nb+1)...(2*nb+nn)$;

DT : Conjunto de berços reais, fictícios e navios $1...(2*nb+nn)$.

Figura 10: Definição dos Conjuntos.



Fonte: Autor.

Os demais parâmetros do modelo são:

t_i^k : Tempo de operação do navio i no berço k ;

a_i : Instante de chegada do navio i ;

b_i : Tempo máximo para o navio i ser atendido a partir do tempo de sua chegada, portanto, a janela de atracação é definida como sendo $[a_i, (a_i + b_i)]$;

R_i : Receita portuária por operar o navio i ;

As seguintes variáveis de decisão são definidas:

x_{ij}^k : Variável binária. Assume valor 1 se o navio j é atendido após o navio i no berço k , e 0 caso contrário;

np_i : Variável binária. Assume valor 1 se o navio i atraca em algum berço, e 0 caso contrário;

T_i^k : Momento de atracação do navio i no berço k .

Com base nos parâmetros, conjuntos e variáveis de decisão apresentados anteriormente, a seguir são apresentadas a função objetivo e as restrições do modelo matemático proposto.

Função Objetivo:

$$\text{Max} \sum_{i \in NN} (np_i R_i) - \sum_{i \in NN} \sum_{k \in DR} (T_i^k - (a_i \sum_{j \in NN} x_{ij}^k)) \quad (12)$$

Restrições:

$$np_i = \sum_{k \in DR} \sum_{j \in DNV} x_{ij}^k \quad \forall i \in NN \quad (13)$$

$$\sum_{k \in DR} ((\sum_{j \in NN} x_{ij}^k) + x_{i,(k+nn+nb)}^k) = np_i \quad \forall i \in NN \quad (14)$$

$$(\sum_{j \in NN} x_{k,j}^k) + x_{k,(k+nn+nb)}^k = 1 \quad \forall k \in DR \quad (15)$$

$$(\sum_{i \in NN} x_{i,(k+nn+nb)}^k) + x_{k,(k+nn+nb)}^k = 1 \quad \forall k \in DR \quad (16)$$

$$(\sum_{i \in NN} x_{(k+nn+nb),i}^k) + x_{(k+nn+nb),k}^k = 0 \quad \forall k \in DR \quad (17)$$

$$(\sum_{j \in NN} x_{j,k}^k) + x_{(k+nn+nb),k}^k = 0 \quad \forall k \in DR \quad (18)$$

$$((\sum_{j \in NN} x_{i,j}^k) + x_{i,(k+nn+nb)}^k) - ((\sum_{j \in NN} x_{j,i}^k) + x_{k,i}^k) = 0 \quad \forall k \in DR, \forall i \in NN \quad (19)$$

$$T_i^k + t_i^k - T_j^k \leq (1 - x_{ij}^k)M \quad \forall k \in DR, \forall i, j \in NN \quad (20)$$

$$T_i^k \geq a_i \sum_{j \in NN} x_{ij}^k \quad \forall k \in DR, \forall i \in NN \quad (21)$$

$$T_i^k \leq (a_i + b_i) \sum_{j \in NN} x_{ij}^k \quad \forall k \in DR, \forall i \in NN \quad (22)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad \forall k \in DR, \forall i, j \in DT \quad (23)$$

$$T_i^k \geq 0 \quad \forall k \in DR, \forall i \in NN \quad (24)$$

$$np_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in NN \quad (25)$$

A função objetivo, Equação (12), é dividida em duas partes. A primeira parte representa a receita do porto, calculada pelo somatório das receitas dos navios atendidos, e a segunda parte representa o tempo de espera do navio para atracar. Caso não ocorra a atracação do navio, a segunda parcela assumirá valor zero, pois como o navio não foi atendido, a somatória $\sum_{j \in NN} x_{ij}^k$ será igual a 0 e, também, o instante de atracação T_i^k será igual a zero em função das Restrições (21) e (22).

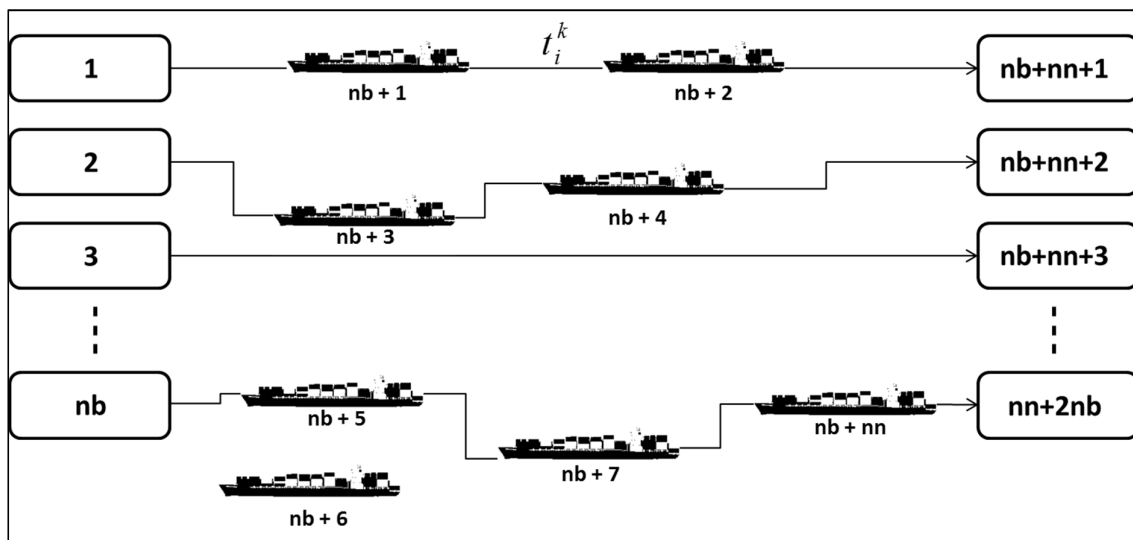
A primeira parte da Equação (12) tem maior peso que a segunda, considerando que a receita é dada em milhares de reais e o tempo de espera em horas. Porém, a segunda parcela é importante para os casos em que o modelo necessite optar por navios que tenham receitas semelhantes, passando a ser a segunda parcela da Equação (12) fator determinante na decisão de qual navio atracar. Além disso, a segunda parcela da Equação (12) propicia um melhor atendimento aos navios, impedindo que os mesmos utilizem toda sua janela de atracação caso não tenha necessidade. A função objetivo deverá ser maximizada.

As Restrições (13) definem np_i , que será 0 se o navio não atracar e 1 caso contrário. As Restrições (14) garantem que cada navio i seja atendido por apenas um berço. As Restrições (15) e (16) garantem, respectivamente, que um navio será o primeiro a ser atendido em cada berço, e outro será o último, enquanto a conservação do fluxo (atendimento para os demais navios) é assegurada pelas Restrições (19). As Restrições (17) e (18) garantem, respectivamente, que o fluxo de atendimento de navios comece em um berço real e termine em um berço fictício. As Restrições (20) fazem o cálculo do horário de atracação dos navios, a consistência da variável T_i^k com a sequência no berço é garantida pelas restrições. As Restrições (21) e (22) garantem, respectivamente, que o horário de atracação seja após a chegada do navio e anterior ao horário limite para a atracação do navio, sendo que nas situações em que o navio não atraca seu valor é zero. As Restrições (23) e (25), definem as variáveis x_{ij}^k e np_i , respectivamente, como binárias. As Restrições (24) garantem que a variável T_i^k seja sempre maior do que zero.

O funcionamento do modelo dar-se-á conforme detalhado na Figura 11. Na Figura 11,

veículos fictícios ocupam os berços reais que vão de 1 até nb e formam o conjunto DR . Esses veículos saem de sua garagem, que no caso são os berços, e atendem ao maior número possível de navios que formam o conjunto NN e compreendem os valores de $nb + 1$ até $nb + nn$. A distância percorrida entre um navio e outro se refere ao tempo de operação do primeiro navio. No caso do primeiro navio, a distância percorrida entre o berço real e este navio é 0. Logo, após atender o maior número possível de navios, o veículo fictício volta à sua garagem, ou seja, seu berço fictício equivalente, que está compreendido entre os valores de $nb + nn + 1$ a $nn + 2nb$.

