

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA**

**SIMULATED ANNEALING: UMA PROPOSTA DE RESOLUÇÃO PARA
O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS EM TERMINAIS DE
CONTÊINERES**

MERHY HELI PAIVA RODRIGUES

Dissertação apresentada à Comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Milton Luiz Paiva de Lima,
Dr. Engenharia de Produção.
Co - Orientadora: Catia Maria dos Santos Machado,
Dr^a. Engenharia de Produção

Rio Grande, maio de 2012.

SIMULATED ANNEALING: UMA PROPOSTA DE RESOLUÇÃO PARA O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS EM TERMINAIS DE CONTÊINERES

MERHY HELI PAIVA RODRIGUES

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA OCEÂNICA

tendo sido aprovada em sua forma final pela Comissão de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica.

Prof. Dr. José Antônio Scotti Fontoura
Coordenador da Comissão de Curso

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Milton L. Paiva de Lima
Orientador - FURG

Prof^ª. Dr^ª. Catia M. dos Santos Machado
Co-Orientadora - FURG

Prof. Dr. Mario Rocha Retamoso
FURG

Prof^ª. Dr^ª. Andrea Cristina Konrath
UFSC

A minha mãe e ao meu pai.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe e ao meu pai, pelo amor, carinho, dedicação, por darem suporte na trajetória da vida, pelo incentivo e principalmente por estarem sempre ao meu lado nos melhores e piores momentos.

Ao meu marido, meu irmão e minha irmã pelo amor, carinho, apoio e incentivo.

Ao orientador Professor Dr. Milton Lima, pelo apoio e por acreditar neste trabalho.

À co-orientadora Professora Dr^a. Catia Machado, pela especial atenção dada na elaboração deste estudo, mostrando o caminho do trabalho e estando sempre disponível para auxiliar, pela diversidade de conhecimentos transmitidos, pela orientação e apoio contínuo na realização deste trabalho.

Às secretárias Nilza e Livian pelo bom tratamento e disponibilidade de resolver os pedidos solicitados.

Ao Tiago Klug pelo desenvolvimento do software e Elizangela Pereira que de alguma maneira contribuiu na realização deste estudo.

Aos colegas de aula e professores, que me apoiaram, ensinaram e contribuíram para minha formação.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um modelo discreto para um dos problemas presentes no setor portuário, Problema de Alocação de Berços, no qual aborda a programação e a alocação de navios às áreas de atracação ao longo de um cais, minimizando assim o tempo de espera dos navios em fila. A metodologia utilizada para solucionar o Problema de Alocação de Berços é baseada na técnica e na implementação da heurística Simulated Annealing, uma estratégia de busca que incorpora mecanismos que possibilitam sair de ótimos locais, permitindo a busca de soluções em regiões mais promissoras. Um software foi desenvolvido para analisar a programação de alocação dos navios aos berços e avaliar o sistema total de custos dos navios em fila. O algoritmo Simulated Annealing é uma ferramenta eficaz e de fácil implementação, para o desenvolvimento do software, proporcionando uma fácil manipulação com a possibilidade de gerar relatórios para acompanhar como a programação é realizada. Os resultados obtidos através dos cenários realizados atestam a eficácia do algoritmo bem como a aplicabilidade do modelo a situações reais.

Palavras Chaves: simulated annealing, problema de alocação de berços, porto, heurística.

ABSTRACT

This paper presents a discrete model for one of the problems present in the port sector, Allocation Problem Berth, which covers the programming and allocation of ships to berthing areas along a quay, thus minimizing the waiting time for ships in a row. The methodology used to solve the Problem Berth Allocation is based on technical and implementation of heuristic Simulated Annealing, a search strategy that incorporates mechanisms to enable out of local optima, allowing the search for solutions in the most promising regions. A software was developed to analyze the schedule of allocation of ships to berths and evaluate the total system cost of ships in queue. The Simulated Annealing algorithm is an effective tool and easy to implement for software development, providing easy handling with the ability to generate reports to track how the programming is done. The results achieved through the scenarios demonstrates the effectiveness of the algorithm as well as the applicability of the model to real situations.

Keywords: simulated annealing, berth allocation problem, port, heuristic.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	x
LISTA DE ABREVIATURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE FIGURAS	xii
CAPÍTULO 1	
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 Objetivo Geral.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	
1.3 IMPORTÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO.....	3
1.4 LIMITAÇÕES.....	4
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
CAPÍTULO 2	
2. TRANSPORTE MARÍTIMO E O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS.	5
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	5
2.2 PORTOS.....	6
2.3 TERMINAIS DE CONTÊINERES.....	8
2.4 PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS.....	10
CAPÍTULO 3	
3. REVISÃO DA LITERATURA E MODELAGEM DO PROBLEMA.....	14
3.1 VISÃO GERAL DOS MÉTODOS UTILIZADOS NA RESOLUÇÃO DO PAB.....	14
3.2 MODELAGEM E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.....	17
CAPÍTULO 4	
4. OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA E SIMULATED ANNEALING.....	21
4.1 OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA.....	21

4.1.1 Métodos de Otimização.....	22
4.1.2 Heurísticas e Meta-Heurísticas.....	23
4.1.2.1 Algoritmo Genético.....	24
4.1.2.2 Geração de Colunas.....	25
4.1.2.3 Busca Tabu.....	25
4.1.2.4 Clustering Search.....	26
4.1.2.5 GRASP.....	27
4.2 SIMULATED ANNEALING.....	27
4.2.1 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO.....	30
 CAPÍTULO 5	
5. CONTEXTUALIZAÇÃO DO LOCAL DE APLICAÇÃO E A METODOLOGIA SA.....	33
5.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO LOCAL DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ...	33
5.1.1 Porto do Rio Grande.....	33
5.1.2 Terminal Portuário Tecon.....	38
5.2 SIMULATED ANNEALING APLICADO AO PAB.....	41
5.2.1 MODELO PROPOSTO.....	41
5.2.1.1 Solução Inicial.....	42
5.2.1.2 Estrutura de Vizinhança.....	43
5.2.1.3 Reaquecimento.....	46
 CAPÍTULO 6	
6. INTERFACE DO SOFTWARE E EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS.....	47
6.1 INTERFACE DO SOFTWARE.....	47
6.2 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS.....	52
 CAPÍTULO 7	
7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	57
7.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES.....	57
7.2 TRABALHOS FUTUROS.....	58
 ANEXOS	59

ANEXO A – Relatório do Software.....	59
A.1 Lista Prevista da Chegada dos Navios.....	59
A.2 Lista dos Berços.....	59
A.3 Resumo das opções selecionadas e do método.....	60
A.4 Programação de Alocação dos Navios.....	61
A.5 Navios rejeitados e não atendidos.....	62
ANEXO B – Tabela dos dados reais do Terminal de Contêineres Tecon.....	63
ANEXO C – Tabela de dados com as janelas de tempo ajustadas.....	66
ANEXO D – Interface do Software.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

LISTA DE SÍMBOLOS

N	–	Conjunto de navios
M	–	Conjunto de berços
t_i^k	–	Duração do atendimento do navio i no berço k
a_i	–	Horário de chegada do navio i
s^k	–	Horário de abertura do berço k
e^k	–	Horário de fechamento do berço k ;
b_i	–	Horário de término da janela de tempo para o navio i
v_i	–	Valor (custo) do tempo de serviço do navio i
x_{ij}^k	–	Navio j é atendido pelo berço k após o navio i
T_i^k	–	Horário que o navio i atracou no berço k
$T_{o(k)}^k$	–	Horário do primeiro navio que atracou no berço k
$T_{d(k)}^k$	–	Horário do último navio que saiu do berço k
w	–	Coefficiente de Penalização
$\Psi(S)$	–	Vizinhança da solução S

