

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

RAFAEL SILVA BANOS

**METAHEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO
DE BERÇOS PARA MÚLTIPLAS CARGAS (PAB-MC) COM
RESTRICÇÕES TEMPORAIS E ESPACIAIS**

VITÓRIA

2014

RAFAEL SILVA BANOS

**METAHEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO
DE BERÇOS PARA MÚLTIPLAS CARGAS (PAB-MC) COM
RESTRICÇÕES TEMPORAIS E ESPACIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso do aluno Rafael Silva Banos, apresentado ao Departamento de Engenharia de Produção do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Produção.

Orientador: *Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa*

VITÓRIA

2014

RAFAEL SILVA BANOS

**METAHEURÍSTICA PARA O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO
DE BERÇOS PARA MÚLTIPLAS CARGAS (PAB-MC) COM
RESTRIÇÕES TEMPORAIS E ESPACIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso do aluno Rafael Silva Banos, apresentado ao Departamento de Engenharia de Produção do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Produção.

Aprovada em ____ de _____ de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Felippe Lopes
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Hugo Vervloet
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre colocaram a minha formação acadêmica acima de qualquer prioridade, sempre com muito apoio e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o Professor Dr. Eng. Rodrigo de Alvarenga Rosa pela sua incansável atenção e disponibilidade para com seus alunos, tratando-os como colaboradores e principalmente colegas, na busca pelo crescimento intelectual. Agradeço ainda a todos os alunos de graduação e mestrado envolvidos de alguma forma na pesquisa, que contribuíram para esse estudo se tornar uma realidade.

Em especial, gostaria de agradecer à Munah Maleque Felício pelo incentivo às realizações acadêmicas, e principalmente pelo apoio nas horas de desgaste emocional dessa empreitada.

LISTA DE SIGLAS

ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários

ETA - *Estimated Time of Arrival*

ETB - *Estimated Time of Berthing*

ETC - *Estimated Time of Completion*

ETS - *Estimated Time of Sailing*

FCFS - *First-Come-First-Served*

FO - Função Objetivo

LBP - *Lenght Between Perpendiculars*

LOA - *Length Overall*

LWL - *Loaded Waterline Length*

NOR - *Notice of Readiness*

PAB - Problema de Alocação de Berços

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

PRVMDJT – Problema de Roteamento de Veículos com Multi-depósitos e Janela de Tempo

RIPEAM - Regulamento Internacional para Evitar Abalroamento no Mar

SA - *Simulated Annealing*

UKC - *Under Keel Clearance*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Distribuição das Instalações Portuárias e Movimentação de Cargas.....	12
Figura 2 - Área molhada de um porto	17
Figura 3 - Dimensões horizontais e verticais do navio	20
Figura 4 - Representação do PAB discreto, contínuo e híbrido.....	24
Figura 5 - Linha do tempo da operação portuária no berço	25
Figura 6 - Sequenciamento de navios para berço discreto	26
Figura 7 - Sequenciamento de navios para berço híbrido	26
Figura 8 - Sequenciamento de navios para berço contínuo	27
Figura 9 - Gráfico Espaço-Tempo do navio	28
Figura 10 - Vista geral do Porto de Tubarão e identificação dos berços.....	29
Figura 11- Pseudocódigo do Simulated Annealing	33
Figura 12 - Pseudocódigo da função principal	40
Figura 13 - Pseudocódigo do Simulated Annealing executado pela função principal.....	42
Figura 14 - Movimento Reordenar Navios.....	43
Figura 15 - Movimento Realocar Navio	44
Figura 16 - Movimento Trocar Navios.....	45
Figura 17 - Sub-rotina de Pré-processamento.....	47
Figura 18 - Sub-rotina de Inicialização.....	48
Figura 19 - PAB como um PRVMD	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos berços do Porto de Tubarão.....	30
Tabela 2 - Instâncias de cada cenário	39
Tabela 3 - Resultados do Cenário de Validação do SA.....	54
Tabela 4 - Resultados do Cenário atual do Complexo Portuário de Tubarão.....	55
Tabela 5- Cálculo do desvio para a instância B07N100	56
Tabela 6 - Cálculo do desvio para a instância B07N150	56
Tabela 7 - Cálculo do desvio para a instância B07N250	57
Tabela 8 - Resultados do Cenário de expansão das operações do Complexo Portuário de Tubarão.....	57
Tabela 9 - Cálculo do desvio para a instância B11N100	58
Tabela 10 - Cálculo do desvio para a instância B11N150.....	58
Tabela 11 - Cálculo do desvio para a instância B11N250	59

RESUMO

Frente a um forte aumento do volume comercializado de granéis em escala global, como minério de ferro e agrícolas, metodologias que procuram realizar de forma eficiente a distribuição desses produtos vêm sendo estudadas nos últimos anos.

Buscando a otimização da utilização dos portos, que representam um gargalo no escoamento dos granéis, modelos matemáticos são propostos na literatura com a finalidade de resolver o Problema de Alocação de Berços.

O Problema de Alocação de Berço (PAB) se refere ao problema de atender a um conjunto de navios num layout de berços de um porto, dado um horizonte de tempo de planejamento da sequência de atendimento aos navios. No entanto, face à característica combinatorial do problema, modelos matemáticos resolvem apenas instâncias de pequena dimensão, muitas vezes não condizentes com a realidade operacional dos portos. Portanto, outros métodos surgem para preencher essa lacuna existente na aplicação desses modelos.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma metaheurística *Simulated Annealing* adaptada para resolver o Problema de Alocação de Berços para Múltiplas Cargas com Restrições Temporais e Espaciais. A metaheurística foi aplicada em cenários operacionais do Complexo Portuário de Tubarão e os resultados obtidos comparados com os de um modelo matemático adaptado da literatura.

Até o presente momento, somente uma referência ao PAB-MC com restrições temporais e espaciais foi encontrada na literatura, sendo esta utilizada como base para o trabalho desenvolvido.

Palavras-chave: problema de alocação de berços, simulated annealing, operação portuária, agendamento de navios.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	JUSTIFICATIVA	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	NOÇÕES PRELIMINARES	16
2.1.1	Estrutura Portuária.....	16
2.1.2	Área Marítima	16
2.1.3	Dimensões do Navio.....	18
2.1.4	Operações Portuárias.....	20
2.2	O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS	22
2.3	COMPLEXO PORTUÁRIO DE TUBARÃO.....	29
2.4	SIMULATED ANNEALING	31
2.5	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	34
3	METODOLOGIA	37
3.1	METAHEURÍSTICA PROPOSTA	40
3.2	MODELO MATEMÁTICO	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
5	CONCLUSÃO.....	60
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

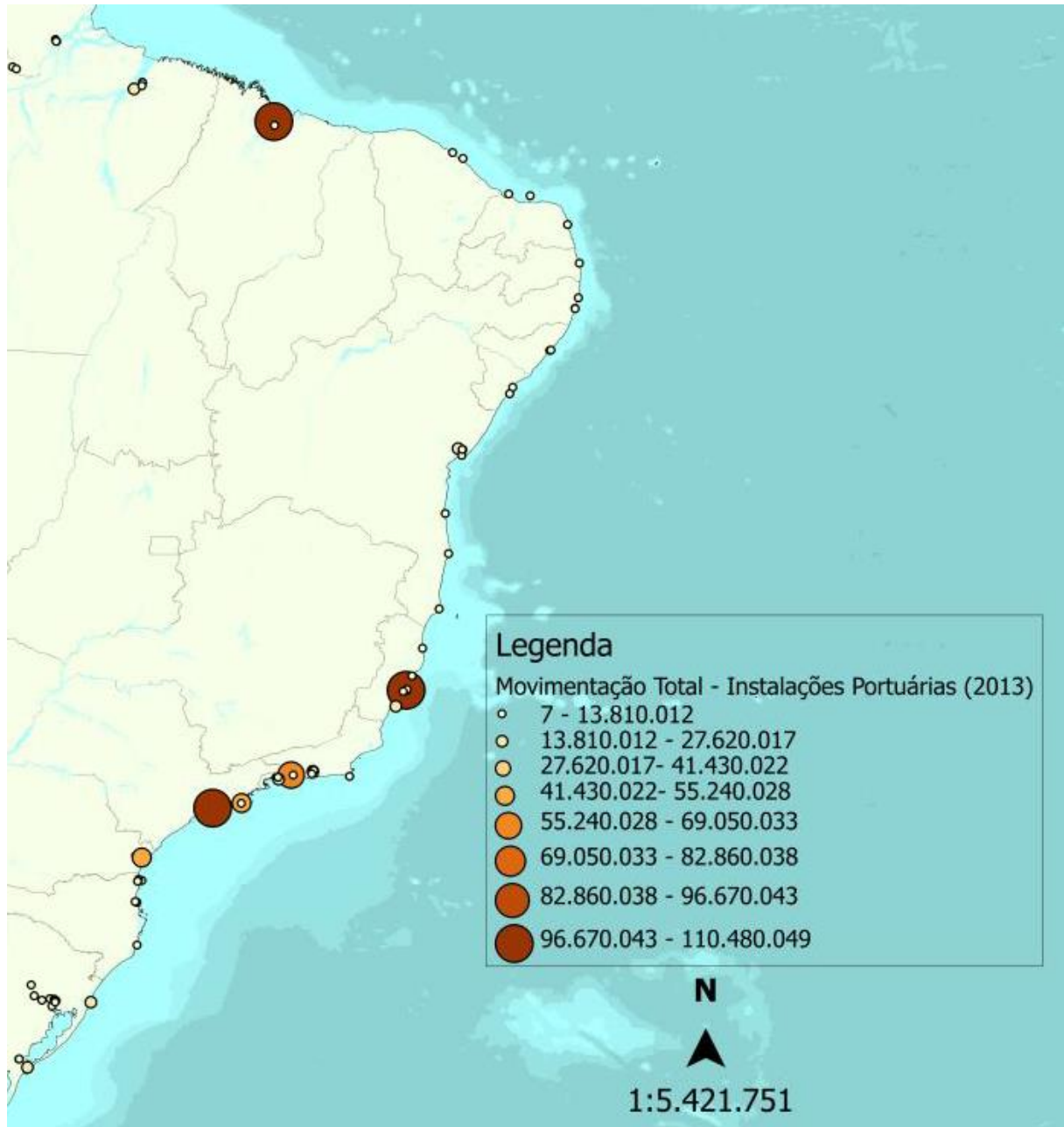
1 INTRODUÇÃO

A principal função do transporte marítimo de cargas é promover a ligação entre regiões produtoras e consumidoras de insumos e produtos. Isso inclui transporte de matérias primas, como por exemplo minério, óleo bruto, carvão, grãos e insumos para a produção agrícola, bem como produtos manufaturados.

No Brasil, o setor portuário movimenta anualmente cerca de 900 milhões de toneladas de carga (ANTAQ, 2013) e responde por 95% das exportações do país. Nesse contexto, o Espírito Santo é um elo estratégico do ponto de vista geográfico por se localizar próximo aos principais centros consumidores e produtores, tanto da região Sudeste como da região Centro Oeste. Isto favorece as operações portuárias capixabas, visto que há rotas de escoamento das cargas pelas rodovias ES-080, BR 262, BR 101, além das ferrovias Estrada de Ferro Vitória a Minas da Vale S/A e Malha Centro-Leste da Ferrovia Centro Atlântica. Assim, a área de influência dos portos capixabas abrange todo o estado do Espírito Santo, leste e oeste de Minas Gerais, leste de Goiás, norte fluminense, sul da Bahia e Mato Grosso do Sul. Os modais rodoviários e ferroviários do estado funcionam, portanto, como suportes logísticos aos portos capixabas.

Pela Figura 1 abaixo, que apresenta a distribuição das instalações portuárias no Brasil e suas respectivas movimentações de cargas, é possível perceber o papel de destaque do Espírito Santo no transporte marítimo de cargas.

Figura 1- Distribuição das Instalações Portuárias e Movimentação de Cargas (ANTAQ, 2013)



A grande movimentação de carga apresentada no Espírito Santo se deve principalmente ao grande volume exportado de minério de ferro. No país, o minério de ferro é tradicionalmente escoado por instalações portuárias altamente especializadas de grandes empresas mineradoras, com destaque para a Vale S/A. Apenas os Terminais de Ponta da Madeira e CVRD Tubarão, ambos de propriedade da Vale S/A, concentraram 64,4% das exportações de minério de ferro para o exterior (ANTAQ, 2013).

De acordo com analistas de mercado, neste momento de baixa do ciclo das commodities e de aumento da pressão inflacionária de itens como mão de obra, energia e fornecedores, a indústria global de mineração procurou reduzir seus custos e despesas e aumentar a eficiência, perseguindo uma lucratividade maior no ano de 2013. A Vale S/A, maior mineradora de ferro do mundo, possui um gasto logístico maior do que as grandes mineradoras da Austrália na entrega do minério de ferro, sobretudo por estas possuírem maior proximidade geográfica com o mercado para o qual as exportações se destinam. Assim, nos últimos anos, a Vale S/A vem buscando reduzir seus custos para manter-se competitiva frente às outras empresas mineradoras de ferro (ANTAQ, 2013).

Uma das maneiras de reduzir os custos relacionados à operação portuária é evitar a ocorrência de sobreestadia de navios no porto. Isto é, o atraso nas operações de carregamento ou descarregamento do navio implica em pagamento de multa, enquanto que uma antecipação dessas operações normalmente implica em uma bonificação à empresa operadora do porto. Portanto, a diminuição do tempo em que o navio permanece no porto leva a grandes reduções de custos, trazendo resultados financeiros positivos para a empresa.

Um correto agendamento dos navios que atracarão no porto é uma das principais medidas a serem tomadas na diminuição de atrasos. O problema de agendamento de navios em um porto é conhecido na literatura como Problema de Alocação de Berços (PAB).

O PAB pode ser classificado em diversas variantes, de acordo com as características que o porto venha a apresentar. Assim, para um porto que possua equipamentos que realizam o carregamento e descarregamento de múltiplas cargas e que apresente particularidades restritivas tanto em seu layout quanto na data em que é permitida a atracação dos navios, o PAB é classificado pela literatura como Problema de Alocação de Berços para Múltiplas Cargas (PAB-MC) com Restrições Temporais e Espaciais. Um exemplo de porto com essas características citadas é o Complexo Portuário de Tubarão, operado pela Vale S/A e localizado na cidade de Vitória, Espírito Santo.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma metaheurística *Simulated Annealing* adaptada para resolver o Problema de Alocação de Berços para Múltiplas Cargas com Restrições Temporais e Espaciais.

Como objetivos específicos, pretende-se: aplicar a metaheurística em cenários operacionais do Complexo Portuário de Tubarão e comparar os resultados obtidos da metaheurística com aqueles obtidos através de um modelo matemático.