Figura 11 – Funcionamento do modelo matemático proposto.



Fonte: Autor.

No modelo matemático proposto, podem existir navios que não atraquem, como é o caso do Navio $nb + 6$ na Figura 11, assim como berços podem não atracar nenhum navio, fato representado na Figura 11 pelo Berço 3, onde seu veículo fictício faz a trajetória direta para o berço fictício $nb + nn + 3$.

5 APLICAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

As 21 instâncias desenvolvidas na Seção 3.3 foram utilizadas para avaliar o modelo matemático proposto por meio da execução realizada no solver CPLEX versão 12.6, em um período de tempo limite de execução de 172.800 segundos (48 horas), utilizando um computador Intel i7 com 16 GB de memória RAM.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos pelos testes computacionais do modelo matemático proposto quando executados no CPLEX 12.6. A coluna Bloco informa o bloco das instâncias que serão analisadas e a coluna Instância informa o número da instância.

Nas colunas seguintes são apresentados os resultados obtidos pelos testes computacionais. Na coluna Função Objetivo é apresentado um resultado para os casos em que o modelo matemático consegue gerar uma solução ótima dentro do período de tempo em que a instância foi processada no CPLEX. Como mencionado, a função objetivo é uma combinação linear dos elementos receita, número de navios atendidos e tempo de espera para atendimento. Assim, esta coluna não possui uma unidade específica. Para melhor detalhamento da função objetivo, tais parâmetros são apresentados separadamente nas colunas finais desta tabela.

Para as situações em que o modelo matemático não encontra uma solução ótima, são apresentados nas colunas *Lower Bound* (LB) e *Upper Bound* (UB), respectivamente, os resultados do limite inferior e do limite superior. E, a coluna GAP, que informa o percentual de desvio. Quando o modelo matemático possui uma função objetivo de maximização, o GAP é calculado pela fórmula $GAP = ((LB - UB) / LB) * 100$.

A Coluna Tempo de Execução mostra o tempo, em segundos, que o CPLEX gastou no processamento da instância para encontrar a solução ótima. Nos casos em que não foi possível encontrar solução ótima dentro do limite estipulado, serão informados 172.800 segundos, ou seja, 2 dias.

Nas colunas seguintes são apresentados os dados adicionais elaborados a partir dos resultados obtidos pelo CPLEX. Na Coluna Número de Navios atendidos é apresentada a quantidade de navios que atracaram no porto naquela instância. A Coluna Receita demonstra toda a receita adquirida pelo porto para a quantidade de navios que atracaram. E por fim, a Coluna Tempo de Espera Total para Atracar estabelece quantas horas os navios que atracaram no porto aguardaram para serem

atendidos.

TABELA 6 - RESULTADOS DO CPLEX PARA AS INSTÂNCIAS DESENVOLVIDAS.

Bloco	Instância	CPLEX					Tempo de Execução (s)	Nº de Navios Atendidos	Receita (US\$) (x10 ³)	Tempo de Espera Total para Atracar (Horas)
		Função Objetivo	Lower Bound (x10 ³)	Upper Bound (x10 ³)	GAP (%)					
1	1	932.980,00	-	-	-	0,20	13	933,00	20	
	2	1.000.912,00	-	-	-	0,23	16	1.001,00	88	
	3	980.940,00	-	-	-	0,27	15	981,00	60	
	4	1.178.504,00	-	-	-	28.508,17	20	1.179,00	496	
2	5	479.980,00	-	-	-	0,22	4	480,00	20	
	6	509.950,00	-	-	-	0,19	5	510,00	50	
	7	479.980,00	-	-	-	0,47	4	480,00	20	
	8	-	1.178,88	1.176,58	0,20	172.800,00	20	1.179,00	2.425	
3	9	14,00	-	-	-	0,11	14	685,00	0	
	10	14,00	-	-	-	0,20	14	835,00	0	
	11	14,00	-	-	-	0,23	14	623,00	0	
	12	14,00	-	-	-	0,19	14	679,00	0	
4	13	932.980,00	-	-	-	0,20	13	933,00	20	
	14	2.145.855,00	-	-	-	0,89	31	2.146,00	145	
	15	3.771.730,00	-	-	-	111,46	54	3.772,00	270	
	16	1.008.932,00	-	-	-	8,50	19	1.009,00	68	
	17	2.367.758,00	-	-	-	12,79	35	2.368,00	242	
	18	4.111.512,00	-	-	-	71.756,67	61	4.112,00	488	
	19	1.028.829,00	-	-	-	73,15	20	1.029,00	171	
	20	2.472.786,00	-	-	-	17,67	37	2.473,00	214	
	21	-	4.423,89	4.357,46	1,52	172.800,00	67	4.358,00	545	

Fonte: Autor.

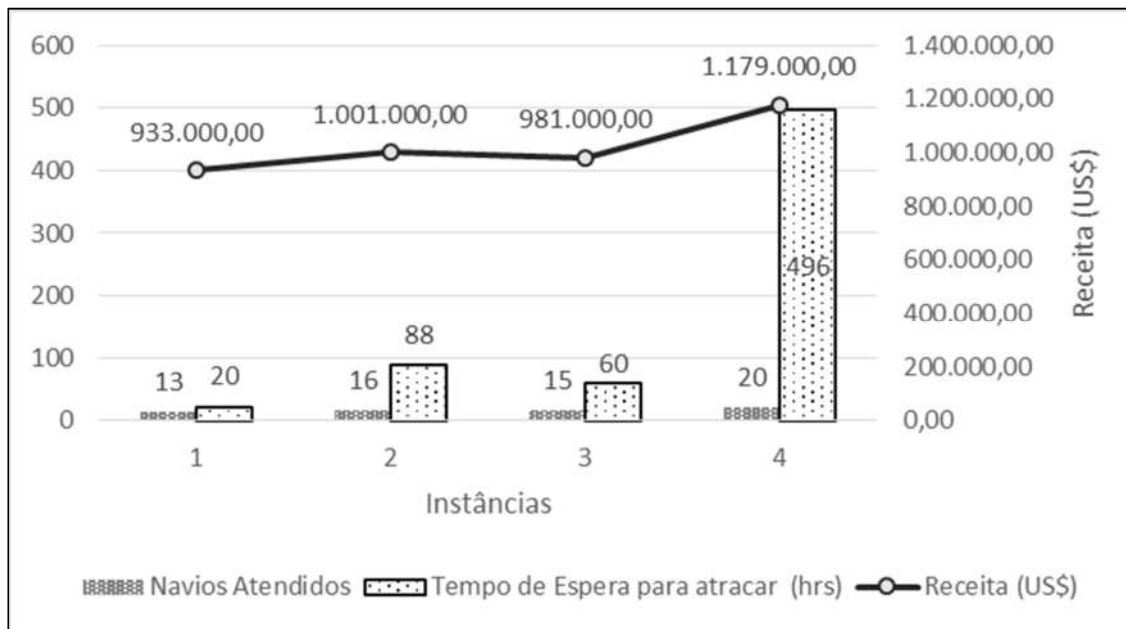
Analisando a Tabela 6, percebe-se que o CPLEX encontrou a solução ótima em 19 das instâncias analisadas e em 2 instâncias não encontrou a solução ótima, dentro do período de tempo limite definido, apresentando GAP. A seguir são apresentados e analisados os resultados do CPLEX por instância e consolidados por blocos de instâncias.

Analisou-se nas Instâncias 1 a 4, Bloco 1, o impacto da mudança da janela de atracação: com 12 horas, 24 horas, variando entre 12 e 36 horas e sem janela de atracação.

Nos resultados deste bloco, gerados pelo CPLEX e apresentados na Tabela 6, obteve-se a solução ótima para as Instâncias 1, 2, 3 e 4. Nas três primeiras instâncias, o tempo de execução foi rápido, de 0,2, 0,23 e 0,27 segundos, respectivamente. Já para a Instância 4, o tempo de execução foi de aproximadamente oito horas, porém a solução ótima foi encontrada desde a segunda hora de processamento.