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	–	Algoritmo Genético
ATP	–	Algoritmo de Treinamento Populacional
BT	–	Busca Tabu
CS	–	Clustering Search
FCFS	–	First Come, First Served
GRASP	–	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
PAB	–	Problema de Alocação de Berços
PL	–	Programação Linear
PM	–	Problema Mestre
PPC	–	Problema de Particionamento de Conjuntos
PR	–	Path Relinking
SA	–	Simulated Annealing
VNS	–	Busca em vizinhança variável

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cenários obtidos com o método Simulated Annealing (dados reais).....	53
Tabela 2 – Cenários obtidos com o método Simulated Annealing + Reaquecimento (dados reais).....	53
Tabela 3 – Cenários obtidos com o método Simulated Annealing (janelas ajustadas).....	55
Tabela 4 – Cenários obtidos com o método Simulated Annealing + Reaquecimento (janelas ajustadas).....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Alocação do Tráfego total de um porto aos terminais específicos.....	7
Figura 2.2 – Cenário para o PAB.....	12
Figura 3.1 – Variáveis referentes ao tempo.....	18
Figura 4.1 – Mínimos Locais e Mínimo Global.....	24
Figura 4.2 – Estrutura do algoritmo SA.....	30
Figura 5.1 – Áreas de Operação portuária.....	34
Figura 5.2 – Zona Portuária.....	34
Figura 5.3– Área do Porto Velho.....	35
Figura 5.4 – Porto novo.....	36
Figura 5.5 – Superporto.	36
Figura 5.6 – São José do Norte.	37
Figura 5.7 – Cais Virtual.....	38
Figura 5.8 – Infraestrutura Tecon.	39
Figura 5.9 – Expansão do Tecon Rio Grande.....	40
Figura 5.10 – Movimento Reordenar navios.....	44
Figura 5.11 – Movimento Realocar navios.....	44
Figura 5.12 – Movimento Trocar navios.....	45
Figura 6.1 – Resumo dos Resultados.....	48
Figura 6.2 – Calendário da programação de chegada dos navios previstos.....	49
Figura 6.3– Horário de abertura e fechamento dos berços por dias da semana em um período determinado.	50
Figura 6.4 – Tela correspondente às opções de cálculo na execução do Algoritmo.....	50
Figura 6.5 – Lista das datas dos navios alocados.....	52

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A logística é fundamental no desempenho portuário das exportações brasileiras e torná-la cada vez mais eficiente, reduz custos, tempo de espera e acelera a entrega de produtos. Uma grande porcentagem das operações de comércio internacional vem sendo realizada pelo transporte marítimo, merecendo destaque os volumes transportados pelo modal marítimo. Assim, os portos desempenham um papel importante como elo entre os modais terrestres e marítimos (VIEIRA et al., 2006).

Segundo Goebel (2004), 95% do volume das exportações brasileiras seguem por via marítima. O transporte marítimo é o que movimenta o maior volume de carga ao longo de toda a cadeia de transportes e, conseqüentemente, corresponde à melhor maneira de alcançar economias de escala, quando atividades técnicas, comerciais e industriais adicionais são necessárias.

É de fundamental importância que o porto pratique o marketing e que conheça as necessidades e a sensibilidade dos clientes de cada terminal, sendo assim existe a necessidade de identificar consumidores potenciais e mantê-los satisfeitos. Dentro do cenário portuário o que prevalece é a qualidade, ou seja, melhor serviço com o menor custo permanecerá no mercado. Um porto eficiente é aquele que minimiza a permanência do navio, o tempo de permanência do navio é a soma da espera para atracação, tempo de operação e tempo para liberação do navio (ARRUDA e BASTOS, 2000; KOTLER, 1998).

Lacerda (2004) relata que a crescente eficiência dos terminais portuários tem contribuído para o aumento da demanda por contêineres, além da expansão das exportações.

Para Fleury (1998), nos portos estão as maiores oportunidades para redução dos custos de transporte, também nos portos começam a aparecer resultados em relação às reduções de preços e melhoria dos serviços.

Nesse contexto, o objeto de estudo do trabalho é o Problema de Alocação de Berços (PAB), um dos problemas presentes no sistema portuário, que consiste em atribuir os navios que chegam num terminal portuário, a uma determinada “posição” de atracação disponível ao

longo de um cais (berços). Para Cordeau et al.,(2005) as principais decisões a serem tomadas nesse processo envolvem a escolha de onde e quando os navios deverão atracar.

Diversos estudos e técnicas são encontrados na literatura técnica relacionados ao dimensionamento de berços de atracação compatível com uma demanda esperada de embarcações e também em relação à análise operacional de sistemas portuários. Há estudos que buscam o balanceamento entre o custo operacional dos berços e o custo de espera dos navios (FERNANDES, 2001).

Nos últimos anos a inclusão de ferramentas de otimização em simuladores tem-se tornado tendência. Nessas iniciativas, observa-se a inclusão de algoritmos aproximativos, heurística e meta-heurísticas, bem como o acoplamento de ferramentas de simulação com ferramentas de otimização (CASSEL e VACCARO, 2007).

Pretende-se neste trabalho desenvolver uma ferramenta alternativa para a resolução do PAB, diferenciando-se dos demais estudos encontrados, criando um modelo mais próximo da atividade praticada nos portos. O modelo leva em consideração as seguintes variáveis: conjunto de navios que irá atracar num determinado dia, horário de funcionamento e capacidades de berços disponíveis, duração de atendimento esperado dos navios, horário de término da janela de tempo e o custo de estadia (o custo por unidade de tempo).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Um dos aspectos a ser explorado no que se refere à pesquisa e métodos para a resolução de um dos problemas operacionais de grande importância encontrada no sistema portuário, é o Problema de Alocação de Berços. O objetivo geral deste trabalho é implementar o Algoritmo Simulated Annealing (SA), uma heurística utilizada na resolução do Problema de Alocação de Berços (PAB), bem como avaliar por meio de simulações o comportamento do mesmo. As principais características a serem avaliadas do algoritmo é a minimização do tempo total gasto pelos navios dentro de um Terminal de Contêineres.

1.2.2 Objetivos Específicos

Podem ser destacados como objetivos específicos:

- a) Avaliar a viabilidade do modelo proposto na programação de navios de um Terminal de Contêineres;
- b) Implementar o algoritmo Simulated Annealing (SA);
- c) Desenvolver uma estratégia de programação dos navios aos berços com um período de tempo pré-estabelecido;
- d) Desenvolver um software que possibilite a simulação de diferentes cenários, construídos a partir de situações reais encontradas na programação de navios de um Terminal de Contêineres;
- e) Avaliar a viabilidade da estratégia de solução e o desempenho do algoritmo, através da solução de um conjunto de problemas reais em um Terminal de Contêineres.

1.3 IMPORTÂNCIA E CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

O trabalho tem contribuições importantes no estudo acadêmico em relação a problemas de otimização combinatória, pesquisa operacional que envolve programação e alocação dos navios aos berços. Também contribui com a possibilidade de aplicação direta em casos reais. A movimentação nos portos tem aumentado nos últimos anos, juntamente com a movimentação de cargas e contêineres então investimentos em tecnologia auxiliam na tomada de decisão. Um estudo sobre o modelo e a técnica Simulated Annealing, possibilitou o desenvolvimento de um software que permite a simulação de diferentes cenários, minimizando a sobrestadia e, conseqüentemente a fila de espera, permitindo ainda a melhor alocação de recursos nas operações de carga e descarga que são de fundamental importância para a competitividade de um porto.