1.2 JUSTIFICATIVA

Até o presente momento, somente uma referência ao PAB-MC com restrições temporais e espaciais foi encontrada na literatura, sendo esta utilizada como base para o trabalho desenvolvido. Todavia, a resolução apresentada nessa referência, através de modelo matemático, restringe o tamanho dos cenários passíveis de análise. Assim, a resolução do PAB-MC através de uma metaheurística complementa a proposta original e agrega possibilidades de utilização mais condizentes com a realidade operacional dos portos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em dez seções principais. Na seção 1, é feita uma contextualização do cenário de transporte marítimo de cargas no Brasil, bem como a importância dos portos capixabas para o mesmo. É apresentado ainda o objetivo do trabalho e justifica para o mesmo, além da estrutura na qual está organizado.

Na seção 2, o referencial teórico é abordado em subseções, de maneira que o leitor possa se familiarizar com os conceitos e nomenclaturas utilizadas no decorrer do trabalho, apresentando ainda a revisão bibliográfica, que aponta as referências acadêmicas mais relevantes sobre o tema em estudo.

Na seção 3, é descrita a metodologia utilizada na realização do trabalho, organizada em subseções para melhor visualização do conteúdo.

Na seção 4, são apresentados os resultados e é feita uma discussão acerca de pontos pertinentes encontrados nos mesmos.

Na seção 5 é realizada a conclusão do trabalho.

Por fim, na seção 6 são apresentadas as referências bibliográficas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 NOÇÕES PRELIMINARES

2.1.1 Estrutura Portuária

Um porto pode ser definido como um local que tenha dimensões mínimas para receber navios de maneira segura e que seja protegido de ventos, correntes e ondas. O porto deve ser provido de um cais que permita atracar os navios para que os mesmos possam ser carregados ou descarregados (UNCTAD, 1985).

Segundo o glossário da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ, 2011), um cais pode ser constituído de um ou mais locais designados para atracação denominados de berços.

Mais ainda, o porto é uma área de terra limítrofe com o mar ou rio que possui equipamentos para carregar e descarregar navios ou barcas, com segurança para a embarcação e para a carga, de maneira rápida e eficiente (ROSA, 2006).

Dentre os equipamentos que auxiliam nas operações de carregamento e descarregamento de navios de cargas gerais, em terra e à bordo, pode-se destacar o guindaste e a ponte rolante.

Frente a grande variedade de tipos de cargas gerais, faz-se uso de outros equipamentos de movimentação de cargas no auxílio da estivagem das cargas dentro do porão, tais como empilhadeiras de garfo e empilhadeiras de garra.

Na presença de um setor do porto composto por berços e áreas terrestres dedicados a um tipo específico de carga, pode-se denominar esta área como terminal do porto, podendo ou não atender a uma única empresa. Portanto, o terminal pode ser visto na ótica operacional como um porto especializado (ROSA, 2006).

2.1.2 Área Marítima

A área marítima é compreendida pela parte molhada do porto cuja função é receber a embarcação e conduzi-la até as áreas de atracação que devem ser mantidas

calmas e seguras para a operação. A área molhada pode ser subdividida em: sinalização náutica, áreas de fundeio, áreas de acesso e áreas de atracação (ROSA, 2006).

A sinalização náutica não é uma área física, porém é de suma importância para a segurança do porto. De acordo com as regras contidas no Regulamento Internacional para Evitar Abalroamento no Mar (RIPEAM), faz-se uso dos faróis, bóias de sinalização e sistemas de rádio.

Ao chegar ao porto, o navio fica aguardando na barra ou área de fundeio. Assim que sua entrada no porto é autorizada, um práctico sobe à bordo e conduz a embarcação pelo canal de acesso. Caso faça uso de manobra ou giro ao posicionar o navio para ser atracado em um dado berço, isto é, o espaço físico do cais destinado para a ocupação do navio, é utilizada a bacia de giro. A Figura 2 abaixo esquematiza a área molhada de um porto.

**Figura 2 - Área molhada de um porto
(Rosa, 2006)**



A atracação de um navio, por sua vez, é o processo de amarrar o navio no berço. A definição do comprimento do berço é variante de acordo com o porto. Ou seja, um

porto pode conter berços com tamanhos pré-determinados e fixos calculados com base no navio de maior dimensão a ser operado no porto. Por outro lado, há casos em que é preferível não particionar o cais. Neste caso, o cais é tratado como uma área contínua passiva de atracação.

2.1.3 Dimensões do Navio

Um navio possui diversas características construtivas e operacionais que são importantes para a operação portuária. Estas características podem melhorar a eficiência da operação ou, até mesmo, inviabilizar a operação (ROSA, 2006). As dimensões lineares podem ser expressas em metros, pés ou polegadas.

As dimensões horizontais, no plano diametral, proa-popa, podem ser expressas de duas formas:

- LOA (Length Overall);
- LBP (Length Between Perpendiculars);
- LWL (Loaded Waterline Length);
- Boca.

A boca é a medida tomada na maior largura do casco tendo como referência os lados extremos de bombordo e de boreste.

LOA é a distância horizontal entre duas linhas verticais tangentes à proa e popa do navio. Ou seja, é o comprimento total do navio. Trata-se do termo mais usado para atracação e desatracação em portos e comércio marítimo.

LBP é a distância horizontal entre as linhas verticais traçadas no ponto de intercessão entre a linha d'água projetada com o contorno da roda de proa do navio e a perpendicular formada pela intercessão da linha d'água projetada com o contorno de popa.

LBP é, então, o comprimento do navio definido em projeto, pelo construtor naval, para a linha d'água de projeto do navio. Se for mencionado comprimento do navio, sem nenhuma outra especificação, deve-se entender então que se está referindo ao LBP (ROSA, 2006).

LWL é a medida da linha d'água do navio de proa a popa, paralela ao eixo diametral. Em muitas situações ela tem o mesmo comprimento do LBP (ROSA, 2006).

Consideram-se dimensões verticais aquelas perpendiculares ao plano diametral, bombordo-boreste. São elas:

- Calado;
- UKC (Under Keel Clearance);
- Borda livre;
- Altura.

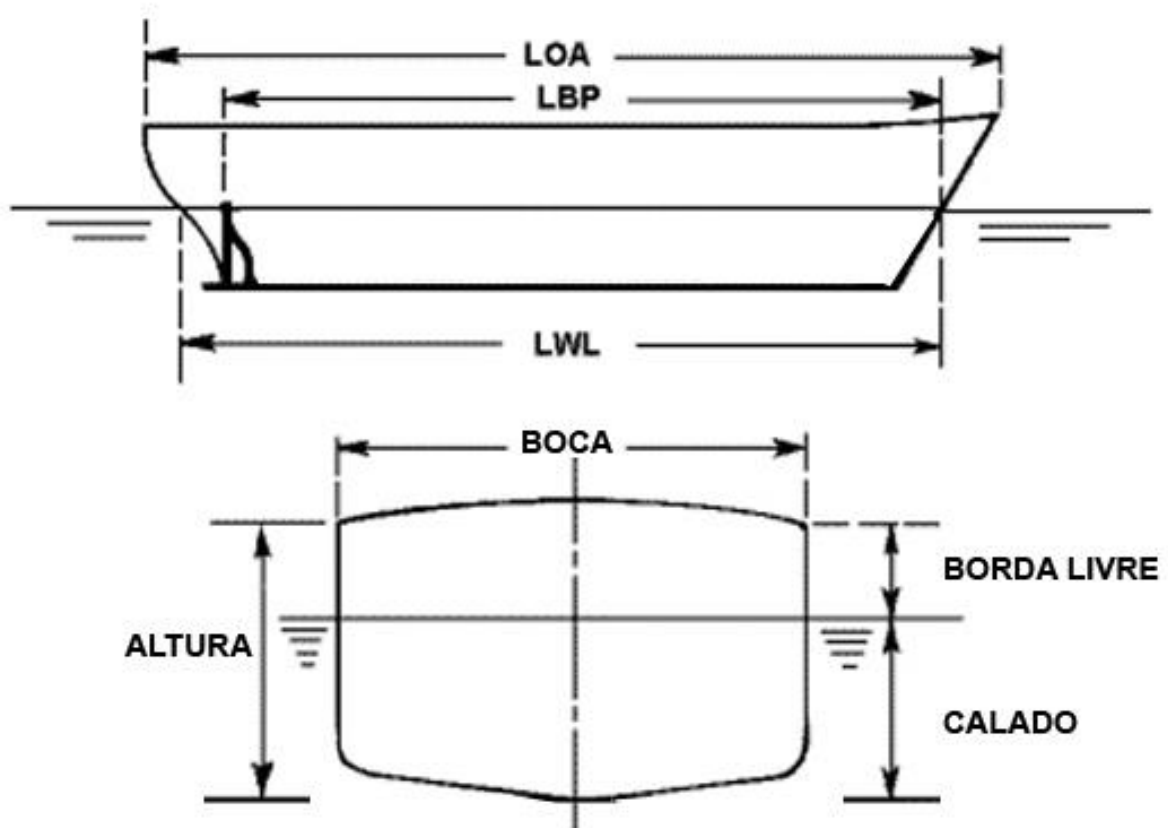
Calado é a distância máxima tomada entre a linha d'água real e a quilha do navio. Isto é, representa a altura da seção do navio que está submersa. O calado é medido na proa, popa e a meia nau. Um navio é tido como trimado, condição ideal de carga e navegação, quando os três calados possuem o mesmo valor. Outra condição propícia à navegabilidade é obtida quando o calado de popa é maior que o calado de proa. Nesta situação diz-se que o navio está apoadado. Já a situação oposta, de navio aproado, o calado de popa é menor do que o calado de proa e é uma situação crítica onde o navio não deve navegar, sob risco de afundar. Quando o maior calado é o calado à meia nau, indica que o navio está sofrendo um esforço estrutural e corre risco de ruptura (ROSA, 2006).

UKC é a altura de segurança que compreende a distância medida abaixo da quilha até o leito marítimo.

A distância medida à meia nau entre a superfície d'água e o convés do navio é denominada borda livre. A borda livre mínima, pintada no navio, indica o limite máximo de carregamento, ou ainda, quanto o navio pode ser alagado e se manter flutuando após uma avaria. (ROSA, 2006).

A Figura 3 ilustra as dimensões horizontais e verticais do navio.

Figura 3 - Dimensões horizontais e verticais do navio
(ROSA, 2006)



2.1.4 Operações Portuárias

Toda navegação portuária é caracterizada pela presença de datas reais e estimadas que regem o fluxo de documentos, a solicitação de equipamentos, a solicitação de pessoal e o contrato de navegação. Tendo em vista a prática do uso da língua inglesa na área portuária e de navegação, algumas siglas que representam essas datas foram estabelecidas para nortear toda a operação portuária (ROSA, 2006). Dentre as datas, são comumente utilizadas:

- ETA (Estimated Time of Arrival);
- NOR (Notice of Readiness);
- ETB (Estimated Time of Berthing);
- Atracação;
- Liberação pelas autoridades;

- Início das operações;
- ETC (Estimated Time of Completion);
- Término das operações;
- ETS (Estimated Time of Sailing);
- Desatracação.

A hora estimada de chegada do navio à zona portuária é dada pela ETA. A partir da ETA inicia-se o planejamento da sequência de atendimento aos navios que irão operar no porto, o que forma a fila de navios. Após a emissão da ETA pelo navio, o porto informa o ETB, Estimated Time of Berthing, que representa a data estimada de atracação do navio no porto.

Nas maiorias dos portos brasileiros, salvo aqueles que apresentam regras comerciais muito específicas, a sequência de atendimento é dada pela ordem de chegada. Este método é conhecido como First-Come-First-Served (FCFS), que em muitos casos não leva à uma ordem de atendimento otimizada.

No entanto, a data que efetivamente define a posição do navio na fila é o NOR. O NOR não é por si só uma data e sim um dos documentos mais importantes do transporte marítimo. Sua emissão indica que o navio chegou à área de fundeio do porto e está de prontidão para atracar e operar. Com a definição do NOR, o porto passa a emitir o ETB com base no NOR e não mais no ETA (ROSA, 2006).

O porto autoriza a atracação do navio após o atendimento de todas as embarcações anteriores a ele na fila de navios, ou seja, que tenham emitido o NOR antes dele. Após as manobras náuticas e a amarração do navio no berço, anota-se a data/hora de atracação (UNCTAD, 1985).

No Brasil, a liberação de subida à bordo do navio atracado, para cidadãos não autorizados previamente, é feita após a inspeção do navio por todas as autoridades: Receita Federal, Alfândega e Ministério da Saúde. O momento de liberação pelas autoridades define a data de mesmo nome (ROSA, 2006).

É feito o registro da data efetiva de início de operação, momento em que começa a movimentação, para efeito de cálculo da produtividade da operação portuária, conhecida no Brasil como prancha. A prancha abrange duas visões: a dos donos do navio e a do operador de porto (UNCTAD, 1985).

A visão do armador abrange no cálculo da prancha a divisão do total de carga movimentada pelo tempo que o navio esteve à disposição do porto, ou seja, momento de emissão do NOR até o momento de desatracação (UNCTAD, 1985).

A visão do operador do porto, por sua vez, considera a divisão da carga total movimentada pelo tempo que o navio efetivamente operou no porto, ou seja, do tempo de início ao término da operação (UNCTAD, 1985).

Uma vez iniciadas as operações, o porto informa o ETC, que é a data estimada para o término das operações. A importância desta data está em informar aos tripulantes desembarcados o momento limite para retorno a bordo e calcular a ETS. A ETS é considerada, normalmente, de uma a duas horas após a ETC. Sua emissão permite ao comandante informar ao próximo porto a receber o navio o ETA correspondente (ROSA, 2006).

Por fim, deve-se considerar a data/hora de desatracação do navio no momento em que os cabos são desamarrados e lançados ao mar para serem recolhidos pelo navio (ROSA, 2006).

2.2 O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS

O Problema de Alocação de Berço (PAB) se refere ao problema de atender a um conjunto de navios num layout de berços de um porto, dado um horizonte de tempo de planejamento da sequência de atendimento aos navios. Assim, as principais decisões a serem tomadas neste processo envolvem a escolha de onde e quando os navios deverão atracar (CORDEAU et al., 2005).