Na Figura 12 são apresentados os resultados do Bloco 1 e pode-se, então, realizar análises sobre o comportamento acerca do número de navios atracados, receita adquirida pelo porto e tempo de espera total de todos os navios para cada instância, dada a variação da janela de atracação.

Figura 12 - Resultados do CPLEX para instâncias do Bloco 1.



Fonte: Autor.

O número de navios atracados da Instância 2 em relação à Instância 1 aumentou em 3 navios. Isto se deveu ao fato de que a Instância 2 considera a janela de atracação como 24 horas e a Instância 1 considera a janela de atracação de 12 horas. O tempo de espera total para atracar na Instância 2 foi de 88 horas, bem maior que o tempo de espera para atracar na Instância 1, que foi de 20 horas. Isto se explica, também, pela janela de atracação da Instância 2 ser maior que na Instância 1, permitindo atracar mais navios. Porém, eles tiveram que esperar mais tempo para atracar. Outro fator observado foi um aumento de receita da Instância 2, R\$ 1.001.000,00, em relação à

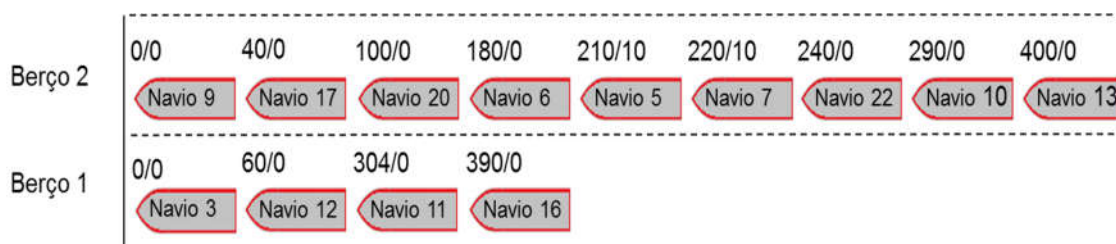
Instância 1, R\$ 933.000,00, que foi ocasionado pelo aumento de navios atendidos.

A Instância 3 retrata mais fielmente a realidade do TVV pois considera a variação do tempo máximo de atendimento dependendo de cada contrato comercial. Chegou-se a um total de 15 navios atracados, com 60 horas de tempo de espera total para atracar, com uma receita de R\$ 981.000,00, resultados melhores que os da instância 1, com tempo máximo de 12 horas, porém inferiores ao da Instância 2, com tempo máximo de atendimento de 24 horas, o que era esperado, dado que a janela de atracação média para esta instância foi de 15,6 horas.

Na Instância 4, por não haver uma janela de atracação, todos os navios atracam, gerando para o porto uma receita máxima. Porém, para que isso ocorra os navios precisam esperar mais tempo para atracar, o que ocasionou um tempo de espera para atracação total de 496 horas.

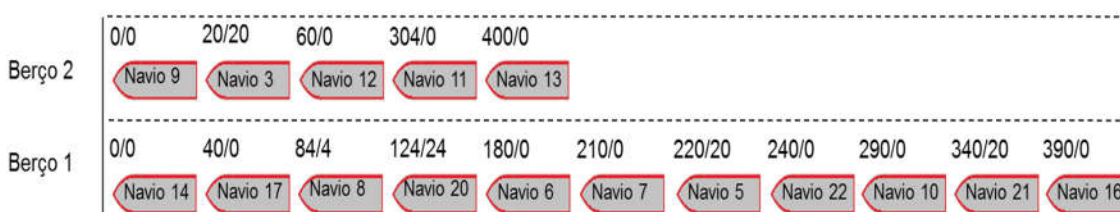
As figuras 13, 14, 15 e 16 detalham, respectivamente, o sequenciamento das Instâncias 1, 2, 3 e 4, mostrando em cima do desenho de cada navio a hora de atracação do navio / tempo de espera para atracar.

Figura 13: Sequenciamento de Navios para a Instância 1.



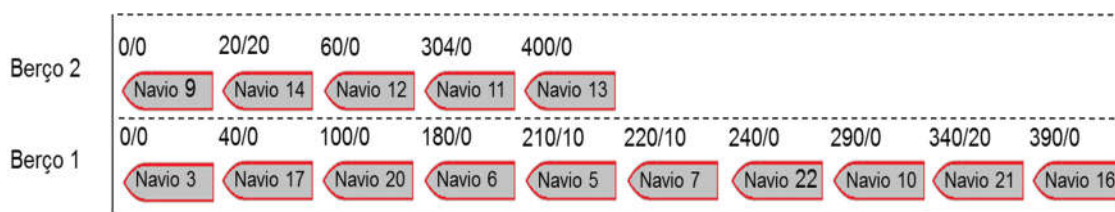
Fonte: Autor.

Figura 14: Sequenciamento de Navios para a Instância 2.



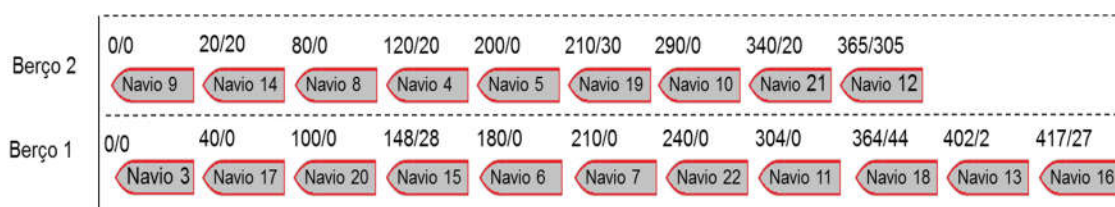
Fonte: Autor.

Figura 15: Sequenciamento de Navios para a Instância 3.



Fonte: Autor.

Figura 16: Sequenciamento de Navios para a Instância 4.



Fonte: Autor.

É possível verificar, quando compara-se o sequenciamento das Instâncias 1 a 4, que na Instância 2 alguns navios que também foram atracados na Instância 1, agora passaram a ter um tempo de espera maior, isto foi possível porque na Instância 2 a janela de atracação era de 24 horas, 12 horas a mais que na Instância 1. Isso permitiu que outros navios que não haviam atracado na Instância 1 pudessem atracar na Instância 2.

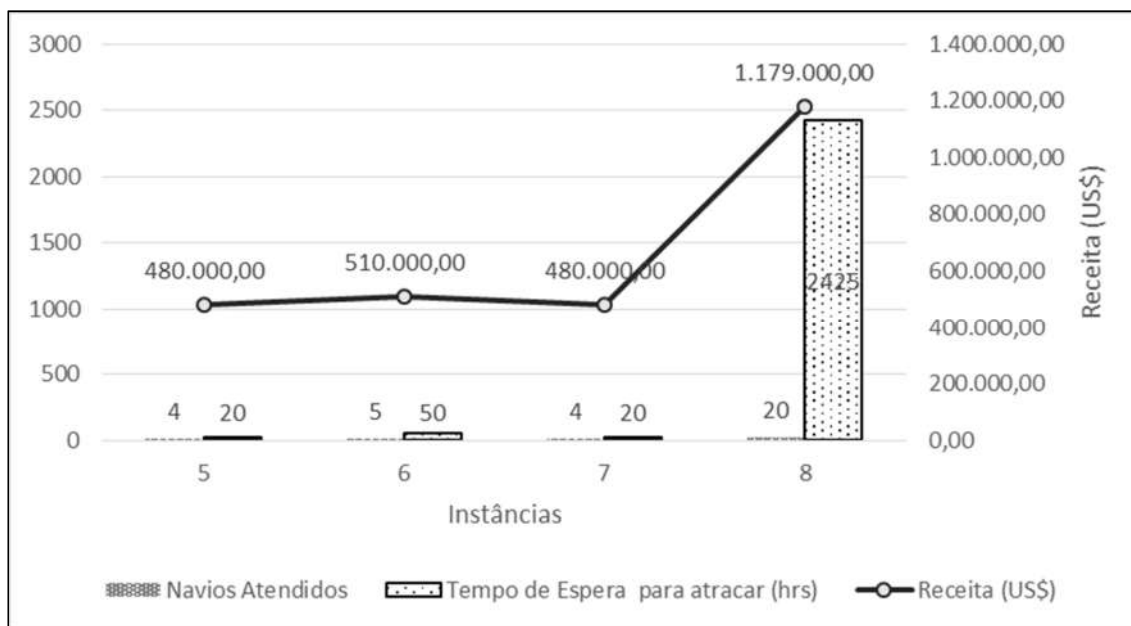
O sequenciamento de navios da Instância 4 mostrou que nove, dos vinte navios, tiveram tempo de espera entre sua chegada e sua atracação. Nesta instância, por não haver janela de atracação, era mais vantajoso que todos os navios atracassem para maximizar a receita. Enquanto nas Instância 1 a 3, a maioria dos navios atracaram no tempo de sua chegada.