1.4 LIMITAÇÕES

Este estudo está limitado ao caso discreto do Problema de Alocação de Berços, um berço pode acomodar apenas um navio por vez.

O modelo estudado não leva em consideração os dias de maré, portanto as atracações não devem ser limitadas a janelas de tempo devido aos efeitos das marés.

O foco deste estudo está em apenas num dos problemas operacionais presentes na gestão portuária, portanto o que se busca é apenas a otimização operacional para um sistema que já esteja em funcionamento.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos, incluindo este introdutório.

No Capítulo 2 é apresentada uma breve descrição da importância do transporte marítimo e da operacionalização dos terminais de contêineres, e o problema de alocação de berços na visão de alguns autores.

No Capítulo 3, uma revisão da literatura a partir dos trabalhos mais importantes e recentes é abordada. A modelagem e a formulação matemática de acordo com os estudos de Cordeau et al. (2005), com o intuito de investigação e compreensão.

O Capítulo 4 apresenta uma breve definição de otimização combinatória, heurística e meta-heurística, e a descrição do Simulated Annealing na forma padrão.

No Capítulo 5 é apresentada a contextualização do local da aplicação, Porto do Rio Grande e Terminal Portuário Tecon, e trata da metodologia utilizada na resolução do problema de alocação de berços, da modelagem matemática, do método proposto e a forma de implementação do Simulated Annealing, baseado nos estudos de Mauri et. al. (2008).

No Capítulo 6 mostra-se a interface do software desenvolvido com o auxílio da linguagem de programação *Delphi*®, a aplicação do modelo, os cenários de estudos e a análise dos resultados.

Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas as considerações finais, conclusões e recomendações para estudos futuros.

2. TRANSPORTE MARÍTIMO E O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS

Este capítulo apresenta uma breve descrição da importância do transporte marítimo e da operacionalização dos terminais de contêineres. Esses terminais são empreendimentos industriais onde grandes atividades acontecem ao mesmo tempo. Dessa forma, o Problema de Alocação de Berços, objeto de estudo deste trabalho, surge da necessidade de investimentos em tecnologia ao carregamento e descarregamento de contêineres, entre os portos e os navios, à vital importância na melhoria contínua em termos de tecnologia e modernização, bem como a valorização do transporte marítimo de cargas.

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O transporte aquaviário é aquele que envolve todos os tipos de transporte efetuado sobre a água e inclui o transporte fluvial e lacustre (aquaviário interior) e o transporte marítimo.

O transporte marítimo pode englobar todo o tipo de cargas desde químicos, combustíveis, alimentos, areias, cereais, minérios, automóveis entre outros.

Da mesma maneira que as cargas são caracterizadas pelas especializações os navios também são, para cada tipo de carga marítima corresponde um navio especializado e específico, isto é, cada navio é construído para determinados produtos, serviços ou funções e rotas de comércio, com o objetivo de que seu desempenho de transporte seja o mais eficiente. De modo geral os navios são classificados de acordo com o tipo de carga a que se destinam: carga geral solta e carga refrigerada, navios neogranéis, de contêineres, de granéis sólidos e de granéis líquidos, há também a movimentação pelos métodos tradicionais ou lift on - lift off e roll on/ roll off (MAGALHÃES, 2011).

Segundo Cecatto (2011), o transporte marítimo é um dos modais mais importantes para a indústria e a logística no Brasil, sua importância está diretamente ligada a

intermodalidade, à geração de novos empregos, ao aumento na movimentação de cargas no país e ao fortalecimento do setor de logística no mercado nacional.

O transporte marítimo corresponde a 80% do comércio mundial de mercadorias e se constitui na “espinha dorsal” da globalização, considerando como uma das partes mais importante do desenvolvimento econômico (MAGALHÃES, 2011).

De acordo com Silva et al. (2008):

Para atender toda a demanda de alguns itens que irão surgir, o transporte marítimo deve concentrar esforços para reparar a deficiência nos transportes que vem se acentuando nas últimas décadas, seja no que se refere à construção de novos portos ou no que tange a restauração dos existentes, à construção de estaleiros, à troca da frota mercante, ao treinamento de mão de obra ou até mesmo à busca da otimização dos atuais sistemas de controle de operação dos portos. Para isso são necessários grandes investimentos com o propósito de reduzir a permanência do navio no porto, de forma a maximizar a sua utilização pelo armador e baratear as operações através da mecanização. Onde os investimentos não ocorrem, a operação de carga e descarga dos navios é lenta, os custos são altos e as perdas são elevadas.

O crescimento mundial exige um aumento do transporte marítimo, a frota mundial de navios aumenta a cada ano. Com isto aumenta a demanda do combustível, o crescimento dos portos e a quantidade de poluentes gerados. O ideal é que o crescimento do transporte não crie impacto ao meio ambiente, gerando, assim, um desenvolvimento sustentável (CISNEROS e BRINATI, 2010).

2.2 PORTOS

Um porto atende, basicamente, dois tipos de clientes: os donos das cargas (embarcadores) e os donos dos navios (armadores). Para os armadores, a escolha de um porto depende de fatores como: localização geográfica; potencial gerador de cargas; conexões intermodais; disponibilidade e eficiência dos serviços portuários; tarifas praticadas; sistemas de informação. Mas para os embarcadores, são considerados fatores como: disponibilidade de serviços de linha regular (abrangência e cobertura); distância do porto aos pontos de origem/destino das cargas; tarifas portuárias; disponibilidade; eficiência dos serviços (VIEIRA et al. , 2006).

Um porto comercial concentra diversos terminais especializados para atender aos diversos fluxos de cargas e passageiros. A Figura 2.1 apresenta de forma esquemática, o

atendimento de um porto aos diversos fluxos especializados de carga, mostrando a alocação do fluxo total do tráfego nos terminais específicos (MAGALHÃES, 2011).

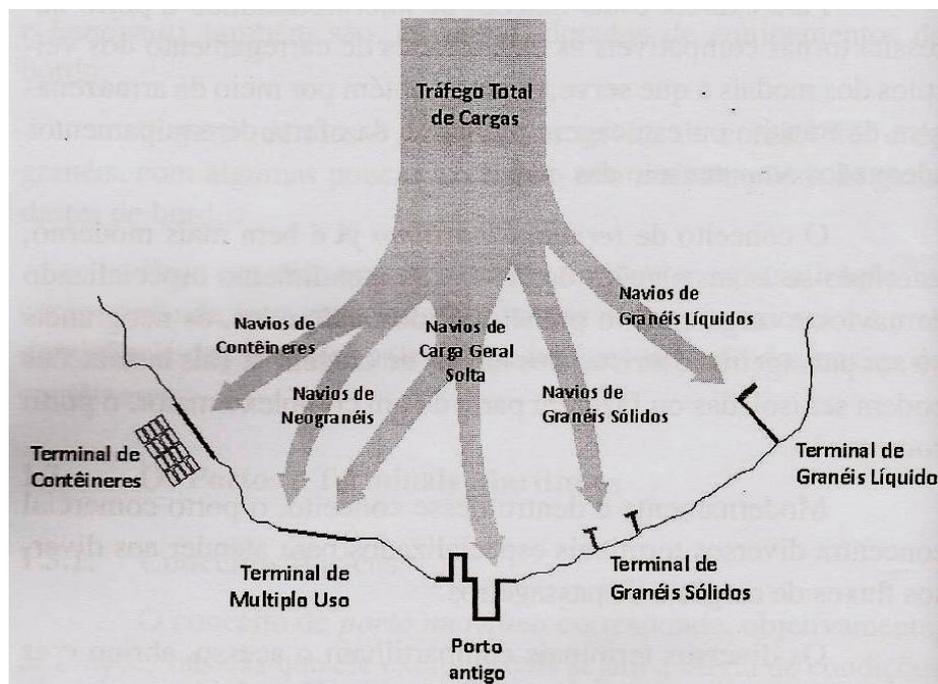


Figura 2.1– Alocação do Tráfego total de um porto aos terminais específicos.