O objetivo mais usual é minimizar a soma do tempo de espera e operação dos navios (isto é, o tempo de permanência no porto), embora possa haver outros objetivos, tais como minimizar o número de navios não atendidos pelo porto e minimizar a carga de trabalho dos recursos do porto. O desempenho do PAB também pode ser mensurado em termos de custo, o que permite combinar diferentes objetivos numa função de custo totais (BIERWIRTH E MEISEL, 2010). Pode-se resumir que o PAB visa atribuir uma posição de atracação, um berço, e um

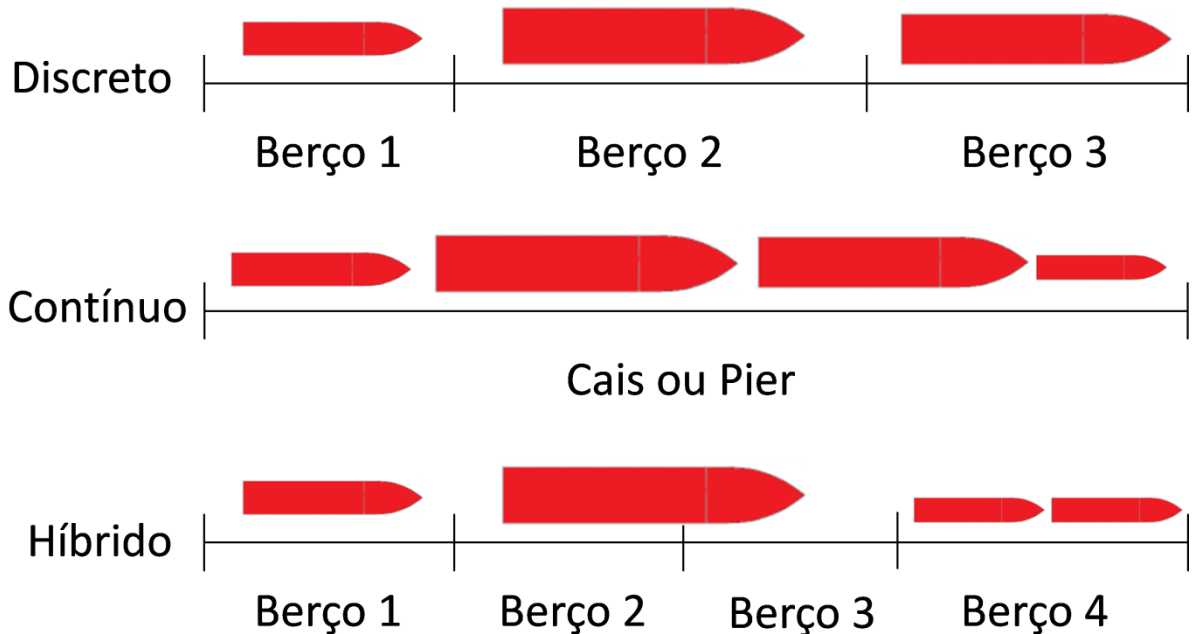
tempo de atracação para cada navio que pretende operar no porto, tal que uma função objetivo seja otimizada.

Os modelos existentes para PAB na literatura 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.

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

Na Figura 4 são ilustrados os três casos, discreto, contínuo e híbrido. No caso do PAB Discreto, o cais é dividido em um número de seções denominadas berços e apenas um navio pode ser operado em cada berço num certo intervalo de tempo. Para o PAB Contínuo não há divisão do cais, ou seja, os navios podem atracar em posições arbitrárias dentro dos limites do cais. Nesse layout o planejamento do cais é mais difícil do que para um layout discreto, pois podem existir espaços vazios, não permitindo que navios de certas dimensões atraquem e conseqüentemente inutilizando esses espaços vazios. Porém, apresenta a vantagem de uma maior flexibilização do espaço de atracação, podendo gerar ganhos quando este é aproveitado de forma eficaz. No caso do PAB Híbrido, similar ao caso discreto, o cais é particionado em berços. No entanto, grandes navios podem ocupar mais de um cais, situação que pode ser vista no berço 2 e berço 3 da Figura 4, enquanto que os pequenos navios podem compartilhar um berço, situação vista no berço 4 da Figura 4.

Figura 4 - Representação do PAB discreto, contínuo e híbrido (ROSA, 2013)



Restrições temporais ocorrem principalmente em relação aos horários de atracação e de desatracação dos navios. De acordo com Imai et al. (2001) a seguinte classificação pode ser feita: chegada estática e chegada dinâmica.

A chegada dinâmica representa o cenário da maioria dos portos, no qual os navios têm horários definidos de chegada e não têm permissão para atracar antes do horário previsto. É ainda muito comum haver horário estipulado para a desatracação do navio. Neste caso, deve-se garantir que toda a operação será realizada no intervalo de tempo compreendido entre o tempo de atracação e desatracação.

No caso de chegada estática, não há considerações quanto aos horários de chegada dos navios. Isto ocorre porque se considera que todos os navios estão alocados na área de fundeio do porto, na espera de liberação para atracação, e podem atracar imediatamente (BIERWIRTH E MEISEL, 2010).

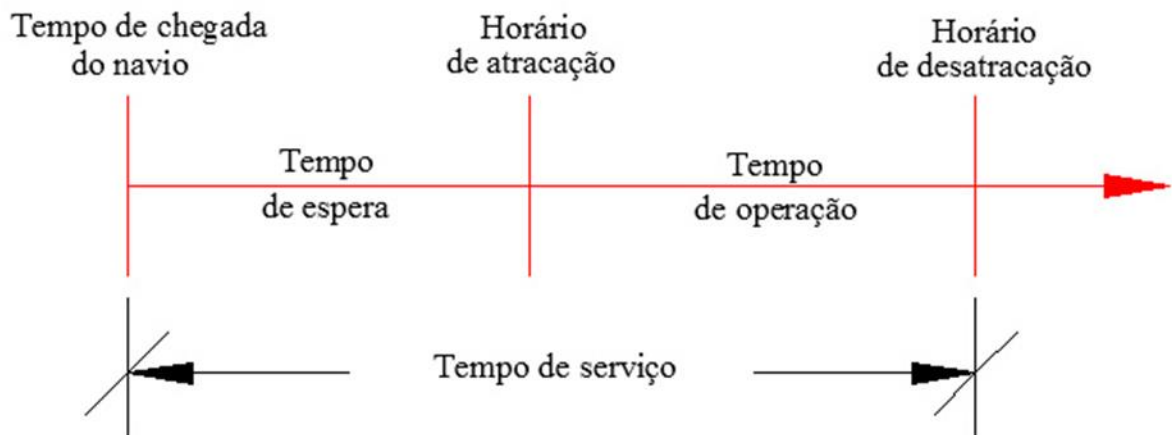
As datas de chegada dos navios podem ser consideradas como um fator determinístico ou estocástico. As chegadas determinísticas têm as datas estimadas de chegada fixadas como parâmetros do problema, conhecidas como Estimated Time of Arrival (ETA). Já nas chegadas estocásticas, consideram-se as incertezas

no tempo chegada dos navios decorrentes de problemas ocorridos em outros portos ou problemas de navegação. Neste caso, as datas são estimadas com base em dados históricos e curvas estatísticas de distribuição do tempo de chegada.

Na maioria dos modelos publicados sobre PAB, o tempo de operação é considerado como determinístico e estabelecido como parâmetro do problema. No entanto, pode ser considerado estocástico quando são consideradas incertezas devido às interrupções imprevistas, como quebra ou indisponibilidade de equipamentos de carga, por exemplo. Outra abordagem, na qual o tempo de operação depende do berço em que o navio irá atracar, também pode ser utilizada.

O tempo de serviço do navio pelo porto inclui o tempo de espera entre o horário de chegada e o de horário de atracação, bem como o tempo de operação para carregamento e descarregamento das cargas, como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Linha do tempo da operação portuária no berço



Uma sequencia de atendimento viável dos navios para o berço discreto, híbrido e contínuo pode ser representada no gráfico de espaço-tempo, com mostram as Figuras 6, 7 e 8.

Figura 6 - Sequenciamento de navios para berço discreto

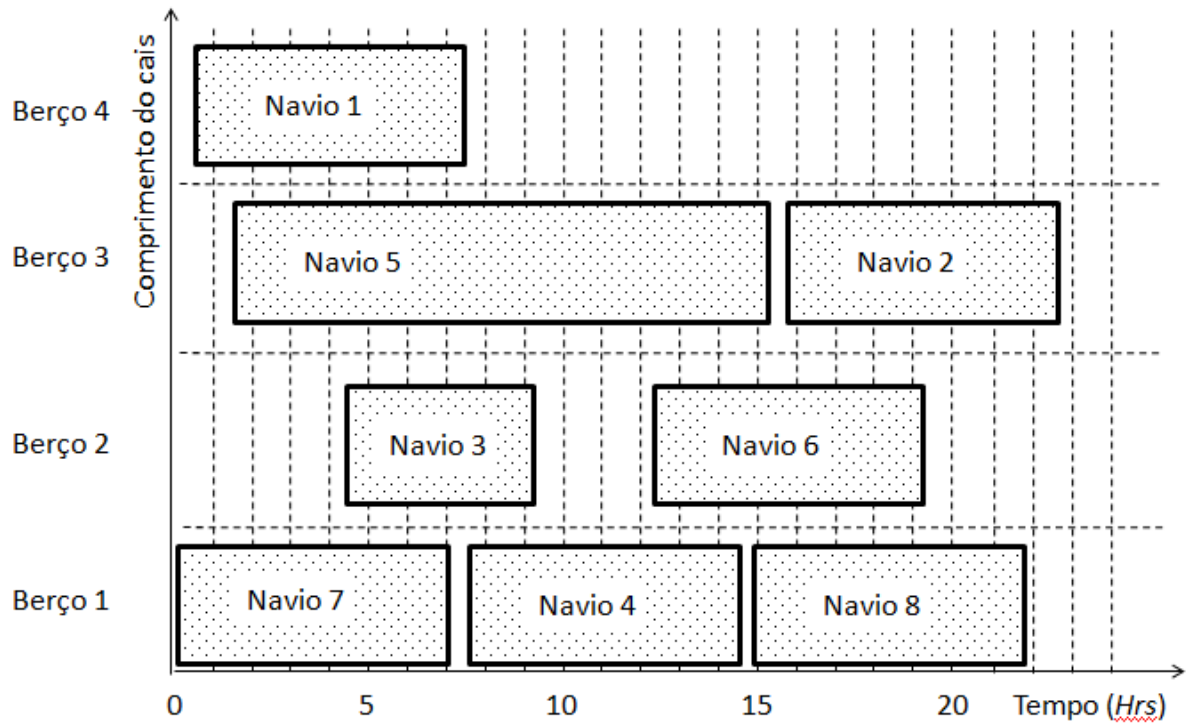


Figura 7 - Sequenciamento de navios para berço híbrido

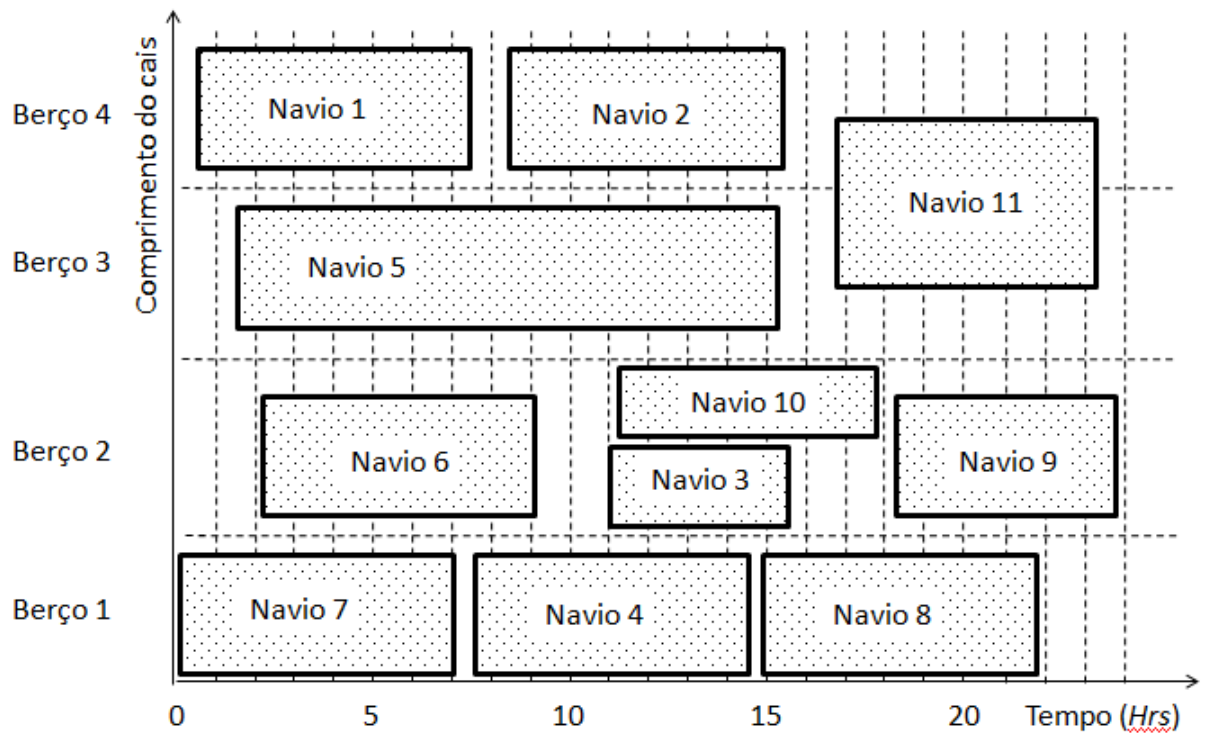
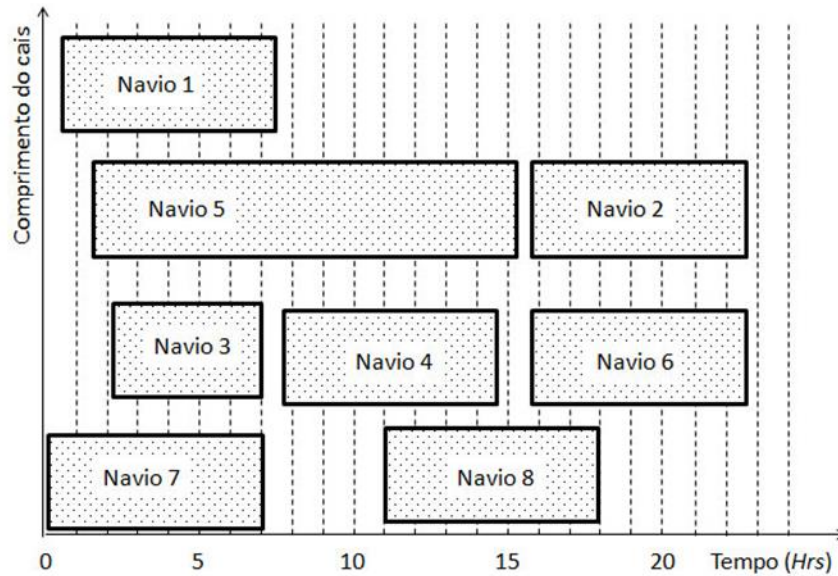
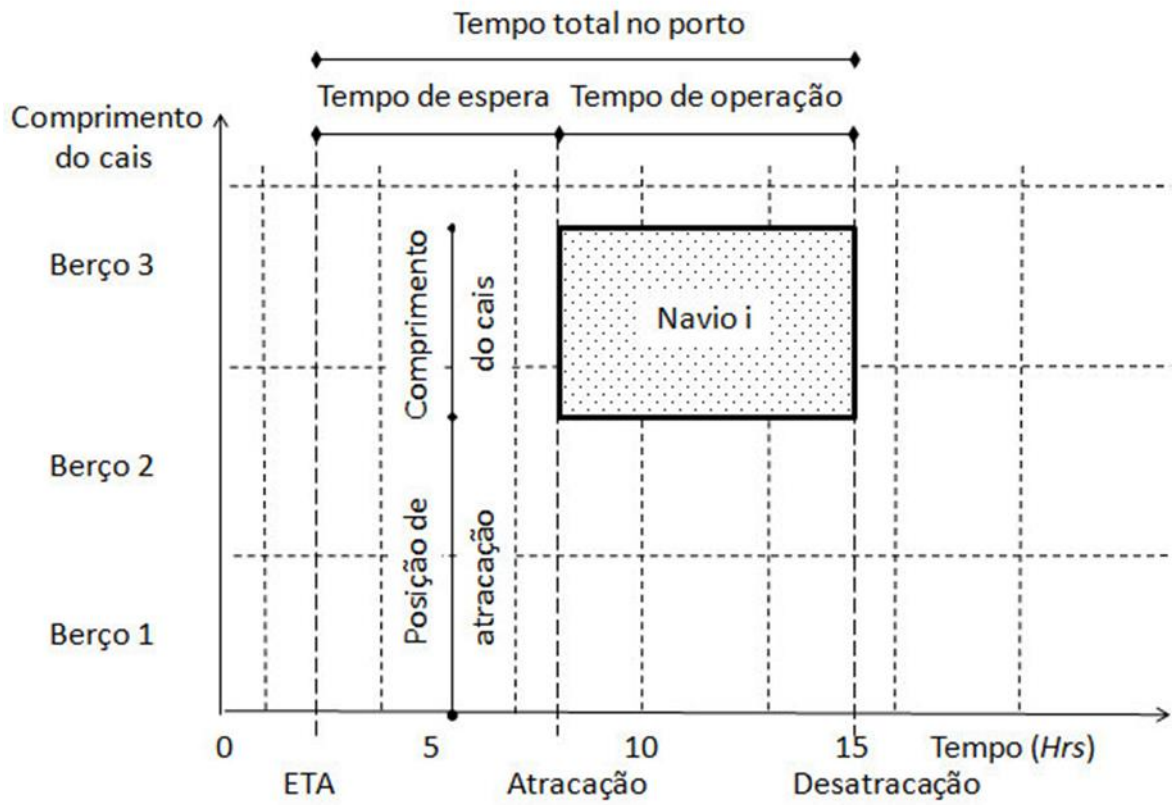