As Instâncias de 5 a 8, Bloco 2, se diferenciam das instâncias do Bloco 1 pela chegada dos navios. Neste bloco, adotou-se que os navios tem chegada estática e estão todos disponíveis para atracação no tempo 0. Embora não reflita a realidade da maioria dos portos, tampouco do TVV, a análise deste bloco se justifica na hipótese de haver um congestionamento no porto, quando muitos navios chegam ao mesmo tempo. Neste caso, há uma tendência de se atender menos navios, pois todos chegam juntos e existe uma janela de atracação antes que aconteça o cancelamento de escala, minimizando assim a receita obtida e o número de navios atendidos.

Os resultados obtidos neste grupo foram gerados pelo CPLEX e apresentados na Tabela 6, onde apresenta-se a solução ótima para as Instâncias 5 a 7. O tempo de execução do modelo matemático nas Instâncias 5, 6 e 7 foram, respectivamente: 0,22, 0,19 e 0,47 segundos. A Instância 8 gerou um *GAP* de 0,2%, com tempo de execução do modelo matemático de 172.800 segundos, definido como limite para execução do CPLEX. O *GAP* manteve-se inalterado a partir da segunda hora de processamento.

Agora o comportamento do modelo será de atracar o máximo de navios possíveis que maximizem a receita e minimizem o tempo de espera para atracação até que se finalize a janela de atracação, já que todos os navios chegaram no tempo 0. A Figura 17 apresenta de forma gráfica estes resultados quanto ao número de navios atracados, receita total gerada e tempo de espera total.

Figura 17: Resultados do CPLEX para instâncias do Bloco 2.



Fonte: Autor.

Percebe-se que o comportamento do modelo matemático para esses casos foi de atracar dentro da janela de atracação o conjunto de navios que geram a maior receita. Na Instância 6, por ter uma janela de atracação superior ao da Instância 5, foi atracado um navio a mais, gerando uma receita de R\$ 510.000,00 ante R\$ 480.000,00 da instância anterior. Isso é justificável pois com uma janela de atracação superior, na Instância 6 pode-se gerar um tempo de espera total maior, de 50 horas, enquanto na

instância anterior este tempo foi de 20 horas.

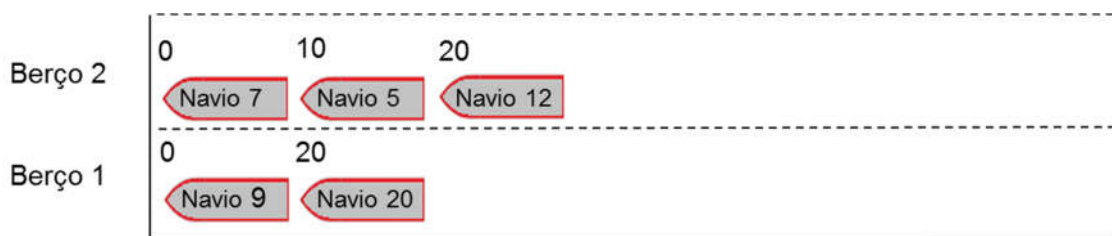
Na Instância 7 foram atracados os mesmos navios que na Instância 5, gerando, portanto, a mesma receita, com o tempo de espera máximo similar, alternando apenas o berço em que os navios foram atracados. Na Instância 8, como não possui janela de atracação, todos os navios foram atracados, porém com um tempo de espera total para atracar muito alto, de 2.425 horas. Isso porque todos os navios chegaram ao porto no tempo 0. O sequenciamento destas quatro instâncias podem ser verificados nas Figuras 18, 19, 20 e 21. Neste caso, a hora de atracação de cada navio é igual ao seu tempo de espera para atracar. O tempo de atracação é mostrado em cima de cada navio.

Figura 18 – Sequenciamento de Navios para a Instância 5



Fonte: Autor.

Figura 19 – Sequenciamento de Navios para a Instância 6



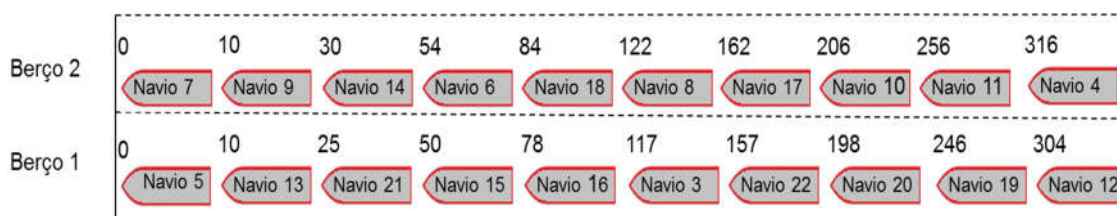
Fonte: Autor.

Figura 20 – Sequenciamento de Navios para a Instância 7



Fonte: Autor.

Figura 21 – Sequenciamento de Navios para a Instância 8



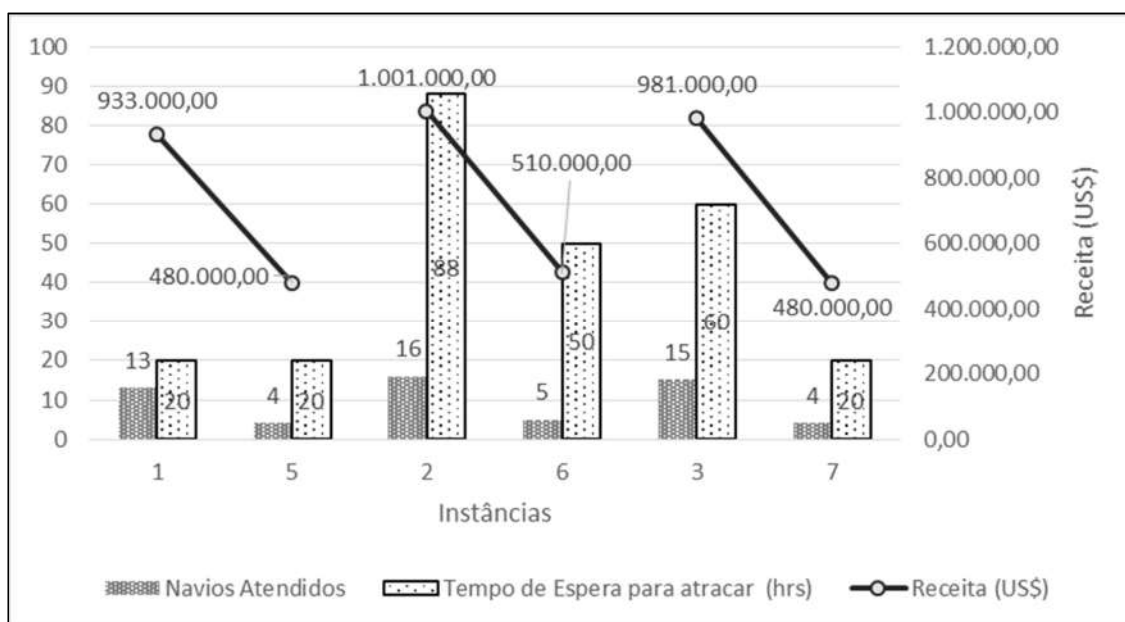
Fonte: Autor.