Fonte: Magalhães (2011)

De acordo com um estudo realizado pelo Ipea (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada) em 2010, apesar do Brasil, em 2007, ser responsável da movimentação de aproximadamente 77% do comércio internacional, ainda assim, um dos maiores bloqueios, a expansão do setor portuário nacional, está na deficiência de infraestrutura, sobretudo portuária, que compromete o potencial do setor e representa um entrave ao crescimento do comércio internacional e de cabotagem no país.

Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, para vencer esse problema, faz-se necessária à efetivação de investimentos direcionados a obras portuárias e de acesso, e a equipagem dos portos nacionais.

As operações nos portos brasileiros vêm mantendo ritmo intenso nos últimos anos e novos investimentos tornam-se cada vez mais necessários. Enquanto o setor portuário capta e aplica recursos para modernizar suas instalações e reduzir os gargalos estruturais e operacionais, as empresas de apoio portuário também tentam acompanhar a transformação

pela qual os portos sofrem.

No mercado internacional e mesmo dentro do país, os portos enfrentam também uma competição própria. Cada vez mais os portos organizados têm que disputar seu espaço e, nesta disputa, o acesso e a capacidade operacional e de atracação são alguns dos grandes diferenciais que os portos podem oferecer. Integram o conjunto dos fatores que representam uma maior competitividade para os portos: calados que atendam a navios de grande porte; berços maiores e especializados no tratamento da carga; mecanização e automação do manuseio da carga; e sistemas eficientes de controle e informação. Entre os principais problemas de infraestrutura identificados nos portos brasileiros, destacam-se os déficits em áreas portuárias – incluindo construção, ampliação ou recuperação de berços, píeres, terminais, pátios etc. – e a necessidade de expansão e melhoramento dos acessos terrestres, que juntos são responsáveis por quase 90% do valor orçado para os gargalos (Ipea, 2010).

Atualmente, os portos de maior destaque possuem uma moderna e grande infraestrutura, que envolve maquinários e centros de armazenagem. Roterdã (Holanda) abriga o porto de maior fluxo de mercadorias no mundo. Nos Estados Unidos, os portos de maior relevância são os de New Orleans e Nova York. O Brasil é o principal movimentador de contêineres na costa leste da América Latina.

2.3 TERMINAIS DE CONTÊINERES

Um moderno terminal de contêiner é um empreendimento industrial onde uma grande variedade de atividades acontece ao mesmo tempo. Grandes máquinas movimentando-se em todas as direções, equipamentos levantando e movimentando cargas, navios e veículos chegando e partindo. O principal propósito de toda esta atividade é transferir mercadorias em contêineres, o mais rápido e eficiente possível, entre o interior e o transporte marítimo (BERTOLANI e LEME, 2004).

A containerização, no processo de globalização está proporcionando de modo fundamental o crescimento do comércio internacional, fornecendo segurança, facilidade e custos relativamente baixos de acessos aos mercados em qualquer lugar do mundo (MAGALHÃES, 2011).

A proporção das mercadorias transportadas por meio de contêineres tem crescido continuamente. A introdução de contêineres aumentou a produtividade tanto dos terminais quanto dos navios. O ingresso de contêineres no transporte marítimo de cargas proporcionou crescentes modificações no funcionamento dos terminais portuários nas empresas de navegação. Nos portos, houve forte redução da utilização de mão de obra para manuseio e operações de embarque e desembarque das cargas e redução do tempo necessário para essas operações. As empresas de navegação tornaram-se crescentemente operadoras logísticas, pelas facilidades de intermodalidade proporcionadas pelos contêineres (GOEBEL, 1996).

De acordo com Botter e Patrício (2006), os clientes devem seguir regras de chegada dos navios nos terminais obedecendo aos níveis de planejamento. Os níveis de planejamento e aspectos de tomada de decisão relacionados ao subsistema ou área de operações de navios, na divisão de planejamento de atracação e desatracação podem ser divididos em:

Estratégico: definição da quantidade de berços a serem disponibilizados e tamanho de cais, profundidade e calado de projeto dos berços e forma de construção e projetos de ampliação de cais.

Tático: o acompanhamento do crescimento do calado de navios que operam nos tráfegos atendidos pelo terminal, manutenção da profundidade do berço por meio de acompanhamento dos programas de dragagem alinhados com os dados fornecidos pelos armadores e informações técnicas de projeto.

Operacional: a alocação dos navios aos berços de acordo com as regras de atracação definidas entre o terminal e o armador. Essas regras de atendimento são normalmente FCFS (*First Come, First Served*: Primeiro a Chegar, Primeiro a ser Atendido), contudo o uso de janelas de tempo de atracação é cada vez mais solicitado pelos clientes e fornecido pelos terminais, o que permite melhor organização da distribuição de berços, equipamentos e ternos de trabalho. A área de armazenamento da carga do navio em questão e da ocupação linear de cais dos berços pelos navios em operação deve ser considerada.

Também, deve-se levar em consideração a análise das regras de atracação de chegada dos navios, com um breve conceito de janela de tempo oferecida pelo terminal ao armador, considerando um sistema total de custos dos navios em fila.

Janela de tempo de atracação é um período de tempo em horas oferecido pelo terminal ao armador num determinado dia para que este atraque o seu navio com a garantia de reserva de berço para atracação. Isso garante o pagamento de penalidades pelo terminal caso o navio chegue à janela determinada e não possa atracar em virtude de não haver berço ou espaço de cais disponível.

As situações analisadas nas regras de atracação de chegada dos navios são as seguintes:

O navio chega *antes da janela de tempo* acordada: armador arcará com todos os custos de espera até o início de sua janela de tempo, e o terminal poderá ou não atendê-lo antes do início da sua janela de tempo, dependendo da disponibilidade e da programação de seus berços.

O navio chega *dentro (durante) da janela de tempo*: o terminal deve conceder a atracação imediata do navio em um berço que atenda às suas características de comprimento (LOA: comprimento do casco) e calado. Se não for possível a atracação do navio em virtude de problemas operacionais (exemplos: atraso nas programações do navio atracado, falta de carga no costado, quebra de equipamento de operação de cais ou retaguarda) com os navios anteriores, todos os custos da espera do navio da vez são de responsabilidade do terminal, independente do ocorrido.

O navio chega *após a janela de tempo estipulada*, o terminal está livre das penalidades de espera e atenderá esse navio quando houver espaço na programação dos berços ou for possível violar ou relaxar a fila, isto é, atracar o navio desde que atenda às condições de comprimento de berço e cuja somatória de tempos seja menor ou igual à do navio atracado (BOTTER e PATRÍCIO, 2006).

Segundo Bertolani e Leme (2004), as vantagens da containerização são inúmeras: aumento da eficiência carga/ descarga, maior controle da carga, menores índices de avaria e, conseqüentemente, maior rapidez na entrega. Com a padronização dos contêineres foi possível que o movimento de mercadorias pudesse ser realizado de ponto a ponto, utilizando mais de um meio de transporte, ou seja, a intermodalidade tornando viável o comércio mundial.