Figura 8 - Sequenciamento de navios para berço contínuo



O eixo vertical corresponde ao espaço de cais, enquanto o eixo horizontal representa o tempo dentro do horizonte de planejamento. Cada retângulo representa a atracação de um navio no porto. Os lados do retângulo paralelos ao eixo vertical representam o comprimento do navio, enquanto os lados paralelos ao eixo horizontal representam o tempo de operação da embarcação, como pode ser visto na Figura 9. É inviável que duas embarcações se sobreponham no espaço e no tempo em um dado momento. Portanto, em uma solução viável, todos os retângulos (navios) não podem se sobrepor, isto é, cada navio deve respeitar as limitações espaciais e temporais em seu berço.

Figura 9 - Gráfico Espaço-Tempo do navio

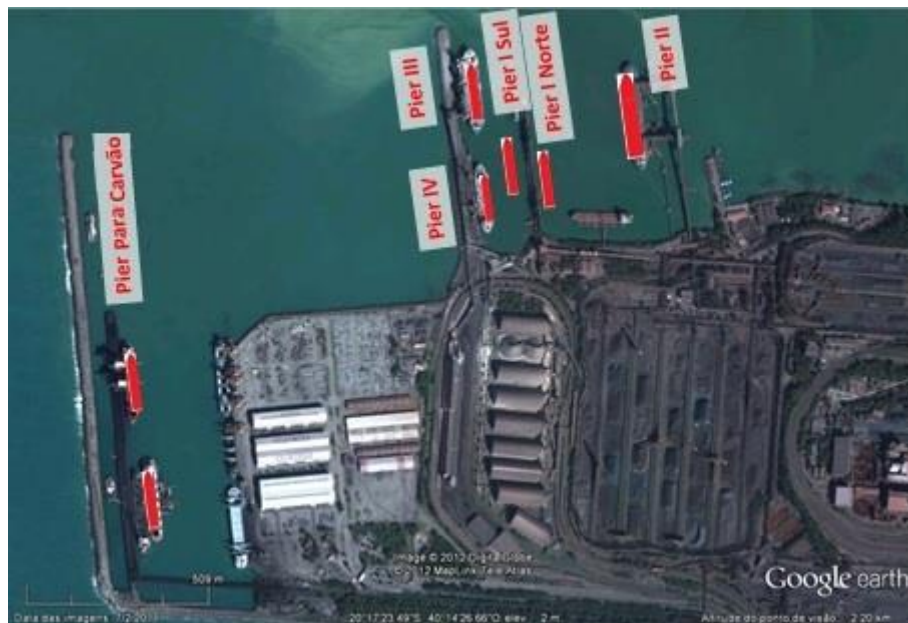


2.3 COMPLEXO PORTUÁRIO DE TUBARÃO

O Complexo Portuário de Tubarão é eminentemente um terminal graneleiro na cidade de Vitória, Espírito Santo, e é operado pela empresa Vale S/A. O acesso para cargas é ferroviário, via Estrada de Ferro Vitória a Minas, para exportação de minério de ferro, soja e farelo de soja e na importação do carvão mineral. Hoje o Porto de Tubarão é tido como o maior porto de granel de minério de ferro do mundo. Além disso, no complexo portuário, existem usinas pelletizadoras que produzem pelotas a partir do minério fino para exportação através do porto.

Na Figura 10 tem-se uma vista aérea dos berços do Porto de Tubarão. Os berços que não são destacados são operados por outras empresas que não a Vale S/A. As características dos berços existentes no porto podem ser vistas na Tabela 1.

Figura 10 - Vista geral do Porto de Tubarão e identificação dos berços (Adaptado de ROSA, 2013)



**Tabela 1 - Características dos berços do Porto de Tubarão
(SINDAMARES, 2013)**

Identificação do Berço	Tipo de Carga atendida	Restrições espaciais referentes aos navios	
		Calado (m)	LOA (m)
Pier I Sul (carregamento)	Minério de Ferro e Pelota	16,00	285,00
Pier I Norte (carregamento)	Minério de Ferro e Pelota	17,00	301,00
Pier II (carregamento)	Minério de Ferro e Pelota	23,00	365,00
Pier III (carregamento)	Soja, Farelo e Milho	15,00	280,00
Pier IV (descarregamento)	Fertilizantes	12,00	245,00
Berço 1 Carvão (descarregamento)	Carvão	16,0	300,00
Berço 2 Carvão (descarregamento)	Carvão	16,0	300,00

É importante ressaltar que, pela característica de ser um porto de granel com layout de berços discretos, o porto de Tubarão possui equipamentos de carregamento e descarregamento específicos para cada berço, ou seja, é composto por vários terminais especializados que operam diferentes cargas a granel e com taxas de operação diferentes.

2.4 SIMULATED ANNEALING

Metaheurística é um termo frequentemente usado para descrever um subcampo primário da otimização estocástica. Otimização estocástica é a classe geral de algoritmos e técnicas que empregam algum grau de aleatoriedade para encontrar soluções ótimas (ou soluções próximas das ótimas) para problemas difíceis. Metaheurísticas são os mais gerais desses tipos de algoritmos, sendo aplicados a uma ampla gama de problemas (LUKE, 2013).

Simulated Annealing (SA) é uma metaheurística inspirada em fenômenos físicos, e leva esse nome por estar fundamentada numa analogia com a termodinâmica. O termo *annealing*, na metalurgia, significa um tratamento térmico na qual um sólido cristalino é aquecido e, em seguida, deixado a arrefecer muito lentamente até atingir sua configuração de estrutura cristalina com o menor estado de energia e, portanto, livre de defeitos (HENDERSON et al., 2003).

Inicialmente, com o metal quente, as partículas possuem muita energia e podem se locomover aleatoriamente sem restrições. A partir do momento que a temperatura vai esfriando, as moléculas tendem a se acomodar na estrutura cristalina natural do material em uso (RODRIGUES et al., 2013).

Essa metaheurística foi proposta originalmente por Kirkpatrick et al. (1983), sendo uma adaptação do algoritmo de Metropolis-Hastings, um método de Monte Carlo para gerar amostras de estados de um sistema termodinâmico, publicado por Metropolis et al. (1953).

O SA funciona como um método de busca local que aceita soluções piores para escapar de ótimos locais. Essa técnica começa sua busca a partir de uma solução inicial qualquer. O procedimento principal consiste em um loop que gera aleatoriamente, em cada iteração, um único vizinho S' da solução corrente S por meio de movimentos de troca.

Uma nova solução com pior valor da função objetivo do que a solução atual pode ser aceita como a nova solução corrente, com uma probabilidade determinada pelos critérios de Metropolis (veja KIRKPATRICK et al., 1983). A idéia não é restringir os movimentos do algoritmo de busca nas direções que melhoram o valor da função

objetivo, mas também permitir movimentos que deterioram o valor da função objetivo com pequenas probabilidades (TING et al., 2013).

Dessa maneira, a cada geração de um vizinho S' de S , é testada a variação do valor da função objetivo, isto é, $\Delta = f(S') - f(S)$. Para um problema de minimização, se $\Delta < 0$, o método aceita a solução e S' passa a ser a nova solução corrente. Caso $\Delta \leq 0$, a solução vizinha candidata também poderá ser aceita, mas neste caso, com uma probabilidade $e^{-\Delta/T}$, onde T é um parâmetro do método chamado de temperatura, que regula a probabilidade de aceitação de soluções piores.

Segundo Mauri (2008a), a temperatura T assume inicialmente um valor elevado T_0 . Após um número fixo de iterações S_{Max} (o qual representa o número de iterações necessárias para o sistema atingir o equilíbrio térmico em uma dada temperatura), a temperatura é gradativamente diminuída por uma razão de resfriamento α , tal que, em um instante t , $T_t \leftarrow \alpha * T_{t-1}$, sendo $0 < \alpha < 1$. Com esse procedimento, no início, uma chance maior é dada para se escapar de mínimos locais explorando-se o espaço de soluções, e à medida que T aproxima-se de zero, o algoritmo busca refinar a solução existente, uma vez que diminui a probabilidade de se aceitar movimentos de piora ($T \rightarrow 0 \Rightarrow e^{-\Delta/T} \rightarrow 0$).

O procedimento pára quando a temperatura chega a um valor próximo de zero (temperatura de congelamento TC) e nenhuma solução que piore o valor da melhor solução é aceita, isto é, quando o sistema está estável. A solução obtida quando o sistema encontra-se nesta situação evidencia o encontro de um mínimo local, o que em alguns casos também pode representar um mínimo global.

Os parâmetros de controle do procedimento são: a razão de resfriamento α , o número de iterações para cada temperatura S_{Max} , a temperatura inicial T_0 e a temperatura de congelamento TC .

A Figura 11 apresenta o pseudocódigo do algoritmo *Simulated Annealing*.

Figura 11- Pseudocódigo do Simulated Annealing
(MAURI, 2008a)

```

1. DADO ( $\alpha$ , SAmax, T0, TC e S) FAÇA
2. S* ← S;           {Melhor solução obtida até então}
3. IterT ← 0;       {Número de iterações na temperatura T}
4. T ← T0;         {Temperatura corrente}
5. ENQUANTO (T > TC) FAÇA
6.   ENQUANTO (IterT < SAmax) FAÇA
7.     IterT ← IterT + 1;
8.     GERAR (um vizinho qualquer S' através de um dos movimentos);
9.      $\Delta \leftarrow f(S') - f(S)$ ;
10.    SE ( $\Delta < 0$ ) ENTÃO
11.      S ← S';
11.      SE ( $f(S') < f(S^*)$ ) ENTÃO
12.        S* ← S';
13.      FIM-SE
14.    SENÃO
15.      TOMAR ( $x \in [0, 1]$ );
16.      SE ( $x < e^{-\Delta/T}$ ) ENTÃO
17.        S ← S';
18.      FIM-SE
19.    FIM-SE
20.  FIM-ENQUANTO
21.  T ←  $\alpha * T$ ;
22.  IterT ← 0;
23. FIM-ENQUANTO
24. S ← S*;
25. RETORNAR (S);

```

Dessa maneira, a característica fundamental do SA é que ele fornece um meio para escapar de ótimos locais, permitindo movimentos que pioram o valor da função objetivo. À medida que o parâmetro de temperatura é reduzido à zero, os

movimentos que resultam numa piora da solução ocorrem com menor frequência (HENDERSON et al., 2013).

2.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta de maneira sucinta a literatura referente ao problema de alocação de berços. As publicações foram selecionadas pelos critérios de importância histórica no desenvolvimento da área, relevância no meio acadêmico e contribuição com novos conhecimentos. Para maiores detalhes sobre as implementações das soluções de cada autor, referir-se à publicação original.

Segundo Golias (2007), o primeiro artigo sobre o problema de alocação de berços foi publicado por Nikolaou (1969), focado no uso de teoria das filas para resolução do mesmo. Problemas relacionados à aplicabilidade dessa abordagem foram discutidos por Edmond e Maggs (1978). Na década seguinte, Sabria e Daganzo (1989) também utilizam teoria das filas na tentativa de resolver o PAB.

Após 1990, a pesquisa sobre PAB convergiu exclusivamente para o uso da programação matemática e simulação, uma vez que os modelos de filas não conseguiam capturar vários dos atributos desse problema, as únicas exceções sendo os estudos de Legato e Mazza (2001) e Dragovic et al. (2006).

Lai e Shih (1992) assumem que um cais, representado como uma linha contínua, pode ser dividido em várias seções, para as quais somente um navio pode ser atribuído em um determinado tempo. Uma heurística foi desenvolvida considerando a regra FCFS.