É possível verificar que na Instância 6 o tempo de atracação dos navios 5, 12 e 20 foi de 10 horas a mais do que os seus tempos de atracação na Instância 5, o que permitiu que mais um navio, o navio 9, fosse atracado. Isso só foi possível porque a janela de atracação da Instância 6 é de 24 horas, enquanto na Instância 5 é de 12 horas.

No sequenciamento da Instância 8, Figura 21, a solução ótima do modelo matemático foi atracar primeiramente navios com tempo de operação menores e por último navios com tempo de operação maiores. Isso ocorre porque neste caso, em que todos os navios são atracados, a primeira parte da função objetivo, que busca maximizar a receita, deixa de ser influente. O que define o sequenciamento é a segunda parte da função objetivo, que busca minimizar o tempo de espera para atracação.

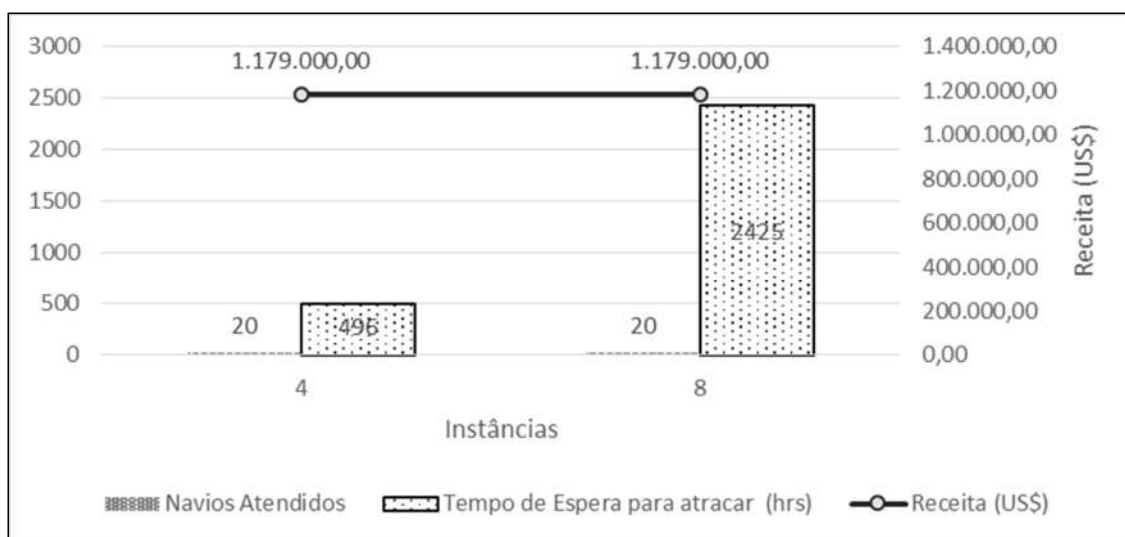
Na Figura 22, é apresentado, de forma gráfica, um comparativo deste bloco com as instâncias similares do Bloco 1. São estas: Instância 1 com 5, com janela de atracação de 12 horas; Instância 2 com 6, com janela de atracação de 24 horas; e Instância 3 com 7, com janela de atracação variando de 12 a 36 horas. Na Figura 23, separadamente, devido a valores com maior dimensão, é apresentado o comparativo da Instância 4 com 8, sem janela de atracação. O comparativo quanto a receita gerada para o porto, o tempo de espera para atracar e o número de navios atendidos pode ser visualizado nas Figuras 22 e 23.

Figura 22: Gráfico comparativo das Instâncias do Bloco 1 e do Bloco2.



Fonte: Autor.

Figura 23: Gráfico comparativo das Instâncias 4 e 8.



Fonte: Autor.

Pela análise da Figura 19, é possível atracar uma quantidade bem superior de navios quando eles chegam a qualquer tempo, de maneira dinâmica, que é o caso das Instâncias 1, 2 e 3 do Bloco 1, quando compara-se, respectivamente, com as Instâncias 5, 6 e 7, do Bloco 2, onde todos os navios chegam no tempo 0. Isso ocorre devido a janela de atracação estabelecida neste modelo matemático proposto, pois, estando todos os navios disponíveis para atracar no tempo 0, suas janelas de

atracação se encerram e não é possível atracar muitos navios.

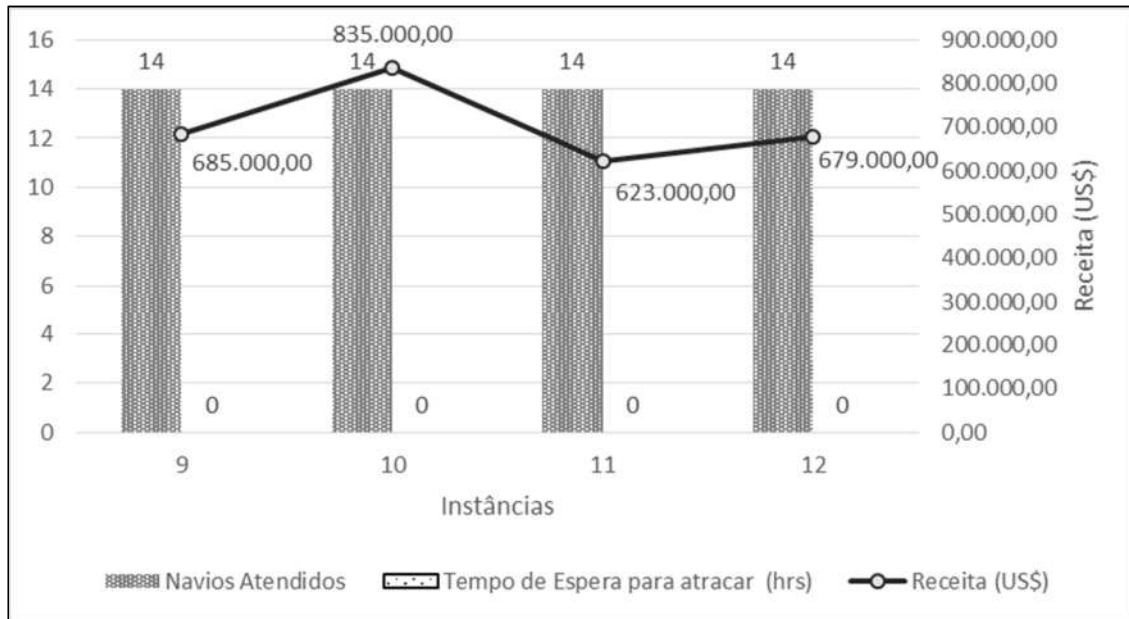
Caso não existisse janela de atracação, mesmo com a chegada estática dos navios no tempo 0, todos os navios seriam atracados ao longo do tempo e a receita seria similar para todas as instâncias, que é o que mostra a Figura 20 quando comparamos as Instâncias 4 e 8.

No Bloco 3, pretende-se avaliar o comportamento do modelo matemático com a função objetivo que visa apenas a maximização do número de navios atendidos no menor tempo de atracação, sem considerar sua receita. Anteriormente, o valor da receita, dado em milhares de dólares, tinha um peso muito maior que o tempo de espera para atracação em horas. Portanto, nenhum navio deixaria de atracar pelo fato de ter um tempo de espera muito elevado, caso estivesse dentro do limite máximo de janela de atracação estabelecido.

Os resultados das Instâncias 9 a 12 gerados pelo CPLEX são apresentados na Tabela 6. Nota-se que o modelo matemático encontrou a solução ótima para todas essas instâncias com tempos de execução bem rápidos, entre 0,11 e 0,23 segundos.