2.4 PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE BERÇOS

Segundo Moon (2000) o problema de alocação de berços consiste em determinar o período de acostagem e as posições de cada navio no terminal portuário. Cada embarcação requer uma quantidade específica de espaço no cais durante um período predeterminado de tempo para carregar e descarregar contêineres.

O número de berços dá o número máximo de navios que podem estar atracados em um porto. Por sua vez, a legislação internacional que regulamenta o tráfego marítimo determina que se ao chegar a um porto, na data marcada, não haja berço para atracar, a administração do porto tem que indenizar a companhia, dona do navio, pelo tempo que ele ficar ao largo esperando berço livre para atracar.

Quando, por qualquer motivo, todos os berços de um porto estão ocupados, os navios que chegam formam uma fila aguardando a sua vez, embora nem sempre se perceba, existe embutido um problema econômico. E este problema econômico surge porque em qualquer fila existem dois custos envolvidos: O *Custo da Fila* e o *Custo do Serviço*.

O *Custo do Serviço* é o custo de construir e manter em funcionamento os berços de atracação. Quanto mais berços oferecidos, ou seja, quanto maior o nível de serviço oferecido, maior este custo e o *Custo da Fila* é o custo que a administração do porto tem pelo pagamento das indenizações aos navios que esperam na fila. Este custo é inversamente proporcional ao custo do serviço (número de berços). Se há poucos berços o custo do serviço será pequeno, mas como a fila será grande, o custo da fila será grande. Já se houver muitos berços, o custo do serviço será grande, mas em compensação, como a fila será pequena, o custo da fila será pequeno (OLIVEIRA, 2008).

O Problema de Alocação de Berços (PAB) consistem em atribuir os navios que chegam a um determinado porto para as “posições” de atracações disponíveis ao longo de um cais (berços). Mas enfrentam duas decisões inter-relacionadas: *onde* e *quando* os navios devem atracar. Os navios que chegam ao porto irão atracar no berço mais conveniente, ou em um berço livre que possa recebê-los. Caso não haja berços livres adequados à operação do navio em questão, este navio irá para uma fila de navios aguardando atracação. Deste modo, o tempo que o navio fica aguardando um berço de atracação em fila é o parâmetro que se utiliza como principal nível de serviço na área portuária (FERNANDES, 2001; CORDEAU et al., 2005).

Em relação ao local de atracação, na dimensão espacial, há restrições em relação à profundidade da água e com a distância máxima em relação à localização mais favorável ao longo do cais, calculadas com relação à localização da saída do contêiner e para o espaço reservado para a entrada do contêiner. Na dimensão temporal, as restrições são expressas como janelas de tempo para o tempo de conclusão do serviço do navio. Algumas janelas de tempo são suaves e podem ser relaxadas, com um custo adequado (CORDEAU et al., 2005).

O tempo de atendimento de um navio depende de seu ponto de atracação (berço), e é uma função da distância do berço até a área de carga e descarga de contêineres no pátio do

porto. Esta dependência afeta fortemente o desempenho das operações no porto. O cenário onde ocorre o problema de alocação de berços é ilustrado pela Figura 2.2.

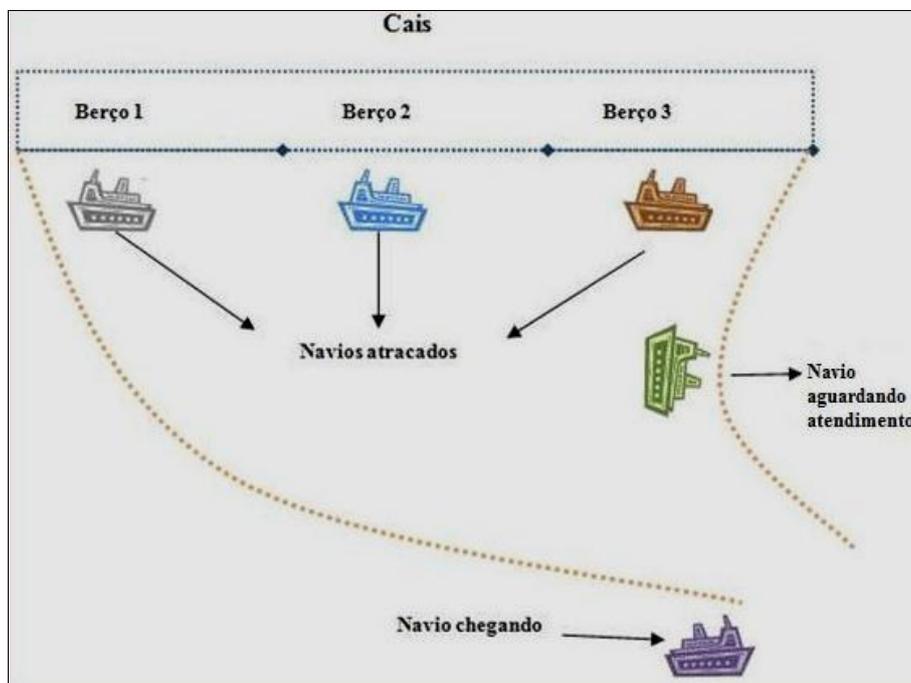


Figura 2.2 – Cenário para o PAB.

Fonte: Adaptado de Mauri (2008)

Para Guan e Cheung (2004) quando não há mais espaço disponível cais, o navio precisa aguardar para atracar, por simplicidade denominam que a soma do tempo de espera e o tempo de processamento (atendimento) de um navio como seu *tempo de fluxo*, o que também é encontrado na literatura como janela de atracação. Janela de atracação são contratos efetuados entre armadores e terminais portuários (privados ou públicos), com objetivo de estabelecer um acordo de tempo, frequência e movimentação de um determinado serviço.

A importância do PAB é aparente com o aumento da frequência de transporte entre terminais de contêineres. Se um número suficiente de berços não pode ser garantido para a entrada dos navios, o tempo desses navios atrasados aumentará o que por sua vez, afetam a eficiência e, conseqüentemente, a produtividade do terminal de contêineres. Isso também afetará a competitividade: se a entrada dos navios necessita de esperar muito tempo, o nível de serviço oferecido a eles não serão suficientes. Daí minimizando o tempo de espera da entrada dos navios é um elemento crucial do PAB. Além disso, a descarga / tempo de carregamento (manipulação tempo) vai influenciar na eficiência do terminal de contêiner. Se

o tempo de tratamento é reduzido, a produtividade no terminal vai aumentar o que irá reforçar o efetivo gerenciamento de custos do terminal contêiner (Hansen et al., 2008).

O objetivo do PAB geralmente é minimizar o tempo total de serviço de todos os navios, com esse intuito este pode ser modelado como um problema discreto se o cais for visto como um conjunto finito de berços. Neste caso, os berços podem ser descritos como segmentos de comprimento fixos, ou, se a dimensão de espaço for ignorada, como pontos. Já os modelos contínuos consideram que os navios podem atracar em qualquer lugar ao longo do cais. O PAB também pode ser tratado de forma estática considerando que todos os navios já estão no porto para serem atendidos ou da forma dinâmica que reflete melhor as situações reais de um porto, considera-se que os navios deverão chegar ao porto ao longo do dia em horários distintos (MAURI, 2008).

3. REVISÃO DA LITERATURA E MODELAGEM DO PROBLEMA

Este capítulo tem como objetivo descrever uma breve revisão da literatura a partir dos trabalhos mais importantes e recentes neste campo, visto que, esse problema começou a ser somente explorado nos últimos anos. Uma razão importante para estudar o problema é apresentar sua modelagem e a formulação matemática de acordo com os estudos de Cordeau et al. (2005) e Mauri et al. (2008), com o intuito da investigação e compreensão da modelagem matemática.