Imai et al. (1997) foram os primeiros a introduzir a idéia de que, para atribuições ótimas de navios a berços, a regra FCFS deveria ser abandonada. Eles propuseram uma abordagem multiobjetivo, desenvolvendo uma heurística para maximizar o desempenho das alocações e minimizar a insatisfação com a espera para atracar. Imai et al (2001) propõem a chegada dinâmica de navios, com o tempo de operação dos navios sendo dependente do berço de atracação. O modelo é uma extensão do apresentado em 1997, utilizando relaxação langrangeana para resolução do PAB. Uma abordagem similar é adotada por Monaco e Sammarra (2007). Ainda

considerando chegadas dinâmicas, Nishimura et al. (2001) propõem a utilização de Algoritmo Genético.

Cordeau et al. (2005) modelam o problema como um roteamento de veículos multi-depósito com janela de tempo (PRVMDJT). Na abordagem PRVMDJT, os navios são representados como clientes, enquanto berços são considerados depósitos. A metaheurística busca tabu é então utilizada para o problema e testada em instâncias reais. O PRVMDJT é também a base de Mauri et al. (2008c, 2008b) No primeiro, um algoritmo implementa heurísticamente o método de geração de colunas, enquanto no segundo é utilizada a metaheurística *Simulated Annealing* na resolução do PAB discreto.

Ainda tratando-se do PAB discreto, Hansen et al. (2008) propõem uma heurística *Variable Neighborhood Search* para resolução do mesmo, comparando o resultado com outras heurísticas.

Em relação ao PAB contínuo, Li et al. (1998) formulam-no com chegadas estáticas e resolvem-no heurísticamente. Uma formulação similar é proposta por Guan et al. (2002), todavia não apresentam e nem discutem exemplos numéricos. Outra proposta para o PAB contínuo é de Lim (1998), apresentando como solução uma versão restrita do problema de empacotamento bidimensional. Tong et al. (1999) foram os únicos a utilizar a Otimização por Colônia de Formigas na resolução do PAB contínuo com chegadas estáticas.

Em contrapartida, Park e Kim (2002) modelam o PAB contínuo com programação linear inteira mista. A função objetivo minimiza a penalidade associada a atrasos nos serviços e os custos em que se incorre quando um navio é colocado em uma localização não ideal. O modelo assegura que os retângulos que representam os navios não se sobreponham no espaço e no tempo. Por conta dos altos tempos de execução necessários para resolução do modelo, um *Simulated Annealing* é proposto por Kim e Moon (2003).

Em Wang e Lim (2007), o PAB contínuo com chegadas estáticas é resolvido pela utilização a heurística *Stochastic Beam Search*. Os resultados sugerem que a abordagem é o estado-da-arte para essa classe de problema.

Segundo Buhrkal et al. (2011), uma recente extensão do PAB é integrá-lo no planejamento de guindastes do cais. Contribuições incluem Park e Kim (2003), Imai et al. (2008), Liang et al. (2009) e Meisel e Bierwirth (2009). Todas as abordagens citadas são baseadas em heurísticas.

Além dos trabalhos de Kim e Moon (2003) e Mauri et al. (2008b) citados anteriormente, outras propostas de utilização do *Simulated Annealing* na resolução do PAB são encontradas na literatura. Moorthy e Teo (2006) utilizam técnicas de agendamento estocástico de projetos e derivam uma expressão para o tempo de espera dos navios quando os tempos de chegada e de operação seguem distribuições normais, empregando o *Simulated Annealing* para encontrar uma solução. Xu et al. (2012) estudaram um problema robusto alocação de berços, na qual é considerada explicitamente a incerteza no tempo de chegada do navio e no tempo de operação, sendo desenvolvido um algoritmo de agendamento de berços que integra o *Simulated Annealing* e o algoritmo *branch-and-bound*. Barros et al. (2011) apresentam um modelo de programação linear inteira para representar o problema de alocação de berços em portos graneleiros com restrições de estoque e que possuem condições de maré. É utilizado o *Simulated Annealing* no emprego de uma heurística específica do problema como alternativa para resolução de certas instâncias mais difíceis. Oliveira et al. (2012) propõem uma alternativa para resolver o PAB discreto com chegadas dinâmicas baseada na aplicação do método *Clustering and Search*. Este método iterativo divide o espaço de busca em aglomerados e é composto de metaheurísticas para a geração de soluções. Na proposta, o *Simulated Annealing* foi utilizado para a geração de soluções, e os resultados computacionais foram comparados com o de outros métodos encontrados na literatura.

Em relação ao PAB-MC, o único trabalho encontrado na literatura e que sugere a criação dessa classe de problema é proposto por Rosa et al. (2013). Para resolução deste, é elaborado um modelo matemático baseado em Programação Linear Inteira Mista e as soluções comparadas com dados reais.

3 METODOLOGIA

Inicialmente, foram levantadas as características referentes ao cenário atual de operações da empresa Vale S/A no Complexo Portuário de Tubarão. Não obstante, também foi analisado o contexto de uma expansão, na qual a empresa passa a operar os outros quatro píeres que atualmente não estão sob operação da mesma. Em seguida, as características levantadas foram utilizadas para a formulação das restrições do PAB, bem como sua função objetivo.

A Função Objetivo (FO) utilizada para o PAB apresentado é a de minimizar o tempo de permanência no porto. A FO é dada pela soma do tempo de operação e tempo de espera dos navios. O tempo de espera é calculado como a diferença entre o tempo de atracação e o ETA.

Todos os navios que atracam no Complexo Portuário de Tubarão possuem restrição temporal. Assim, cada navio possui um ETA e não pode ser atracado antes do mesmo. Os berços possuem restrições espaciais, ou seja, possuem profundidade e comprimento que limitam os navios a atracarem no mesmo. Somente é possível um navio atracar em um berço caso possua o LOA e calado menores que o comprimento e profundidade do berço, respectivamente.

O cais é pré-particionado em berços, configurando o PAB discreto, e a chegada dos navios no porto é dinâmica e determinística. Dessa maneira, os navios têm o ETA fixo e conhecido à priori e não têm permissão para atracar nos berços antes do horário previsto.

Diferente dos modelos de PAB encontrados na literatura, o problema estudado admite berços que operam mais de um tipo de carga e com taxas de operação diferentes. Portanto, o tempo de operação deixa de ser determinístico e passa a depender do berço em que o navio irá atracar.

A proposta de resolver o PAB utilizando uma metaheurística foi realizada por meio da programação de um código na linguagem de programação C que executa o *Simulated Annealing*. Para tal, utilizou-se o pacote Microsoft Visual Studio 2010, um ambiente de desenvolvimento integrado para o sistema operacional Windows. Esta ferramenta possui um editor de código com suporte à linguagem de programação C que apresenta facilidades como marcação e verificação de sintaxe e recurso de

conclusão automática de código. Além disso, há um depurador de código e compilador integrados à mesma.

A implementação da metaheurística é tratada com maior detalhe na seção 3.1.

Para se testar a eficácia do método, foi utilizado um modelo matemático baseado no modelo proposto por Cordeau et al. (2005) e Rosa et al. (2013), apresentado na seção 3.2.

Dentre os softwares de otimização matemática disponíveis no mercado, optou-se pelo uso do CPLEX 12.5 por ser um software robusto e disponível para uso sem custos no meio acadêmico. Para resolver o problema proposto no CPLEX, traduziu-se o modelo matemático na linguagem específica do CPLEX e foram cadastrados todos os parâmetros nos arquivos de dados específicos desse software. O tempo limite de execução do modelo matemático foi definido em 120 minutos.

O software de otimização matemática foi executado em um computador com processador Intel Core i7 e 6GB de memória RAM, enquanto que a metaheurística foi executada em um computador com processador Intel Core i3 e 4GB de memória RAM.

Em um primeiro momento, foram criadas cinco instâncias de teste com 10 navios, definindo-se a quantidade de berços em 4, 7, 9, 11 e 15 respectivamente.

Com a definição de 10 navios a serem utilizados nas instâncias de teste, foi possível garantir que o software de otimização apresentasse solução ótima para as mesmas. Em seguida, as cinco instâncias foram utilizadas na metaheurística proposta.

As soluções advindas da metaheurística foram comparadas com as soluções ótimas obtidas do software de otimização. Dessa maneira, a validação da eficácia do *Simulated Annealing* pôde ser feita.

Em um segundo momento, novas instâncias que refletem o cenário atual do Complexo Portuário de Tubarão foram utilizadas. No total, três instâncias com os sete berços operados pela Vale S/A foram propostas, definindo-se a quantidade de navios em 100, 150 e 250 respectivamente. Finalmente, três instâncias que refletem o cenário de possível expansão das operações foram geradas, sendo este cenário

composto de 11 berços, e 100, 150 e 250 navios definidos para cada instância respectivamente.

A Tabela 2 contém todas as instâncias utilizadas no modelo matemático e na metaheurística em cada cenário descrito anteriormente.

Tabela 2 - Instâncias de cada cenário

Cenário para validação do AS		
Instâncias:	Número de Berços:	Número de Navios:
B04N010	4	10
B07N010	7	10
B09N010	9	10
B11N010	11	10
B15N010	15	10
Cenário atual do Complexo Portuário de Tubarão		
Instâncias:	Número de Berços:	Número de Navios:
B07N100	7	100
B07N150	7	150
B07N250	7	250
Cenário de expansão das operações do Complexo Portuário de Tubarão		
Instâncias	Número de Berços:	Número de Navios:
B11N100	11	100
B11N150	11	150
B11N250	11	250

3.1 METAHEURÍSTICA PROPOSTA

Para a implementação da metaheurística, foi escrito um código na linguagem de programação C para a aquisição de dados referentes aos navios que atracarão no porto e aos berços que atenderão os mesmo. Também foi programado na mesma linguagem o *Simulated Annealing* para agendar a atracação dos navios, sendo executado internamente à função principal. O SA é responsável por definir em qual berço o navio irá atracar, sua posição na fila de atracação do berço e o tempo de atracação. O pseudocódigo da função principal é apresentado a seguir na Figura 12.

Figura 12 - Pseudocódigo da função principal

1. CRIAR (uma lista L com todos os n navios);
2. CRIAR (uma lista B com todos os m berços);
3. PARA (cada navio i em L, $i = 1, 2, \dots, n$) FAÇA
4. LER (dados do navio i de um arquivo de dados);
5. GRAVAR (dados do navio i na Lista L);
6. FIM-PARA
7. PARA (cada berço j em B, $j = 1, 2, \dots, m$) FAÇA
8. LER (dados do berço j de um arquivo de dados);
9. GRAVAR (dados do berço j na Lista B);
10. FIM-PARA
11. CRIAR (matriz de pré-processamento M);
12. EXECUTAR (sub-rotina de inicialização);
13. EXECUTAR (sub-rotina de pré-processamento);
14. EXECUTAR (Simulated Annealing);
15. GRAVAR (solução em um arquivo de saída);

Para cada navio, os dados de entrada correspondem ao ETA, LOA, calado e a capacidade de cada tipo de carga será carregada/descarregada. Para cada berço, os dados de entrada correspondem ao comprimento, profundidade e taxa de carregamento/descarregamento de cada tipo de carga. Essas informações são

necessárias para que as restrições temporais, espaciais e de carga possam ser cumpridas.

A função principal executa internamente três sub-rotinas: inicialização, pré-processamento e *Simulated Annealing*, sendo o código utilizado no *Simulated Annealing* uma adaptação de Mauri et al. (2008b), por meio de uma modificação na proposta de se utilizar a técnica de “reaquecimento”. Esta técnica consiste em, após executar o SA, utilizar-se da melhor solução, obtida até então, como solução inicial da nova execução, com o intuito de refinar o resultado. As adaptações realizadas no código original foram a adição do parâmetro *tempoMaxSA* e exclusão dos comandos de gerar e avaliar a solução inicial S, visto que a sub-rotina de inicialização realiza essas funções. Dessa maneira, a metaheurística é executada enquanto o tempo de execução for inferior ao parâmetro *tempoMaxSA*, e são realizados tantos reaquecimentos quanto possíveis ao longo do tempo de execução. A Figura 13 abaixo apresenta o pseudocódigo do *Simulated Annealing* executado pela função principal.

Figura 13 - Pseudocódigo do Simulated Annealing executado pela função principal

```

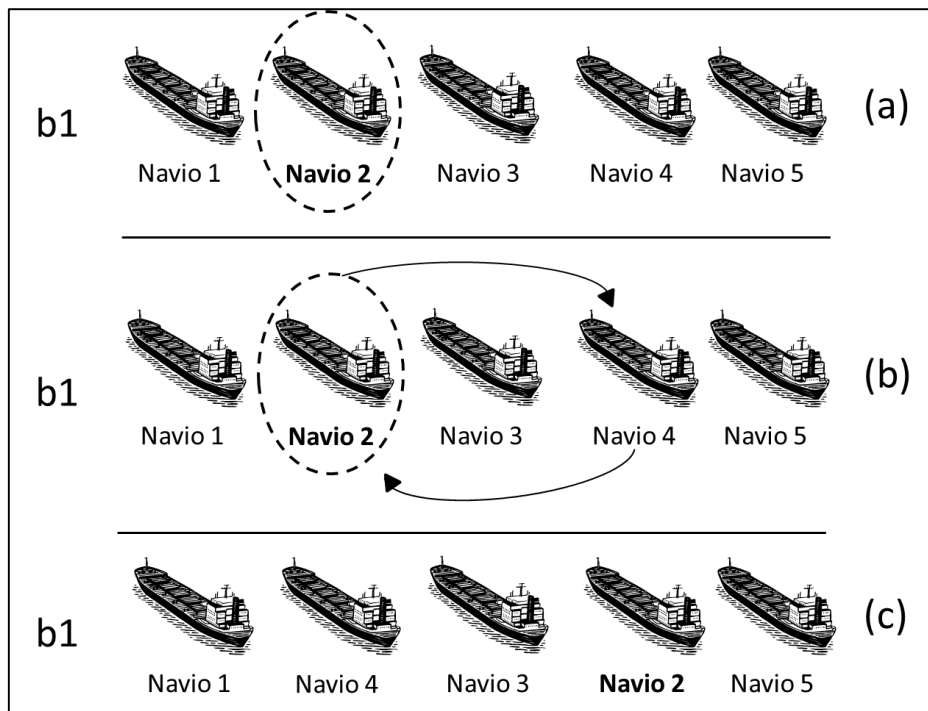
1. DADO ( $\alpha$ ,  $S_{\text{Max}}$ ,  $T_0$ ,  $T_C$ ,  $S$  e tempoMaxSA)
2.  $S^* \leftarrow S$ ;
3.  $x \leftarrow 1$ ;
4. ENQUANTO ( $x = 1$ ); {Loop de reaquecimentos}
5.    $T \leftarrow T_0$ ; {Temperatura corrente}
6.   IterT  $\leftarrow 0$ ; {Número de iterações na temperatura T}
7.    $S \leftarrow S^*$ ; {Melhor solução é utilizada no reaquecimento}
8.   ENQUANTO ( $T > T_C$ ) FAÇA
9.     SE (tempo de execução > tempoMaxSA) ENTÃO
10.       $x \leftarrow 0$ ;
11.      INTERROMPE (o loop enquanto); {Vai para a linha 31}
12.     FIM-SE
13.     ENQUANTO (IterT <  $S_{\text{Max}}$ ) FAÇA
14.       IterT  $\leftarrow$  IterT + 1;
15.       GERAR (um vizinho  $S'$  através de um dos movimentos);
16.        $\Delta \leftarrow f(S') - f(S)$ ;
17.       SE ( $\Delta < 0$ ) ENTÃO
18.          $S \leftarrow S'$ ;
19.         SE ( $f(S') < f(S^*)$ ) ENTÃO
20.            $S^* \leftarrow S'$ ;
21.         SENÃO
22.           TOMAR ( $x \in [0, 1]$ );
23.           SE ( $x < e^{-\Delta/T}$ )
24.              $S \leftarrow S'$ ;
25.           FIM-SE
26.         FIM-SE
27.       FIM-SE
28.     FIM-ENQUANTO
29.      $T \leftarrow \alpha * T$ ;
30.     IterT  $\leftarrow 0$ ;
31.   FIM-ENQUANTO
32. FIM-ENQUANTO
33. RETORNAR ( $S^*$ );

```

Para a função de gerar vizinhos da solução S, foi utilizada a estrutura de vizinhança apresentada em Mauri et al. (2008a), que consiste em três movimentos de troca: reordenar navios, realocar navio e trocar navios.