Os resultados gerados pelo CPLEX para as instâncias do Bloco 3 são apresentados no gráfico da Figura 24, onde se observa que o número de navios atracados são idênticos, embora os navios atracados não sejam os mesmos para cada instância, variando, portanto, a receita obtida. A tendência para estas instâncias é de que somente serão atracados os navios que puderem ser atendidos no momento de sua chegada, já que, com a função objetivo sem receita, o objetivo agora é de minimizar o tempo de espera do navio para atracar, maximizando o número de navios atendidos.

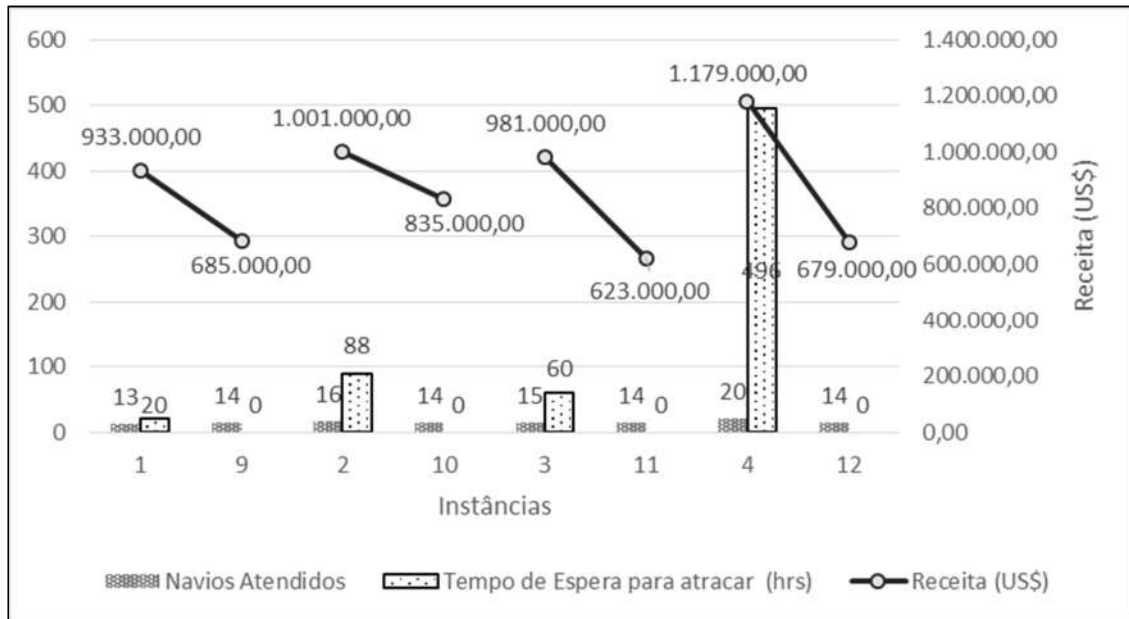
Figura 24: Resultado do CPLEX para instâncias do Bloco 3.



Fonte: Autor.

Neste caso, como todos os navios atendidos foram atracados no momento em que chegaram, o tempo de espera total foi 0 para todas as instâncias. Na função objetivo sem receita, o tempo de espera dos navios, em horas, tem um peso maior que o número de navios atracados, em unidades. Por isso, se o tempo de espera do navio para atracar for superior a uma hora, já é desvantagem a atracação daquele navio, considerando a função objetivo de maximizar. Até mesmo para a Instância 14, que seria possível atracar todos os navios, já que não há janela de atracação, para atingir a solução ótima é mais viável não atracar 6 navios e optar somente pelos que podem atracar no momento da chegada. Se a receita estivesse na função objetivo, certamente o comportamento do modelo matemático seria outro para esta instância e todos os navios seriam atracados. Como a receita não compõe o objetivo do modelo neste bloco, apresenta-se na Figura 25 um comparativo com as instância do Bloco 1.

Figura 25: Gráfico Comparativo das Instâncias do Bloco 1 e do Bloco3.



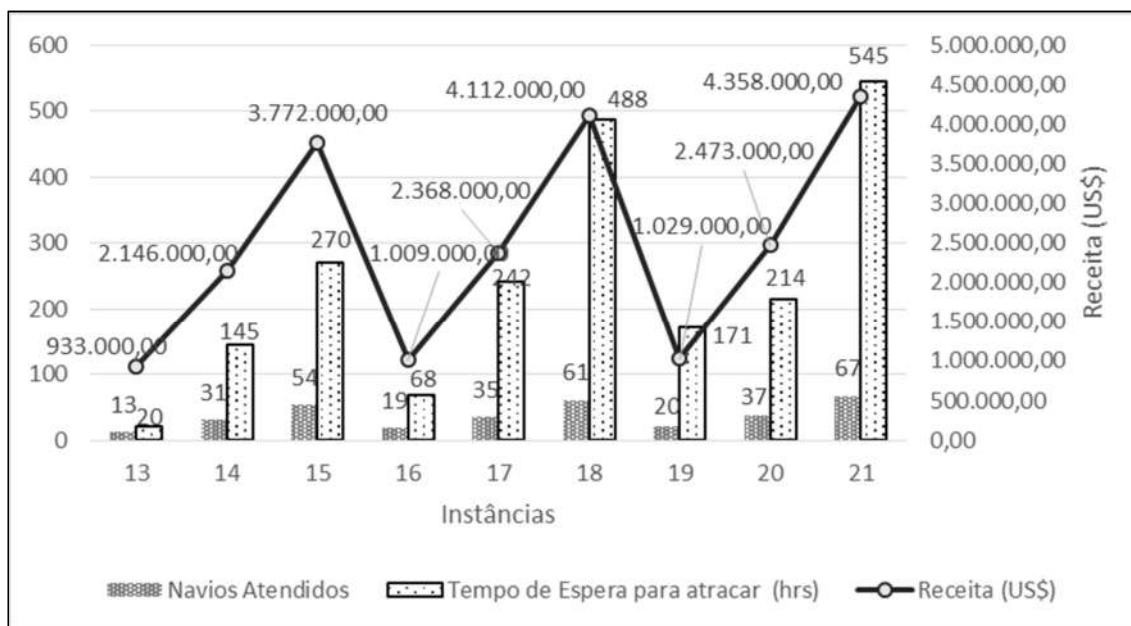
Fonte: Autor.

Houve uma redução significativa na receita gerada para o porto em todas as instâncias do Bloco 3, quando comparadas com as instâncias similares do Bloco 1 que continham a maximização da receita na função objetivo. E nas Instâncias 10, 11 e 12 ainda houve uma redução do número de navios atendidos pois, certamente, para atender mais navios seria necessário que eles fossem atracados depois da sua hora de chegada e, mesmo que estivesse dentro da janela de atracação, impactaria negativamente na função objetivo.

O Bloco 4, formado pelas Instâncias 13 a 21, propõe analisar o impacto do aumento nas instâncias do número de navios e do número de berços com o objetivo principal de testar o tempo de execução do CPLEX para cada instância e o *GAP* das instâncias em que o CPLEX não for capaz de encontrar solução ótima para um tempo de execução de 172.800 segundos, ou seja, 48 horas.

Os resultados do CPLEX apresentados na Tabela 6 demonstram que foi encontrada a solução ótima para as Instâncias 13 a 20. Apenas a Instância 21, com 80 navios e 6 berços, não apresentou solução ótima. As instâncias do Bloco 4 são apresentadas na Figura 26, onde é possível realizar uma análise em função do aumento do número de berços e de navios.

Figura 26: Resultado do CPLEX para instâncias do Bloco 4.



Fonte: Autor.

A medida que se aumentam os números de navios, mantendo-se o mesmo número de berços, a tendência é de que maior será o tempo de espera total, fato comprovado quando analisam-se as Instâncias 13, 14 e 15, com dois berços, as instâncias 16, 17 e 18, com 4 berços e as instâncias 19, 20 e 21 com 6 berços. O número de navios atracados e a receita também tiveram comportamento crescente à medida que se aumenta o número de navios no porto disponíveis para atracação.