3.1 VISÃO GERAL DOS MÉTODOS UTILIZADOS NA RESOLUÇÃO DO PAB

Imai et al. (1997) propõem uma formulação matemática e uma heurística para o PAB considerando que todos os navios estejam no porto antes da abertura dos berços (PAB estático). Essa abordagem não condiz com a realidade, pois os navios devem chegar em horários diferentes ao longo do dia (PAB dinâmico). Porém, esse trabalho é um dos pioneiros a respeito do PAB.

Em *Imai et al. (2001)* é apresentado uma extensão do trabalho estudado em 1997, que trata o PAB dinâmico. Nesse trabalho, é utilizada uma heurística baseada na Relaxação Lagrangiana para resolver instâncias com 25 e 50 navios e 5, 7 e 10 berços.

Imai et al. (2003) utilizam a mesma heurística apresentada em 2001, porém para uma versão do PAB que considera "prioridades" para o atendimento dos navios. Nessa versão, o problema é modelado como um Problema Quadrático de Atribuição, e um Algoritmo Genético é proposto para resolvê-lo. Os autores utilizam instâncias com 25, 50, 75 e 150 navios e 5 berços.

Kim e Moon (2003) apresentam uma formulação de programação linear inteira mista para o caso contínuo do PAB. Os autores utilizam o solver LINDO e propõem uma heurística

baseada no Simulated Annealing para resolver instâncias reais (de um porto Coreano) com até 40 navios. O LINDO apresenta resultados apenas para as instâncias com até sete navios. Já o SA apresenta boas soluções para todas as instâncias.

Cordeau et al. (2005) apresentam uma heurística baseada na Busca Tabu para resolver duas formulações distintas para os casos discreto e contínuo do PAB. Também são propostas duas heurísticas, uma para resolver o caso contínuo do problema e uma para o caso discreto. Os autores mostram que apenas instâncias de pequeno porte podem ser resolvidas de forma exata, e nesses casos, a Busca Tabu proposta sempre encontra as mesmas soluções (ótimas). Já para instâncias de grande porte, a Busca Tabu sempre apresenta resultados melhores do que uma versão “truncada” de um branch-and-bound aplicado a uma formulação linear. As formulações propostas e a Busca Tabu ainda são capazes de tratar várias características encontradas em problemas reais, como por exemplo, janelas de tempo e berços “favoritos” de atracação. Os métodos propostos são aplicados a um grande conjunto de instâncias, sendo a maioria gerada com base em informações reais do porto de Gioia Tauro - Itália, e 30 delas geradas aleatoriamente, com 60 navios e 13 berços.

Imai et al. (2008) apresentam uma nova formulação para o PAB, dessa vez considerando a possibilidade de utilização de “berços” extras para o atendimento dos navios. Mais uma vez, eles utilizam um AG para resolver o problema. É interessante destacar que vários portos (reais), de várias partes do mundo, são considerados para geração das instâncias utilizadas nesses trabalhos.

Hansen et al. (2008) apresentam uma heurística de busca em vizinhança variável (VNS), uma heurística VNS com inicializações múltiplas (multi-start), um Algoritmo Genético, e um Algoritmo Memético para resolver o caso discreto do PAB. Esses métodos são aplicados a vários conjuntos de instâncias, variando de 50 navios e 5 berços até 200 navios e 20 berços. Os resultados obtidos pelo VNS superam os demais. Para várias dessas instâncias o CPLEX apresentou as soluções ótimas.

Silva et al. (2008) apresenta um estudo acadêmico no qual propõe um modelo heurístico de resolução para o problema de alocação de berços. A heurística proposta baseia-se nos Algoritmos Genéticos e o estudo tem por objetivo implementar uma ferramenta

computacional baseada neste processo para resolver o problema de maneira prática e eficiente.

Mauri et al. (2008) propõem uma abordagem baseada na aplicação do Simulated Annealing para resolução do caso discreto do PAB. Os autores tratam o problema como um Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplas Garagens e Janelas de Tempo (PRVGMJT).

Mauri et al. (2010) tratam o PAB com um método híbrido chamado ATP/PL, que utiliza o Algoritmo de Treinamento Populacional em conjunto com um modelo de Programação Linear por meio da técnica de Geração de Colunas. Os resultados obtidos superam os apresentados em *Mauri et al. (2008)*.

Em *Oliveira et al. (2010)*, o PAB é tratado como dinâmico e modelado como discreto. Para a alternativa de resolvê-lo utilizaram os métodos Clustering Search (CS), utilizando o Simulated Annealing (SA) como gerador de soluções.

Lopes et al. (2011) propõe uma abordagem baseada na aplicação do método Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) de forma integrada com o método Path Relinking (PR) para resolução do PAB.

Vários casos que tratam o PAB em sua versão contínua são apresentados em *Nishimura et al. (2001)*, *Kim e Moon (2003)*, *Imai et al. (2005)*, *Cordeau et al. (2005)*, etc.

Outra abordagem baseada na Relaxação Lagrangiana é apresentada em *Monaco e Sammarra (2007)*. Um modelo de simulação das atividades portuárias é apresentado em *Dragovic et al. (2005)*.

Outros problemas relativos ao gerenciamento portuário são apresentados em *Gunther e Kim (2006)*, *Cordeau et al. (2005)* e *Lee et al. (2008)*. *Vis e Koster (2003)* apresentam uma discussão a respeito desses problemas.

Porém, *Steenken et al. (2004)* apresentam uma classificação dos principais processos e operações presentes em um porto.

3.2 MODELAGEM E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Baseado nos estudos de Legato et al. (2001), o PAB pode ser modelado como um *Problema de Roteamento de Veículos com Garagens Múltiplas e Janelas de Tempo*. Neste trabalho, o PAB é representado inicialmente de acordo com o modelo matemático proposto por Cordeau et al. (2005).

Para uma melhor compreensão do modelo, primeiro, será apresentado o problema clássico de roteamento de veículos (PRV) e o problema de roteamento de veículos com múltiplas garagens (PRVMG).

Formalmente, o problema (PRV) é definido com base em um grafo $G = (V;A)$, onde $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} \cup V_0$ é um conjunto de vértices e $A = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ é um conjunto de arestas. Cada vértice $v_i \in V - V_0$ representa um cliente a ser atendido, sendo que $v_0 \in V_0$ representa a garagem. Por sua vez, cada aresta $(i, j) \in A$ está associada a um custo não negativo c_{ij} , normalmente a distância entre dois vértices. É importante ressaltar que todas as rotas têm garagem (v_0) como ponto de partida e chegada e inclui um subconjunto de arestas de A . Cada cliente tem uma demanda $q \geq 0$ a ser atendida por algum dos r veículos inicialmente estacionados na garagem e só pode ser visitada apenas uma vez. O PRV consiste em determinar um conjunto de rotas de modo a minimizar a soma dos custos atribuídos às arestas de A . Além disso, resalta-se que para cada rota a capacidade Q do veículo associado deve ser respeitada. O problema de roteamento de veículos com múltiplas garagens (PRVMG) é uma generalização do PRV, onde o conjunto de vértices V pode ser definido por $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\} \cup V_0$ onde $V_0 = \{v_{01}, v_{02}, \dots, v_{0g}\}$ são as garagens. Uma rota i pode ser definida por $R_i = \{g, v_1, v_2, \dots, v_n, g\}$ com $g \in V_0$ e $n \leq m$. O custo de uma rota pode ser calculado como o PRV clássico (PERCHÉ et al., 2010).