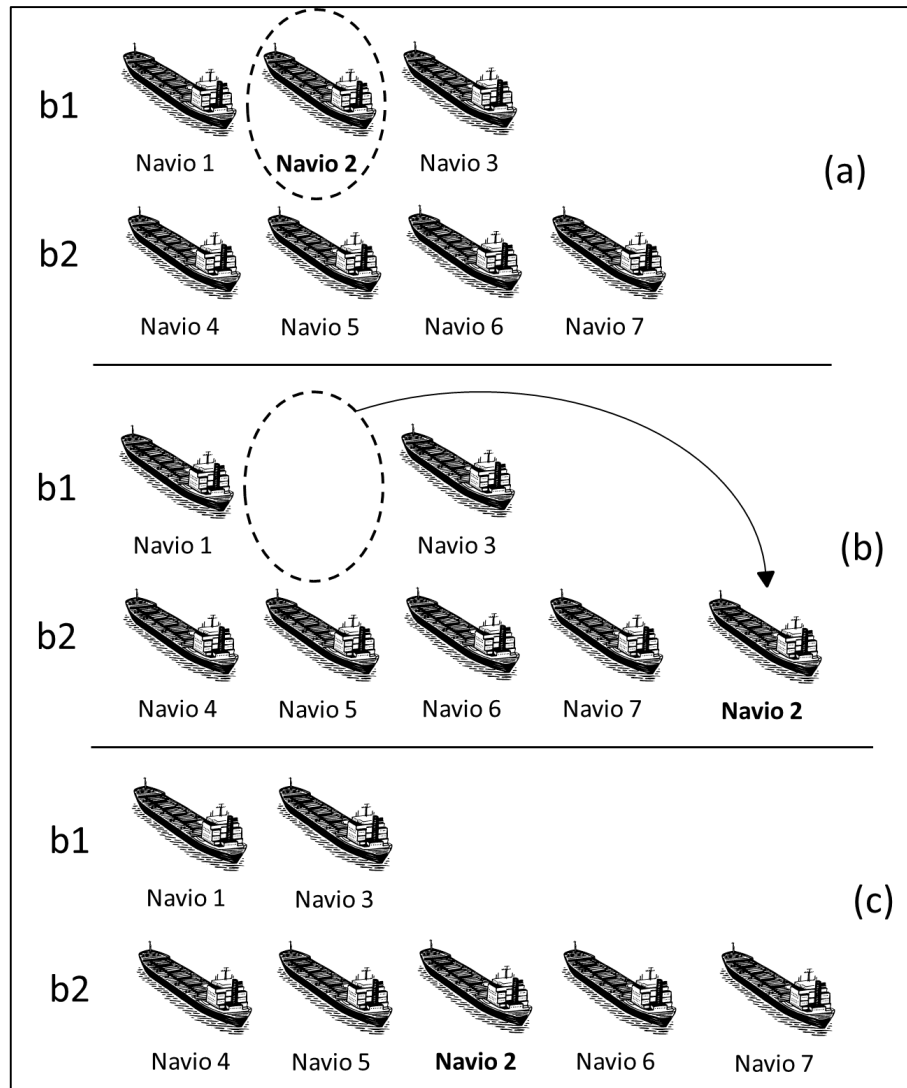
O movimento *reordenar navios* consiste basicamente em selecionar um berço qualquer pertencente à solução, selecionar um navio qualquer atendido por esse berço (a), selecionar uma nova posição na sequência de atendimento desse berço (b) e trocar a posição de atendimento do navio selecionado (c). Esse movimento é ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Movimento Reordenar Navios



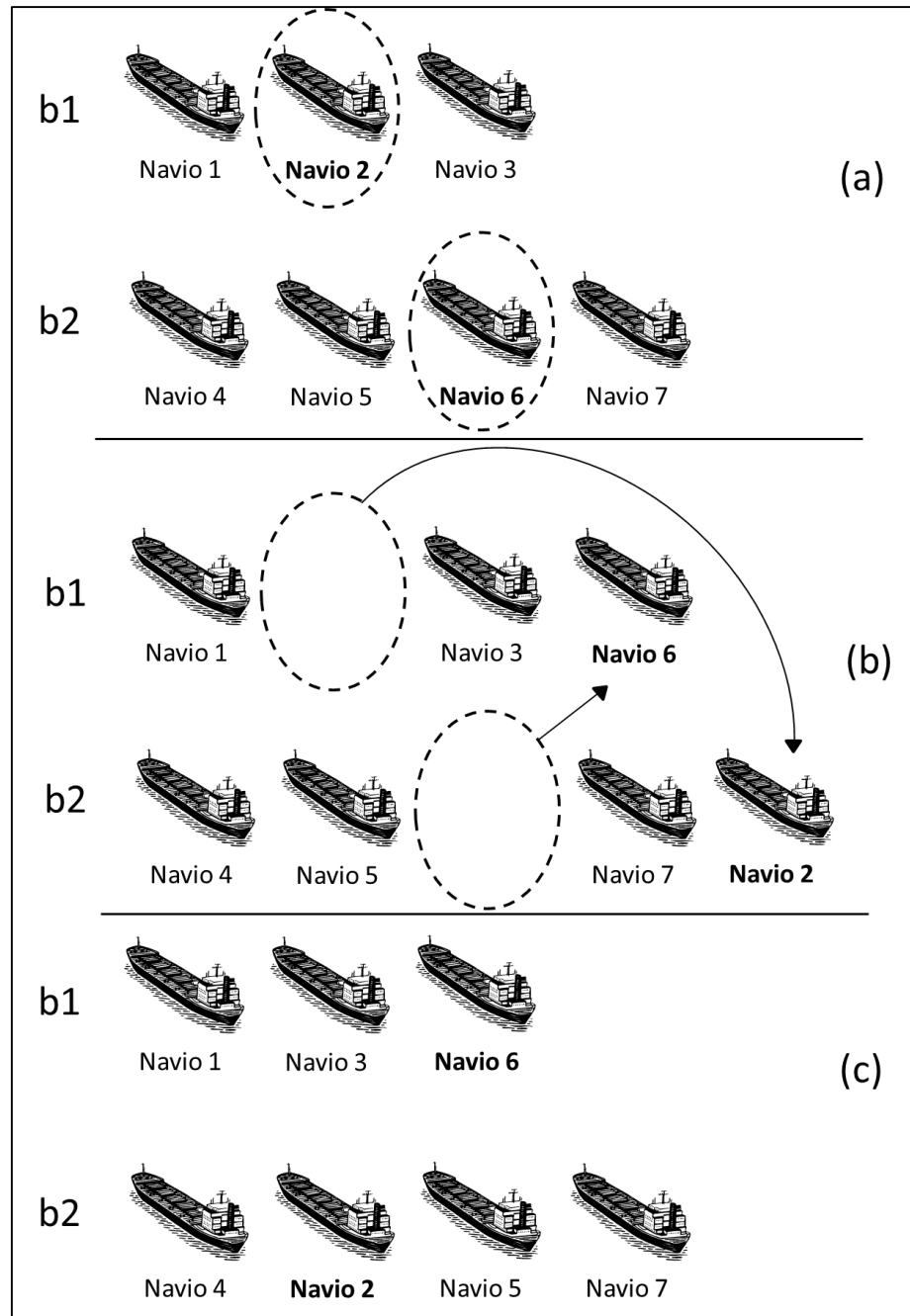
O movimento *realocar navio* consiste basicamente em selecionar dois berços quaisquer, selecionar um navio qualquer em apenas um dos dois berços (a), extraí-lo de seu berço atual e atribuí-lo ao outro berço (b). O novo berço onde o navio será atribuído deverá obrigatoriamente poder atender ao navio selecionado, pois caso contrário, outro berço deverá ser selecionado. Após a atribuição, a sequência de atendimento do novo berço deverá ser reorganizada pelo horário de chegada dos navios (c). A Figura 15 ilustra esse movimento.

Figura 15 - Movimento Realocar Navio



O movimento *trocar navios* consiste basicamente em selecionar dois berços quaisquer, selecionar um navio qualquer em cada um dos dois berços (a), e trocá-los (b). Caso os navios não possam ser atendidos pelos “novos” berços onde serão alocados, deverão ser selecionados novos navios e/ou berços. Após a troca, a sequência de atendimento dos dois berços deverá ser ordenada pelo horário de chegada dos navios (c). Esse movimento é ilustrado na Figura16.

Figura 16 - Movimento Trocar Navios



A partir dessa estrutura de vizinhança, o SA foi implementado de modo que cada solução vizinha é gerada por apenas um desses movimentos, sendo a sua escolha feita de forma aleatória, porém uniformemente distribuída, possibilitando assim uma boa diversidade entre as soluções intermediárias geradas, e conseqüentemente uma boa exploração do espaço de soluções (MAURI, 2008b).

Uma particularidade dessa metaheurística proposta é a utilização de uma sub-rotina de pré-processamento. Esta foi concebida para auxiliar na escolha de navios para os movimentos de troca, devido as particularidade do problema estudado. Como visto anteriormente, para o movimento *realocar navio*, o algoritmo escolhe um navio aleatório agendado em um berço, escolhe também aleatoriamente um “novo” berço, e caso o navio escolhido não possa atracar neste, deve ser escolhido outro “novo” berço. É importante lembrar que o problema possui, além de restrições espaciais, restrição de tipos de cargas operáveis pelos berços. O problema da implementação desse método é que, no caso de haverem poucas opções de berços atracáveis para o navio selecionado, será dispendido um tempo computacional considerável somente para encontrar um berço viável para a movimentação, já que o berço inicialmente inviável não é excluído da nova escolha. Para tal, seria necessária uma estrutura de armazenamento dos berços passíveis de escolha em cada iteração da função de geração de vizinhos. No caso do navio possuir uma única opção de berço viável para atracação, o movimento se torna impossível, e seriam escolhidos e posteriormente rejeitados todos os berços até que não houvesse mais nenhum berço disponível para a escolha. Quando considerado o movimento *trocar navios*, a situação apontada fica ainda mais crítica, já que é necessário escolher um par de berços que possua navios agendados que possam atracar mutuamente nos mesmos, seguindo toda a problemática do caso anterior, porém para dois navios.

Portanto, como estratégia para contornar os contratempos citados anteriormente, foi utilizada uma matriz de atracação, gerada em uma etapa de pré-processamento. Essa matriz possui j linhas representando cada um dos berços em B , e nas colunas os respectivos navios que podem atracar no berço j . Isto é, a matriz representa quais navios são passíveis de atracação em cada um dos berços. Essa informação à priori permite que a escolha aleatória do navio, após a escolha do berço, seja feita somente dentro do conjunto de navios possam atracar neste. O pseudocódigo da rotina de pré-processamento, na qual a matriz de atracação é preenchida, está ilustrada na Figura 17

Figura 17 - Sub-rotina de Pré-processamento

```

1. PARA (cada berço j em B, i = 1,2,...,m) FAÇA
2.   x ← 1;
3.   PARA (cada navio i em L, i = 1,2,...,n) FAÇA
4.     atracar ← 1;
5.     SE (LOA do navio i > comprimento do berço j OU calado do navio i > profundidade do berço j) ENTÃO
6.       atracar ← 0;   {Nesse caso, as restrições espaciais impedem o navio de atracar no berço}
7.     SENÃO
8.       PARA (cada carga k em C, k = 1,2,...,p) FAÇA
9.         SE (capacidade do navio i para carga k ≠ 0 E taxa de carregamento do berço j para carga k = 0) ENTÃO
10.          atracar ← 0;   {Nesse caso, as restrições de carga impedem o navio de atracar no berço}
11.        FIM-SE
12.      FIM-PARA
13.    FIM-SE
14.    SE (atracar = 1) ENTÃO
15.       $M_{jx} \leftarrow \text{navio } i;$    {Matriz de atracação M}
16.      x ← x + 1;
17.    FIM-SE
18.  FIM-PARA
19. FIM-PARA

```

Em relação à sub-rotina de inicialização, ela é responsável por gerar a solução inicial S que será utilizada no *Simulated Annealing*. O algoritmo consiste em alocar os navios da lista L , um a um, cada qual em um berço que possa atendê-lo, dadas as restrições do problema, e que possua o menor número de navios agendados no momento. Dessa maneira, é possível gerar uma solução inicial com qualidade, balanceando a utilização dos berços do porto. Essa característica dificulta a escolha de navios que inviabilizem os primeiros movimentos de *realocar navios* e *trocar navios*. Isto é, tal qual explicado na descrição da sub-rotina de pré-processamento, como os navios são selecionados aleatoriamente nos movimentos de troca, é mais provável que os movimentos sejam viáveis quanto mais navios candidatos para as trocas o berço possuir. A figura 18 apresenta o pseudocódigo da sub-rotina de inicialização.