Da mesma forma, quando o mesmo número de navios pode ser atracado em mais berços, maior a capacidade de atendê-los. No caso das Instâncias 13, 16 e 19, que são compostas por 20 navios cada uma, porém com 2, 4 e 6 berços, respectivamente, pode-se perceber que as instâncias com mais berços permitiram a atracação de mais navios.

Apenas para a Instância 21, com 6 berços e 80 navios, o modelo matemático não foi capaz de achar solução ótima dentro do tempo de execução de 172.800 segundos, gerando um *GAP* de 1,52%.

5.1 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS

Foram testadas 21 instâncias com o intuito de avaliar os impactos na receita do porto, no número de navios atendidos evitando a redução do cancelamento de escala e na

redução do tempo de espera para atendimento, a partir da variação dos parâmetros janela de atracação dos navios e tipo de chegada dos navios, e variação da função objetivo, desconsiderando a receita. Além disso, a capacidade do CPLEX em resolver instância de tamanho maior do modelo proposto foi testada.

No Bloco 1, onde foram analisadas as variações da janela de atracação, percebe-se que é mais vantajoso para o porto optar por acordos comerciais com 24 horas para atracação do navio. Mesmo que nestes casos o tempo de espera total seja um pouco maior, é nesta situação em que ele maximiza sua receita.

No Bloco 2, percebe-se que para situações de congestionamento do porto, o fato de existir janela de atracação não é vantajoso, visto que poucos navios serão atracados e grande parte sofrerá cancelamento de escala, ocasionando perda de receita. Ainda assim, quanto maior a janela de atracação, maior a capacidade de atender mais navios.

No Bloco 3, retirando a parcela da receita na função objetivo e buscando minimizar o tempo de espera dos navios para atracar, verifica-se que quaisquer navios que não puderem ser atracados no momento de sua chegada terão suas escalas canceladas, mesmo ainda não estando no seu limite de tempo para atendimento, o que é prejudicial ao porto visto a queda de receita observada quando comparado ao Bloco 1.

No Bloco 4, quando instâncias maiores foram testadas, verificou-se a eficiência do CPLEX para executar instâncias com até 80 navios e 04 berços. Apenas para a Instância com 80 navios e 06 berços não foi encontrado um resultado ótimo pelo CPLEX dentro do tempo limite definido para execução de 172.800 segundos.

Assim, pode-se dizer, com base nos testes realizados, que a melhor opção para o porto seria negociar em seus acordos comerciais tempos de atendimento para os navios igual ou superior a 24 horas, evitando congestionamentos e programando para que a chegada dos navios ocorra de forma dinâmica, pois assim reduziria ao máximo o número de navios com escalas canceladas e, conseqüentemente, aumentariam o número de navios atendidos e a receita do porto.

6 CONCLUSÕES

Esta dissertação tratou do problema de planejamento da sequência de atracação de navios *liners* com a característica de ter a possibilidade de cancelamento de escala, pois os mesmos possuem uma janela máxima de atracação. Para tanto, esta dissertação propôs um modelo matemático para o problema descrito com base no Problema de Roteamento de Veículos com Prêmio, Janela de tempo e Múltiplos depósitos.

O modelo matemático têm como característica principal, que o difere dos demais modelos já propostos, o fato de considerar que nem todos os navios atracam no porto, podendo ocorrer o cancelamento de escala caso não ocorra a atracação dentro da janela de atracação, tratando o PAB com o objetivo de maximizar a receita adquirida pelo porto, minimizando o tempo de espera para atracação dos navios. Com isso, define-se uma nova classe de problemas do PAB que é o Problema de Alocação de Berço com Cancelamento de Escala (PAB-CA).

Identificou-se, por meio da revisão da literatura realizada, que até o presente momento não foi desenvolvido um modelo matemático para tratar o PAB com cancelamento de escala utilizando a PRV com Prêmio e os objetivos descritos nos parágrafos anteriores. Assim, entende-se que esta nova abordagem contribui para futuros estudos no meio científico sobre o PAB.

O modelo proposto foi executado para 21 instâncias desenvolvidas, baseadas em dados reais fornecidos pelo TVV e com características similares às desse porto. As instâncias foram testadas no solver CPLEX 12.6 para validação e as análises dos resultados foram realizadas.

Realizou-se uma análise do modelo matemático proposto por meio da abordagem de diversas situações, tais como: variação da janela de atracação para o navio, variação do tipo de chegada do navio, variação da função objetivo e variação do tamanho das instâncias.

Os resultados obtidos à partir das análises foram satisfatórios. Quanto ao tempo de execução do processamento, verificou-se que para a maioria das instâncias a execução foi rápida e com baixa incidência de *GAP's*. E, para as instâncias que refletem mais fielmente a realidade do TVV, com chegada de navios dinâmica, com 2 berços e uma média de 20 navios para um horizonte de planejamento de 15 dias,

verificou-se que o modelo atendeu de maneira eficaz. Além disso, o mesmo é aberto a variações para casos reais de outros portos.

Conclui-se que o modelo proposto pode atingir resultados significativos quanto aos seus objetivos, priorizando sempre a maximização da receita do porto, e demonstrou-se como uma ferramenta eficiente para: auxílio na análise de impactos, estudos de melhoria operacional, priorização de investimentos e, inclusive, na estratégia comercial, servindo, principalmente, para tomada de decisão.

6.1 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Pelos resultados alcançados, sabe-se que o modelo proposto resolvido de forma exata com o CPLEX, consegue resolver instâncias de menor porte, compatível com a realidade do TVV. No entanto, para resolver instâncias de maior porte, com muitos berços, e para um horizonte de planejamento muito extenso, com muitos navios, sugere-se como trabalhos futuros o desenvolvimento de meta-heurísticas para que soluções possam ser obtidas em um tempo computacional aceitável.

Além disso, o modelo proposto não contemplou as características espaciais do porto. No caso do TVV, isso não era significativo, visto que os dois berços possuíam características similares e os navios que atracassem em um berço poderiam atracar no outro. Porém, para a aplicação do modelo matemático proposto em portos que possuem berços com capacidades espaciais distintas, sugere-se, como trabalhos futuros, a inclusão de restrições que contemplem as características espaciais do berço.

Por fim, sugere-se também, como proposta de trabalhos futuros, considerar a chegada de navios como estocástica, ou seja, estabelecida com base em dados históricos e curvas estatísticas de distribuição de tempos de chegada, ocasionadas pela incerteza nas chegadas decorrente de problemas ocorridos em outros portos e até mesmo de navegação.

REFERÊNCIAS

AGERSCHOU, H. **Planning and design of ports and marine terminals**. 2nd ed. Londres: Thomas Telford, 2004.

Ahn, J.; Weck, O.; Geng, Y.; Klabjan, D. Column generation based heuristics for a generalized location routing problem with profits arising in space exploration. **European Journal of Operational Research**. 223, 47–59, 2012.

ANTAQ. **Anuário 2014**. 2015. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/anuario/>> Acesso em: 12 set. 2015.

ARCHETTI, C.; BIANCHESSI, N.; SPERANZA, M.G. Optimal solutions for routing problems with profits. **Discrete Appl Math**, 161, 547-557, 2013.

ABRATEC: associação brasileira dos terminais de contêineres de uso público. Disponível em: < <http://www.abratec-terminais.org.br/>>. Acesso em: 01 mar. 2014.

BALAS, E. The prize collecting traveling salesman problem. **Networks**, 19, 621–636, 1989.

BARROS, V. H.; COSTA, T. S.; OLIVEIRA, A. C. M.; LORENA, L. A. N. Model and heuristic for berth allocation in tidal bulk ports with stock level constraints. **Computers and Industrial Engineering**, v. 60, p. 606-613, 2011.

BIERWIRTH, C.; MEISEL, F. A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. **European Journal of Operational Research**, 244 (3) 675– 689, 2015.

BOILE, M.; THEOFANIS, S.; GOLIAS, M. Berth Allocation with service priorities: a linear reformulation. **Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering**. Spain, 2006.

CLARKE, G.; WRIGHT, John W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. **Operations research**, v. 12, n. 4, p. 568-581, 1964.

CNT: Pesquisa Aquaviária. Brasília, 2006.