O modelo é tratado em sua forma discreta e dinâmica, considerando como objetivo principal a minimização do tempo total gasto pelos navios dentro do porto, o que segundo Hansen et al. (2008) é uma função objetivo apropriada para o PAB. Dessa forma, o cais é dividido em um conjunto finito de berços, e a dimensão espacial é ignorada. Na Figura 3.1 observam-se, os tempos descritos para cada navio.

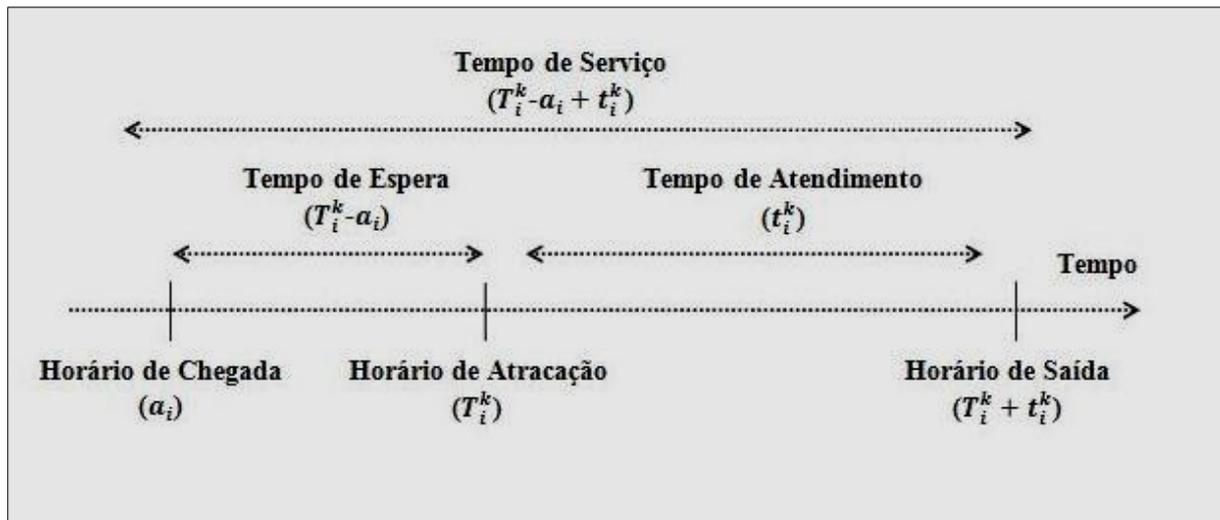


Figura 3.1 – Variáveis referentes ao tempo.

Fonte: Mauri et al. (2008)

Nesse modelo, os navios são tratados como clientes e os berços como garagens (cada uma com seu veículo específico). Existem então m veículos “fictícios” (um para cada garagem), sendo que cada um inicia e termina sua “rota” na sua própria garagem. Os navios são modelados como vértices em um multi-grafo, onde cada garagem (berço) ainda é dividida em um vértice de origem e um de destino. Nos vértices de origem e destino, as janelas de tempo correspondem ao período de funcionamento dos berços.

O modelo então é dado por 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 variáveis e constantes usadas para representar o problema são.

N : conjunto de navios, $n = |N|$;

M : conjunto de berços, $m = |M|$;

t_i^k : duração do atendimento do navio i no berço k ;

a_i : horário de chegada do navio i ;

s^k : horário de abertura do berço k ;

e^k : horário de fechamento do berço k ;

b_i : horário de término da janela de tempo para o navio i ;

v_i : valor (custo) do tempo de serviço do navio i ;

$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \forall k \in M, \forall (i, j) \in A^k, x_{ij}^k = 1$ se o navio j é atendido pelo berço k após o navio i ;

$T_i^k \forall k \in M, i \in N$ é o horário que o navio i atracou no berço k ;

$T_{o(k)}^k \forall k \in M$ é o horário em que o primeiro navio atracou no berço k ;

$T_{d(k)}^k \forall k \in M$ é o horário em que o último navio saiu do berço k ;

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

Cordeau et al. (2005) propôs um modelo que é descrito a seguir.

Minimizar:

$$z = \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} v_i \left[T_i^k - a_i + t_i^k \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k \right] \quad (3.1)$$

Sujeito à:

$$\sum_{k \in M} \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in N \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{0(k)j}^k = 1 \quad \forall k \in M \quad (3.3)$$

$$\sum_{i \in N \cup \{o(k)\}} x_{id(k)}^k = 1 \quad \forall k \in M \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k - \sum_{j \in N \cup \{o(k)\}} x_{ji}^k = 0 \quad \forall k \in M, \quad \forall i \in N \quad (3.5)$$

$$T_i^k + t_i^k - T_j^k \leq (1 - x_{ij}^k) M_{ij}^k \quad \forall k \in M, \forall (i, j) \in A^k \quad (3.6)$$

$$T_i^k \geq a_i \quad \forall k \in M, \forall i \in N \quad (3.7)$$

$$T_i^k + t_i^k - \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k \leq b_i \quad \forall k \in M, \quad \forall i \in N \quad (3.8)$$

$$T_{0(k)}^k \geq s^k \quad \forall k \in M \quad (3.9)$$

$$T_{d(k)}^k \leq e^k \quad \forall k \in M \quad (3.10)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in M, \forall (i, j) \in A^k \quad (3.11)$$

A função objetivo (3.1) 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, considerando um custo de serviço para esse tempo. Quando o navio i não é atribuído ao berço k , o termo correspondente na função objetivo é zero porque $\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k = 0$ e $T_i^k = a_i$, a função é minimizada.

A restrição (3.2) garante que cada navio é atendido por apenas um berço. As restrições (3.3) e (3.4) garantem, respectivamente, que um navio será o primeiro a ser atendido em cada berço, e outro será o último. A restrição (3.5) garante a conservação do fluxo (atendimento) para os demais navios. A restrição (3.6) faz o cálculo do horário de atracação dos navios.

Nessa restrição são considerados apenas os arcos A^k válidos para cada berço k , ou seja, alguns navios não podem ser atendidos em determinados berços, pois, por exemplo, o tipo de equipamento disponível no berço pode não ser apropriado para o atendimento de determinados tipos de carga. A possibilidade de atendimento ou não dos navios pelos berços é determinada através dos dados encontrados nos problemas testes utilizados (o tempo de atendimento é zero). As restrições (3.7) e (3.8) 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 navio (janela de tempo). As restrições (3.9) e (3.10) garantem a não violação das janelas de tempo nos berços. E por fim, a restrição (3.11) garante que as variáveis de decisão sejam binárias.

4. OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA E SIMULATED ANNEALING

Este capítulo apresenta uma breve definição de otimização combinatória, heurística e meta-heurística, também apresenta a descrição do Simulated Annealing na forma padrão. Devido à dificuldade de solução exata dos problemas de otimização combinatória e em especial do problema de alocação de berços, métodos heurísticos vêm sendo desenvolvidos. O algoritmo Simulated Annealing (Recozimento Simulado) consiste numa técnica de busca local probabilística, e fundamenta-se numa analogia com a termodinâmica.

4.1 OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA

A otimização é uma área da Pesquisa Operacional que utiliza o método científico para apoiar a tomada de decisões, procurando determinar como melhor projetar e operar um sistema que trabalha com modelos determinísticos e as informações relevantes são assumidas como conhecidas (sem incertezas).