Figura 18 - Sub-rotina de Inicialização

1. PARA (cada navio i em L , $i = 1, 2, \dots, n$) FAÇA
2. SELECIONAR (o berço j em B com o menor número de navios agendados, $j = 1, 2, \dots, m$);
3. SE (o berço j não puder atender o navio i) ENTÃO
4. VOLTAR (para o passo 2 e excluir o berço j da seleção);
5. SENÃO
6. ATRIBUIR (o navio i ao berço j);
7. FIM-SE
8. FIM-PARA
9. PARA (cada berço j em B , $i = 1, 2, \dots, m$) FAÇA
10. ORDENAR (os navios do berço j pelo ETA);
11. FIM-PARA

3.2 MODELO MATEMÁTICO

Seja V um conjunto de navios planejados para chegar ao porto, B um conjunto de berços e C um conjunto de cargas que podem ser operadas pelo porto. Cada navio $i \in V$ possui os seguintes parâmetros:

a_i : tempo de chegada;

o_i : length overall;

f_i : calado;

$S_i \subseteq C$: conjunto de cargas arrumadas no navio $i \in V$;

q_{ic} : quantidade da carga $c \in C$ (toneladas) a ser carregada (ou descarregada) no porto;

Ainda, cada berço $b \in B$ possui os seguintes parâmetros:

w_b : comprimento;

h_b : profundidade;

u_b : under keel clearance;

$R_b \subseteq C$: conjunto de cargas que podem ser operadas no berço $b \in B$;

l_{bc} : taxa de carregamento/descarregamento da carga $c \in C$ no berço $b \in B$;

Esse modelo matemático é baseado no modelo proposto por Cordeau *et al.* (2005) que considera o PAB como um problema de roteamento de veículos com multi-depósito e janela de tempo (PRVMDJT). Considerações de Rosa *et al.* (2013) também foram adicionadas no modelo. Assim, seja $N^b \subseteq V$ um conjunto de navios que podem ser servidos pelo berço $b \in B$, um navio $i \in V$ pode ser servido pelo berço $b \in B$ se e somente se $S_i \subseteq R_b$. Considere um multigrafo $G^b = (V^b, A^b)$, $\forall b \in B$, onde $V^b = N^b \cup \{o(b), d(b)\}$ e $A^b \subseteq V^b \times V^b$. No contexto do PRVMDJT, um berço

$b \in B$ deixa a sua origem (depósito) $o(b)$ para servir navios de N^b e então termina no destino (depósito virtual) $d(b)$.

Para as variáveis de decisão, tem-se $x_{ij}^b \in \{0,1\}, \forall b \in B, (i, j) \in A^b$ assumindo valor 1 se o nó j é atendido depois do nó i no berço b . $T_i^b \geq 0, \forall b \in B, i \in V$ é o tempo de atracação do navio i , $T_{o(b)}^b$ e $T_{d(b)}^b, \forall b \in B$ representam o início e fim do tempo de operação do berço b , respectivamente. $T_{o(b)}^b$ é o tempo em que o primeiro navio atraca no berço b e $T_{d(b)}^b$ é o tempo que o último navio deixa o berço b . Assim, a formulação matemática para o problema de alocação de berços para múltiplas cargas com restrições espaciais e temporais pode ser escrita como:

$$MIN \quad \nu = \sum_{b \in B} \sum_{i \in N^b} \left(T_i^b - a_i + \sum_{c \in S_i} \frac{q_{ic}}{l_{bc}} \right) \sum_{j \in N^b \cup \{d(b)\}} x_{ij}^b \quad (1)$$

Sujeito a:

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

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

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

$$\sum_{j \in N^b \cup \{d(b)\}} x_{ij}^b = \sum_{j \in N^b \cup \{o(b)\}} x_{ji}^b \quad \forall b \in B, i \in N^b \quad (5)$$

$$\left(T_i^b + \sum_{c \in S_i} \frac{q_{ic}}{l_{bc}} - T_j^b \right) x_{ij}^b \leq 0 \quad \forall b \in B, (i, j) \in A^b \quad (6)$$

$$T_i^b \geq a_i \quad \sum_{j \in N^b \cup \{d(b)\}} x_{ij}^b \quad \forall b \in B, i \in N^b \quad (7)$$

$$(w_b - o_i) x_{ij}^b \geq 0 \quad \forall b \in B, (i, j) \in A^b \quad (8)$$

$$(h_b - f_i - u_b) x_{ij}^b \geq 0 \quad \forall b \in B, (i, j) \in A^b \quad (9)$$

$$x_{ij}^b \in \{0,1\} \quad \forall b \in B, (i, j) \in A^b \quad (10)$$

A função objetivo não linear (1) procura minimizar o tempo total gasto por todos os navios. A restrição (2) garante que cada navio é servido uma vez por um berço. Para cada berço $b \in B$, as restrições (3)-(5) correspondem às clássicas restrições de conservação de fluxo de rede de um caminho originado no nó $o(b)$ e terminando no nó $d(b)$. A restrição não linear (6) controla o tempo de atendimento do navio posterior em relação ao navio anterior. A restrição (7) garante que o navio só será atendido após a sua chegada ao porto. As restrições (8) e (9) garantem que um navio pode ser atracado em um berço se o comprimento e profundidade deste forem adequados. A restrição (10) garante que a variável $x_{ij}^b \forall b \in B, (i, j) \in A^b$ pode assumir valor 0 ou 1.

A função objetivo é não linear por causa do termo $T_i^b \sum_{j \in N^b \cup \{d(b)\}} x_{ij}^b$ e a restrição (6)

também é não linear por causa dos termos $T_i^b x_{ij}^b$ e $T_j^b x_{ij}^b$. Para linearizar esses

termos, foi utilizado um novo parâmetro Hp que representa o horizonte de

planejamento. Também foi definida uma nova variável z_i^b que representa o tempo

de atracação de um navio $i \in V$ no berço $b \in B$. Para completar a linearização do

modelo, quatro restrições propostas são mostradas a seguir.

$$z_i^b \leq Hp \sum_{j \in N^b \cup \{d(b)\}} x_{ij}^b \quad \forall b \in B, i \in A^b \quad (11)$$

$$z_i^b \leq T_i^b \quad \forall b \in B, i \in A^b \quad (12)$$

$$z_i^b \geq T_i^b - Hp \left(1 - \sum_{j \in N^b \cup \{d(b)\}} x_{ij}^b\right) \quad \forall b \in B, i \in A^b \quad (13)$$

$$z_i^b \geq 0 \quad \forall b \in B, i \in A^b \quad (14)$$

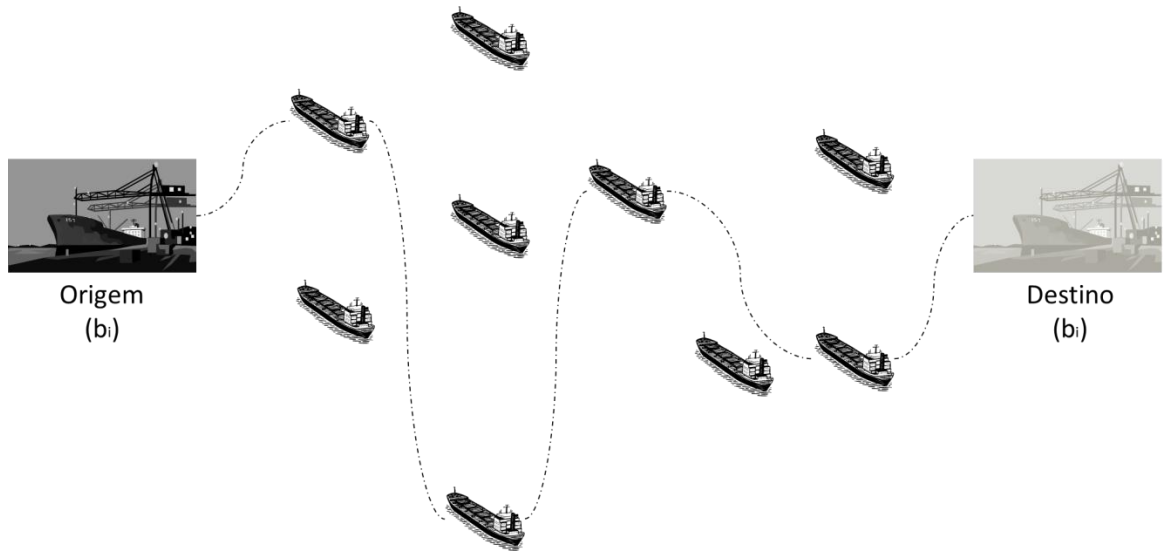
O modelo proposto pode ser linearizado agregando-se os parâmetros, variáveis e restrições explicadas anteriormente. A função objetivo não linear (1) será substituída pela equação (15) e a restrição (6) será substituída pela restrição (16).

$$MIN \quad v = \sum_{b \in B} \sum_{i \in N^b} \left(T_i^b - \left(\left(a_i - \sum_{c \in S_i} \frac{q_{ic}}{l_{bc}} \right) \sum_{j \in N^b \cup \{d(b)\}} x_{ij}^b \right) \right) \quad (15)$$

$$T_i^b + \left(\sum_{c \in S_i} \frac{q_{ic}}{l_{bc}} x_{ij}^b \right) - T_j^b \leq 0 \quad \forall b \in B, (i, j) \in A^b \quad (16)$$

De maneira simplificada, no problema de roteamento de veículos com multi-depósitos, na qual o modelo matemático é fundamentado, a analogia feita é de que os depósitos representam cada um dos berços do porto, os quais possuem veículos (virtuais) que atendem os clientes, representados pelos navios, e retornam ao depósito inicial no término da rota. A Figura 19 ilustra essa analogia para um berço qualquer $i \in B$ no porto.

Figura 19 - PAB como um PRVMD



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dada a natureza estocástica da otimização obtida através da metaheurística, para cada execução de uma mesma instância, soluções diferentes podem ser encontradas. Por este motivo, é necessário realizar um número mínimo de execuções para se obter informações a respeito da dispersão das soluções apresentadas. Uma das maneiras utilizadas para se avaliar a dispersão é através do desvio médio absoluto.

As tabelas de resultados deste trabalho apresentam o desvio médio absoluto como medida de dispersão, e seu cálculo foi realizado através da utilização de 10 execuções para cada instância.

Assim, para o cenário de validação do *Simulated Annealing*, foram utilizadas as instâncias de teste e os resultados estão apresentados na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Resultados do Cenário de Validação do SA

Instâncias	CPLEX		Simulated Annealing				Variação
	Solução Ótima	Tempo de Execução (s)	Melhor Solução	Média	Desvio (%)	Tempo de Execução (s)	
B04N010	517,6879	2,29	517,6879	517,6879	0	120	0
B07N010	555,9806	0,89	555,9806	555,9806	0	120	0
B09N010	661,3952	4,28	661,3952	661,3952	0	120	0
B11N010	241,0246	2,77	241,0246	241,0246	0	120	0
B15N010	115,8201	0,59	115,8201	115,8201	0	120	0
	Parâmetros do SA	Alfa	SAmáx	T0	TC	TempoMaxSA	
		0,975	1000	20000	0,01	120	

Dado o pequeno número de navios das instâncias de testes, o modelo matemático foi capaz de encontrar uma solução ótima em um tempo de execução bastante rápido. Ao compará-los com os resultados obtidos do *Simulated Annealing*, na coluna *Variação*, pode-se perceber que a metaheurística também foi capaz de encontrar a solução ótima para todas as instâncias de teste. Portanto, é possível inferir que o *Simulated Annealing* é capaz de convergir para a solução ótima nas demais instâncias, ou então encontrar uma solução próxima da ótima dado um tempo de execução suficiente para tal. Os parâmetros do SA estão apresentados na parte inferior da tabela.

Em relação ao cenário atual do Complexo Portuário de Tubarão, os resultados da metaheurística, bem como a comparação com o modelo matemático, são apresentados abaixo na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados do Cenário atual do Complexo Portuário de Tubarão

Instâncias	CPLEX				Simulated Annealing			
	Upper Bound (10 ³)	Lower Bound (10 ³)	Gap (%)	Tempo de Execução (s)	Melhor Solução (10 ³)	Média (10 ³)	Desvio (%)	Tempo de Execução (s)
B07N100	27,874	3,384	87,86	7200	24,482	26,134	2,27	300
B07N150	67,641	6,833	89,9	7200	51,693	52,552	0,72	300
B07N250	254,717	7,316	97,13	7200	128,567	131,970	1,12	300
	Parâmetros do SA			Alfa	SAmáx	T0	TC	TempoMaxSA
				0,975	1000	20000	0,01	300

Para as instâncias utilizadas nesse cenário, o modelo matemático não foi capaz de achar a solução ótima dentro do tempo de execução de duas horas. Portanto, como alternativa para comparação dos resultados, são utilizados os valores de *Upper Bound*, *Lower Bound* e *Gap* obtidos a partir da utilização do algoritmo *branch-and-cut* pelo software de otimização matemática. Isto é, na prática, é possível determinar um limite superior e inferior, representados pelo *Upper Bound* e *Lower Bound* respectivamente, de maneira que a solução ótima se encontre delimitada entre os mesmos. O valor do *Gap* serve como uma medida do progresso para encontrar e provar a otimalidade da solução, sendo na prática uma porcentagem do afastamento entre os limites citados anteriormente. Quando os valores dos limites convergirem e se igualarem, tem-se uma solução ótima e o *Gap* assume o valor 0%.

É possível perceber pelos valores do *Gap* da Tabela 4 que os limites apresentados pelo modelo matemático para o cenário em questão estão longe de convergirem para a otimalidade. Todavia, as soluções apresentadas pelo *Simulated Annealing* estão dentro dos limites encontrados pelo modelo, implicando em uma solução de melhor qualidade do que o modelo matemático é capaz de fornecer.

Como as soluções do *Simulated Annealing* apresentaram desvio pelas circunstâncias descritas no início da seção, as Tabelas 5, 6 e 7 mostram, respectivamente para cada instância, a planilha de cálculo do mesmo.