CODESA. **Anuário Estatístico 2013**. 2014. Disponível em: <<http://www.portodevitoria.com.br/Site/LinkClick.aspx?fileticket=piEliUlcsB8%3d&tabid=665&mid=1589&language=pt-BR>> Acesso em: 08 mar. 2014.

CODESA. **Anuário Estatístico 2014**. 2015. Disponível em: <<http://www.portodevitoria.com.br/Site/LinkClick.aspx?fileticket=4D5TsrqTD8M%3d&tabid=665&mid=1589&language=pt-BR>> Acesso em: 19 set. 2015.

CODESA. Produção: Take 1. Aracruz, 2001. 1 DVD.

- CORDEAU, J.-F.; LAPORTE, G.; LEGATO, P.; MOCCIA, L. Models and tabu search heuristics for the berth-allocation problem. **Transportation Science**, 39 (4), 526–538, 2005.
- DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The truck dispatching problem. **Management Science**, 6, 80-91, 1959.
- DEJAX, P.; FEILLET, D.; GENDREAU, M. Traveling salesman problems with profits. **Transportation Science**, 39 (2), 188–205, 2005.
- DELL'AMICO, M.; MAFFIOLI, F.; VÄBRAND, P. On prize-collecting tours and the asymmetric travelling salesman problem. **International Transactions in Operational Research**, 2, 297–308, 1995.
- FROJAN, P.; CORRECHER, J. F.; VALDES, R. A.; KOULOURIS, G.; TAMARIT, J. M. The continuous berth allocation problem in a container terminal with multiple quays. **European Journal of Operational Research**, 42, 7356-7366, 2015.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. **Otimização Combinatória e Programação Linear - Modelos e Algoritmos**. Rio de Janeiro, 2005
- GOLDEN, B.L.; LEVY L.; VOHRA, R. The orienteering problem. **Naval Research Logistics**, 34, 307–318, 1987.
- HANSEN, P.; OGUZ, C; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search for minimum cost berth allocation. **European Journal of Operational Research**, 191 (3), 636–649, 2008.
- HU, Z. H. Multi-objective genetic algorithm for berth allocation problem considering daytime preference. **European Journal of Operational Research**, 2015(a).
- HU, Z. H. Heuristics for solving continuous berth allocation problem considering periodic balancing utilization of cranes. **European Journal of Operational Research**, 85, 216-226, 2015(b).
- IMAI, A.; NISHIMURA, E.; HATTORI, M.; PAPADIMITRIOU, S. Berth allocation at indented berths for mega-containerships. **European Journal of Operational Research**, 179 (2), 579–593, 2007(a).
- IMAI, A.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. Berth allocation with service priority. **Transportation Research**, Part B 37 (5), 437–457, 2003.
- IMAI, A.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. Berthing ships at a multi-user container terminal with a limited quay capacity. **Transportation Research**, Part E 44 (1), 136–151, 2008.
- IMAI, A., NISHIMURA, E., PAPADIMITRIOU, S. The dynamic berth allocation problem for a container port. **Transportation Research**, Part B 35 (4), 401–417, 2001.

- IMAI, A.; SUN, X.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach. **Transportation Research, Part B** 39 (3), 199–221, 2005.
- IMAI, A.; YAMAKAWA, Y.; HUANG, K. The strategic berth template problem. **European Journal of Operational Research**, 72, 77–100, 2014.
- IMAI, A.; ZHANG, J-T.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. The Berth Allocation Problem with Service Time and Delay Time Objectives. **Maritime Economics & Logistics**, 9, 269-290, 2007(b).
- LAPORTE, G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y.; SEMET, F. Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. **International Transactions in Operational Research**, 7(4-5), 285–300, 2000.
- LIANG, C.; HUANG, Y.; YANG, Y. A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for the berth allocation planning. **Computers & Industrial Engineering**, 56 (3), 1021-1028, 2009.
- LIGTERINGER, H.; VELSink, H. **Ports and Terminals**. Delft: VSSD, 2012.
- MA, H., CHAN, F., CHUNG, S., WONG, C. Berth allocation planning for improving container terminal performances. **Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**, Istanbul, 2012.
- MEERSMANS, P. J. M.; DEKKER, R. Operations research supports container handling. **Econometric Institute Report 234**, Erasmus University Rotterdam. 2001.
- MONACO, M.F.; SAMMARRA, M. The berth allocation problem: a strong formulation solved by a Lagrangean approach. **Transportation Science** 41 (2), 265–280, 2007.
- OLIVEIRA, R.; MAURI, G.; LORENA, L. Clustering Search for the Berth Allocation Problem. **Expert Systems With Applications**, 39 (5), 5499-5505, 2012.
- PAIXÃO, A.C; MARLOW, P.B. Fourth generation ports – a question of agility?. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, Vol.33, n. 4, p. 355-376, Emerald, 2003.
- RASHIDI, H.; TSANG, E. Novel constraints satisfaction models for optimization problems in container terminals. **Applied Mathematical Modelling**, 37, 2013. p. 3601–3634.
- RIOS, Bruno. Centronave estima investimentos de R\$ 40 bilhões para modernizar os portos brasileiros. **CENTRONAVE**, São Paulo, 9 fev. 2011. Disponível em: <<http://www.centronave.org.br/pt/clippings.php?id=156>>. Acesso em: 02 mar. 2015.

ROSA, R. A.; RESENDO, L. C.; LOPES, F. T. Proposta de um Modelo Matemático para o Problema de Alocação de Berços para Múltiplas Cargas (PAB-MC) com Restrições Temporais e Espaciais. In: **Transporte em Transformação XVII**. Brasília: Positiva, 2013.

SILVA, G. COCCO, G. **Cidade e portos: os espaços da globalização**. Rio de Janeiro: DP&A, 1999.

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

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

TOTH, P.; VIGO, D. **The vehicle routing problem**. Bolonha, 2002.

TSILIGIRIDES, Theodore. Heuristic methods applied to orienteering. **Journal of the Operational Research Society**, p. 797-809, 1984.

TURKOGULLARI, Y. B.; TASKIN, Z. C.; ARAS, N.; ALTINEL, I.K. Optimal berth allocation and time-invariant quay crane assignment in container terminals. **European Journal of Operational Research**, 235 (1), 88-101, 2014.

TVV. Resolução 03: Norma de Programação e Atracação. Vitória, 2007.

UMANG, N.; BIERLAIRE, M.; VACCA, I. Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports. **Transportation Research**, Part E 54, 14-31, 2013.

UNCTAD, United Nations Conference on Trade and Development. **Review of Maritime Transport 2014**. New York: United Nations, 2014. p. 5.

VACCA, I.; BIERLAIRE, M.; SALANI, M. Optimization at container terminals: Status, trends and perspectives. In: **Proceedings of the Swiss Transport Research Conference (STRC)**. Monte Verità/Ascona, 2007. pp. 1–21.

VANSTEENWEGEN, Pieter; VAN OUDHEUSDEN, Dirk. The mobile tourist guide: an OR opportunity. **OR Insight**, v. 20, n. 3, p. 21-27, 2007.

VERGARA, S.C. **Projeto e relatórios de pesquisa em administração**. 14. Ed. São Paulo: Atlas, 2013.

VIS, I.F.A.; KOSTER, R. Transshipment of containers at a container terminal: an overview. **European Journal of Operational Research** 147 (1), 2003. p. 1–16.

XU, D.; LI, C-L.; LEUNG, J Y-T. Berth allocation with time-dependent physical limitations on vessels. **European Journal of Operational Research**, 216 (1), 47-56, 2012.

ZEN, L. Tactical berth allocation under uncertainty. **European Journal of Operational Research**, 247 (3), 928-944, 2015.

ZHEN, L.; LEE, L.; CHEW, E. A decision model for berth allocation under uncertainty. **European Journal of Operational Research**, 212 (1), 54-68, 2011.

ZHOU, P.; KANG, H.; LIN, L. A dynamic berth allocation model based on stochastic consideration. **Proceedings of the Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA 2006)**, vol. 2, 2006.