Tabela 5- Cálculo do desvio para a instância B07N100

Instância B07N100			
Execução	FO	Desvio absoluto	%
1	26.181,843750	47,387500	0,1813
2	24.482,462891	1.651,993359	6,3211
3	27.090,300781	955,844531	3,6574
4	26.179,785156	45,328906	0,1734
5	25.010,167969	1.124,288281	4,3019
6	26.254,320313	119,864063	0,4586
7	25.940,808594	193,647656	0,741
8	26.956,929688	822,473438	3,1471
9	26.777,076172	642,619922	2,4589
10	26.470,867188	336,410938	1,2872
Melhor FO	FO Média	Desvio médio absoluto	%
24.482,462891	26.134,456250	593,985859	2,2728

Tabela 6 - Cálculo do desvio para a instância B07N150

Instância B07N150			
Execução	FO	Desvio absoluto	%
1	52.148,011719	403,931641	0,7686
2	51.974,609375	577,333985	1,0986
3	53.045,230469	493,287109	0,9387
4	52.846,093750	294,150390	0,5597
5	52.613,125000	61,181640	0,1164
6	52.652,164063	100,220703	0,1907
7	52.487,484375	64,458985	0,1227
8	52.831,562500	279,619140	0,5321
9	51.692,742188	859,201172	1,635
10	53.228,410156	676,466796	1,2872
Melhor FO	FO Média	Desvio médio absoluto	%
51.692,742188	52.551,943360	380,985156	0,725

Tabela 7 - Cálculo do desvio para a instância B07N250

Instância B07N250			
Execução	FO	Desvio absoluto	%
1	131.923,187500	46,546094	0,0353
2	131.496,078125	473,655469	0,3589
3	130.875,273438	1.094,460156	0,8293
4	134.715,171875	2.745,438281	2,0804
5	134.663,093750	2.693,360156	2,0409
6	128.563,617188	3.406,116406	2,581
7	133.908,296875	1.938,563281	1,4689
8	131.424,656250	545,077344	0,413
9	130.733,664063	1.236,069531	0,9366
10	131.394,296875	575,436719	0,436
Melhor FO	FO Média	Desvio médio absoluto	%
128.563,617188	131.969,733594	1.475,472344	1,118

A análise do cenário de expansão das operações do Complexo Portuário de Tubarão foi realizada da mesma maneira que no cenário atual deste. Os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados do Cenário de expansão das operações do Complexo Portuário de Tubarão

Instâncias	CPLEX				Simulated Annealing			
	Upper Bound (10 ³)	Lower Bound (10 ³)	Gap (%)	Tempo de Execução (s)	Melhor Solução (10 ³)	Média (10 ³)	Desvio (%)	Tempo de Execução (s)
B11N100	6,791	1,447	78,69	7200	5,060	5,279	2,79	300
B11N150	53,734	2,173	95,96	7200	12,148	12,796	3,06	300
B11N250	287,973	3,740	98,7	7200	30,232	32,206	3,79	300
	Parâmetros do SA			Alfa	SAMax	T0	TC	TempoMaxSA
				0,975	1000	20000	0,01	300

Para as instâncias utilizadas nesse cenário, novamente o modelo matemático não foi capaz de achar a solução ótima dentro do tempo de execução de duas horas. Tal qual no cenário anterior, as soluções apresentadas pelo *Simulated Annealing* estão dentro dos limites encontrados pelo modelo, e os valores do *Gap* permanecem bastante elevados. Assim, o modelo matemático continua sendo ineficaz em

apresentar uma solução de qualidade, e o *Simulated Annealing* consegue suprir essa deficiência.

As Tabelas 9, 10 e 11 mostram, respectivamente para cada instância, a planilha de cálculo do desvio para o cenário de expansão.

Tabela 9 - Cálculo do desvio para a instância B11N100

Instância B11N100			
Execução	FO	Desvio absoluto	%
1	5.059,720215	218,997949	4,1487
2	5.137,585938	141,132226	2,6736
3	5.291,149902	12,431738	0,2355
4	5.069,862793	208,855371	3,9566
5	5.276,197266	2,520898	0,0478
6	5.554,544434	275,826270	5,2253
7	5.499,038574	220,320410	4,1737
8	5.311,030762	32,312598	0,6121
9	5.114,831543	163,886621	3,1047
10	5.473,220215	194,502051	3,6846
Melhor FO	FO Média	Desvio médio absoluto	%
5.059,720215	5.278,718164	147,078613	2,7863

Tabela 10 - Cálculo do desvio para a instância B11N150

Instância B11N150			
Execução	FO	Desvio absoluto	%
1	12.688,970703	107,242969	0,8381
2	12.373,666992	422,546680	3,3021
3	13.443,943359	647,729687	5,0619
4	12.147,893555	648,320117	5,0665
5	13.222,618164	426,404492	3,3323
6	12.961,336914	165,123242	1,2904
7	12.518,616211	277,597461	2,1694
8	12.651,589844	144,623828	1,1302
9	13.514,185547	717,971875	5,6108
10	12.439,315430	356,898242	2,7891
Melhor FO	FO Média	Desvio médio absoluto	%
12.147,893555	12.796,213672	391,445859	3,0591

Tabela 11 - Cálculo do desvio para a instância B11N250

Instância B11N250			
Execução	FO	Desvio absoluto	%
1	35.515,964844	3.309,904883	10,277
2	32.468,533203	262,473242	0,815
3	31.196,269531	1.009,790430	3,1354
4	32.545,822266	339,762305	1,055
5	31.800,318359	405,741602	1,2598
6	30.232,492188	1.973,567773	6,1279
7	33.003,425781	797,365820	2,4758
8	30.851,802734	1.354,257227	4,205
9	30.851,802734	1.354,257227	4,205
10	33.594,167969	1.388,108008	4,3101
Melhor FO	FO Média	Desvio médio absoluto	%
30.232,492188	32.206,059961	1.219,522852	3,7866

É importante notar que, tanto para o cenário atual como o de expansão das operações do Complexo Portuário de Tubarão, os parâmetros do SA não foram modificados. A situação ideal seria a de ajustar a escolha dos parâmetros para cada instância, de maneira que a solução encontrada em cada uma delas pudesse ser melhorada. Outro aspecto importante é que os desvios apresentados pelas instâncias são influenciados diretamente pelos parâmetros do SA. Portanto, alguns desvios que se sobressaíram provavelmente poderiam ter sido minimizados caso um ajuste preliminar dos parâmetros fosse realizado.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho buscou resolver o Problema de Alocação de Berços para Múltiplas Cargas com Restrições Temporais e Espaciais, utilizando-se a metaheurística *Simulated Annealing*.

Visto que os modelos matemáticos propostos para resolver os problemas de alocação de berços em suas variações não são capazes de apresentar soluções ótimas, de maneira eficiente, para instâncias de maior tamanho, a utilização de técnicas heurísticas é tida como um caminho natural para se conseguir soluções próximas da ótima em tempos de execução comparativamente baixos.

Pela simplicidade de aplicação do método e robustez, o *Simulated Annealing* continua sendo uma escolha bastante viável para a resolução do problema de alocação de berços. Os resultados mostram claramente o potencial da abordagem apresentada, na qual soluções de alta qualidade são obtidas para instâncias relativamente grandes e em tempos de execução comparativamente baixos. Tais soluções propiciam reduções de custos, uma vez que há diminuição do tempo em que os navios permanecem no porto e, sobremaneira, há a geração de resultados financeiros positivos para a empresa.

Espera-se que este trabalho tenha contribuído para evidenciar a importância de um agendamento eficaz da atracação de navios em portos, e que o escasso estudo do PAB-MC possa ser considerado como um ponto motivador de trabalhos futuros.

Sugere-se como continuidade deste trabalho a utilização de outras metaheurísticas na resolução do PAB-MC, de maneira que se possa comparar o desempenho entre tais métodos com o *Simulated Annealing*.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTAQ. Boletim anual de movimentação de cargas. 2013. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/Portal/Anuarios/Anuario2013/Tabelas/AnaliseMovimentacaoPortuaria.pdf>>. Acesso em: Julho de 2014.

ANTAQ. Glossário de termos aquaviários. 2011. Disponível em: <http://www.antaq.gov.br/portal/PDF/Glossario_ANTAQ_marco_2011.pdf>. Acesso em: Julho de 2014.

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 survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, v. 202, n. 3, p. 615-627, 2010.

BUHRKAL, K.; ZUGLIAN, S.; ROPKE, S.; LARSEN, J.; LUSBY, R. Models for the discrete berth allocation problem: A computational comparison. *Transportation Research Part E*, v. 47, p. 461-473, 2011.

CORDEAU, J. F.; LAPORTE, G.; LEGATO, P.; MOCCIA, L. Models and tabu search heuristics for the berth-allocation problem. *Transportation Science*, v.39, n.4, p. 526-538, 2005.

DRAGOVIC, B.; PARK, N. K.; RADMILOVIC, Z. Ship-berth link performance evaluation: simulation and analytical approaches. *Maritime Policy & Management*, v. 33, n. 3, p. 281-299, 2006.

EDMOND, E. D.; MAGGS, R. P. How useful are queue models in port investment decisions for container berths? *Journal of the Operational Research Society*, v. 29, p.741-750, 1978.

GOLIAS, M. M. The discrete and continuous berth allocation problem: Models and algorithms. Dissertação (Doctor of Philosophy Graduate Program in Civil and Environmental Engineering). The State University of New Jersey, New Brunswick, 2007.

GUAN, Y.; XIAO, W. Q.; CHEUNG, R. K.; Li, C. L. A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: heuristic and worst case analysis. *Operations Research Letters*, v. 30, p. 343-350, 2002.

HANSEN, P. ; OGUZ, C.; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search for minimum cost berth allocation. *European Journal of Operational Research*, v. 191, p. 636-649, 2008.

Henderson, D., Jacobson, S.H., Johnson, A.W. *The Theory and Practice of Simulated Annealing*. In: *Handbook on Metaheuristics*. GLOVER, F.; KOCHENBERGER, G.(Eds.), Kluwer Academic Publishers, Norwell, Massachusetts, p. 287-319, 2003.

HENDERSON, D.; JACOBSON, S. H.; JACOBSON, A.W. The theory and practice of simulated annealing, *Handbook of Metaheuristics* 57 (2003) 287-320.

IMAI, A.; CHEN, H. C.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. The simultaneous berth and quay crane allocation problem. *Transportation Research Part E*, v. 44, p.900-920, 2008.

IMAI, A.; NAGAIWA, K.; TAT, C. W. Efficient planning of berth allocation for container terminals in Asia. *Journal of Advanced Transportation*, v. 31, p. 75-94, 1997.

IMAI, A.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. The dynamic berth allocation problem for a container port. *Transportation Research Part B*, v. 35, n. 4, p. 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*, v. 39, n. 3, p. 199–221, 2005.

KIM, K. H.; MOON, K.C. Berth scheduling by simulated annealing. *Transportation Research Part B*, v. 37, p. 541-560, 2003.

KIRKPATRICK, S.; GELATT JR, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, v. 220, n. 4598, p. 671-680, 1983.

LAI, K. K.; SHIH, K. A study of container berth allocation. *Journal of Advanced Transportation*, v. 26, p. 45-60, 1992.

LEGATO P.; MAZZA R. M. Berth planning and resources optimization at a container terminal via discrete event simulation. *European Journal of Operational Research*, v. 133, p. 537-547, 2001.

LI, C-L.; CAI, X.; LEE, C-Y. Scheduling with multiple-job-on-one-processor pattern. *IIE Transactions*, v. 30, p. 433-445, 1998.

LIANG, C.; HUANG, Y.; YANG, Y. A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning. *Computers & Industrial Engineering*, v. 56, p. 1021-1028, 2009.

LIM, A. The berth planning problem. *Operations Research Letters*, v. 22, p. 105-110, 1998.

LUKE, S. *Essentials of Metaheuristics*, 2 Ed. 2013. Disponível em: <<http://cs.gmu.edu/~sean/book/metaheuristics/>>. Acesso em: Julho de 2014.

MAURI, G. R. Novas abordagens para representação e obtenção de limitantes e soluções para alguns problemas de otimização combinatória. Tese (Doutorado em Computação Aplicada), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2008a.

MAURI, G. R. Novas abordagens para representação e obtenção de limitantes e soluções para alguns problemas de otimização combinatória. Tese (Doutorado em Computação Aplicada), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2008a.

MAURI, G. R.; OLIVEIRA, A. C. M.; LORENA, L. A. N. A hybrid column generation approach for the berth allocation problem. In: VAN EMERT, J.; COTTA, C. (Eds.), *EvoCOP 2008, Lecture Notes in Computer Science*, v. 4972, p. 110-122, Springer, 2008c.

MAURI, G. R.; OLIVEIRA, A. C. M.; LORENA, L. A. N. Heurística baseada no Simulated Annealing aplicada ao problema de alocação de berços. *GEPROS - Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, Ano 3, v. 1, n. 1, p. 113-127, 2008b.

MEISEL, F.; BIERWIRTH, C. Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem. *Transportation Research Part E*, v. 45, p. 196-209, 2009.

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER, A. H.; TELLER, E. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics*, v. 21, n. 6, p. 1087-1092, 1953.

MONACO, M. F.; SAMMARRA, M. The berth allocation problem: A Strong formulation solved by a lagrangean approach. *Transportation Science*, v. 41, n. 2, p. 265-280, 2007.

MOORTHY, R.; TEO, C.P. Berth management in container terminal: the template design problem. *OR Spectrum*, v. 28, n. 4, p. 495-518, 2006.

NIKOLAOU, N.S. Berth planning by evaluation of congestion and cost. *Journal of Waterways Highways Div. Proc. Am. Soc. Civ. Engrs.*, v. 93, p. 107-132, 1967.

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

OLIVEIRA, R. M.; MAURI, G. R.; LORENA, L. A. N. Clustering search heuristics for solving a continuous berth allocation problem. *Lecture Notes in Computer Science*, v. 7245, p. 49-62, 2012.

PARK, K. T.; KIM, K. H. Berth scheduling for container terminals by using a sub-gradient optimization technique. *Journal of the Operational Research Society*, v. 53, p. 1054-1062, 2002.

PARK, Y. M.; KIM, H. K. A scheduling method for berth and quay cranes. *Operations Research Spectrum*, v. 25, p. 1-23, 2003.

RODRIGUES, M. H. P.; MACHADO, C. M. S.; LIMA, M. L. P. Simulated annealing aplicado ao problema de alocação de berços. *Journal of Transport Literature*, v. 7, n. 3, p. 117-136, 2013.

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: CNT Confederação Nacional do Transporte. (Org.). *Transporte em Transformação XVII*. 1ed. Brasília: Positiva, 2013, v. 1, p. 133-150.

ROSA, R. A. Portos Conceitos Essenciais Uma visão histórica e técnica. Vitória: Instituto Histórico e Geográfico do Espírito Santo, 2006.

SABRIA, F.; DAGANZO, F.C. Approximate Expressions for Queueing Systems with Schedule Arrivals and an Established Service Order. *Transportation Science*, v. 23, n. 3, p. 159-165, 1989.

SINDAMARES. Administração do Complexo Portuário de Tubarão e Praia Mole (TPM). 2013. Disponível em: <<http://www.sindamares.com.br/tubarao.html>>. Acesso em: Julho de 2014.

TING, C. J.; LIN, S. W.; WU, K. C. The Continuous Berth Allocation Problem by Simulated Annealing, In: *APIEMS Conference 2013 Proceedings*, Cebu, Philippines, 2013.

TONG, C. J. ; LAU, H. C.; LIM, A. Ant colony optimization for the ship berthing problem. In: *THIAGARAJAN, P.S.; Yap, R. (Eds.), Fifth Asian Computing Science Conference (ASIAN'99)*, Lecture Notes in Computer Science, v.1742, p. 359-370, Springer, 1999.

UNCTAD. Port development: a handbook for planners in developing countries, Nova York: Ed. UNCTAD, 1985.

XU, Y.; CHEN, Q.; QUAN, X. Robust berth scheduling with uncertain vessel delay and handling time. *Annals of Operations Research*, v. 192, n.1, p. 123-140, 2012.