Em um problema de otimização tem-se uma função objetivo e um conjunto de restrições, ambos relacionados às variáveis de decisão. Os valores possíveis às variáveis de decisão são delimitados pelas restrições impostas sobre essas variáveis, formando um conjunto discreto (finito ou não) de soluções factíveis a um problema.

Problemas de Otimização Combinatória aparecem quando é necessário selecionar um conjunto discreto e finito de dados, o melhor subconjunto que satisfaz a determinados critérios. O conjunto de soluções viáveis para o problema, embora seja finito, pode ser muito grande. Isso inviabiliza estratégias de força bruta, como testar todos os valores de solução possíveis, tornando necessário o desenvolvimento de métodos eficientes.

Os problemas podem ser modelados como problemas de maximizar (ou minimizar) uma função cujas variáveis estão sujeitas a certas restrições (CHAVES, 2009).

Esses problemas podem ser divididos em três categorias: aqueles cujas variáveis assumem valores reais (ou contínuos), aqueles cujas variáveis assumem valores discretos (ou inteiros) e aqueles em que há variáveis inteiras e contínuas, classificados, respectivamente,

como problemas de Otimização Contínua, Otimização Combinatória ou Discreta, e Otimização Mista (BECCENERI, 2008).

O grande desafio da Otimização Combinatória é produzir, em tempo competitivo, soluções tão próximas quanto possíveis da solução ótima (CHAVES, 2009).

4.1.1 Métodos de Otimização

Uma forma de solucionar problemas de otimização combinatória seria simplesmente enumerar todas as soluções possíveis e conservar aquela de melhor valor da função objetivo. Mas, este método torna-se inexecutável para problemas reais, pois, para a maioria dos problemas, o número de soluções possíveis cresce exponencialmente em função do tamanho do problema. Portanto, técnicas mais eficientes são necessárias. Um exemplo da explosão combinatória em problemas reais pode ser visto no Problema do Caixeiro Viajante, um dos problemas mais estudados na literatura.

Para Chaves (2009a): *Os métodos de otimização procuram acrescentar um pouco de "inteligência" ao processo de enumeração, reduzindo assim o número de soluções a analisar no espaço de busca e possibilitando a resolução de problemas de dimensões mais elevadas.*

Segundo Chaves (2009), o método de otimização pode ser dividido em:

a) **Programação matemática**

Fundamentação na matemática.

Vantagem: garantem a solução ótima.

Desvantagens: modelagem mais complexa; podem gastar um tempo proibitivo para gerar a solução ótima; nem sempre conseguem produzir uma (boa) solução viável rapidamente.

b) **Heurísticas**

Fundamentação: na Inteligência Artificial

Vantagens: de fácil implementação; produzem boas soluções rapidamente.

Desvantagem: não garantem a otimalidade da solução obtida.

4.1.2 Heurísticas e Meta-Heurísticas

Em otimização, heurísticas são definidas como sendo uma técnica que procura *boas soluções* (próximas da otimalidade) a um custo computacional razoável, sem, no entanto, estar capacitada a garantir a otimalidade, bem como garantir quão próxima uma determinada solução está da solução ótima. A grande desvantagem das heurísticas reside na dificuldade de escapar de ótimos locais, o que deu origem à outra metodologia, chamada de *meta-heurística*, que possui ferramentas que possibilitam sair destes ótimos locais, permitindo a busca em regiões mais promissoras (CHAVES, 2009).

Para Foulds (1984), heurística, significa descobrir, é o termo utilizado para descrever um método que, baseado na experiência ou julgamento, parece conduzir a uma boa solução de um problema, mas que não garante produzir uma solução ótima. Segundo Becceneri (2008), o termo heurística pode estar associado a um conhecimento circunstancial, não verificável, nem matematicamente verificável. Já o termo meta-heurística possui o prefixo meta que significa *após*, indicando um nível superior de descoberta. Muitas são as definições que aparecem para o termo meta-heurística. Uma meta-heurística pode ser vista como uma ferramenta algorítmica que utiliza mecanismos inteligentes que exploram eficientemente o espaço das soluções viáveis de determinado problema, cada uma utilizando um determinado tipo de estratégia.

O sucesso de uma heurística depende de sua capacidade de: adaptação a instâncias especiais; escapar de ótimos locais; fazer uso da estrutura do problema; estrutura eficiente de dados; pré-processamento; boas técnicas para construir soluções iniciais; reinicializar procedimentos; melhoria de solução através de busca local; randomização controlada; diversificação de busca quando nenhuma melhoria adicional parece possível; intensificação da busca em regiões promissoras (NORONHA, 2001).

De acordo com Becceneri (2008), a grande importância na aplicabilidade de uma meta-heurística é o balanço dinâmico entre diversificação e intensificação, fazendo uma distinção entre os termos ingleses *exploration* e *exploitation*. O primeiro pode-se traduzir por *diversificação*, *exploração diversificada*, *busca em largura* ou simplesmente *exploração*; o segundo por *exploração focada*, *busca em profundidade* ou *intensificação*. Um dos desafios na aplicação de uma meta-heurística é encontrar o equilíbrio ideal entre diversificação e intensificação.

A estratégia de uma meta-heurística é escapar dos mínimos locais a fim de proceder a exploração do espaço de busca por soluções ainda melhores. Na Figura 4.1, os pontos *a* e *b* podem ser considerados mínimos locais e o ponto *c*, mínimo global entre os pontos *x* e *y*.



Figura 4.1 – Mínimos Locais e Mínimo Global.

Fonte Becceneri (2008)

A seguir serão dispostas informações de algumas heurísticas que podem ser adaptadas ao problema de alocação de berços.

4.1.2.1 Algoritmo Genético

Em analogia com o sistema biológico, cada candidato a solução do problema representa um cromossomo ou indivíduo da população, que é o conjunto de todos esses candidatos. Cada indivíduo da população pode ser representado no AG por um conjunto binário (0 e 1), por números inteiros, por números de ponto flutuante, ou por caracteres. Esses indivíduos ainda têm um custo associado, que determina sua habilidade para sobreviver e produzir descendentes no processo de seleção natural. Para melhorar o custo ou a aptidão dos indivíduos das populações sucessivas são necessários os operadores genéticos. Esses operadores permitem selecionar indivíduos mais aptos à sobrevivência para reprodução, além

de manter as características de adaptação adquiridas pelas gerações passadas, criando indivíduos cada vez mais aptos (MAURI, 2008).

4.1.2.2 Geração de Colunas

A Geração de Colunas é uma técnica baseada na ideia de resolver um problema de PL (Programação Linear) através da adição de variáveis (colunas) durante a fase de pricing do método Simplex. Nessa técnica, um Problema Mestre (PM) permite a seleção de um melhor subconjunto de colunas (i.e. variáveis de decisão) e é resolvido por uma formulação de PL do problema. Esse problema, por sua vez, tem seu próprio modelo, baseado frequentemente em um modelo de cobertura ou particionamento de conjuntos com restrições adicionais, como por exemplo, restrições básicas de cobertura e restrições globais, como o número de recursos disponíveis (veículos, tripulações, caminhões, etc.) (LAGRÉZE e LEBBAR, 2000, p. 429-466 apud MAURI, 2008, p.37).

Em Mauri et al. (2010) o PAB é modelado como um Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplas Garagens e Janelas de Tempo, e para resolvê-lo, é utilizado um método ATP/PL. O método consiste na aplicação do Algoritmo de Treinamento Populacional (ATP) juntamente com a Programação Linear (PL) para Geração de Colunas. Estes métodos são aplicados de maneira interativa, onde o ATP, através de informações da relaxação da PL, é responsável pela geração de boas colunas, e a PL pela resolução de um Problema de Particionamento de Conjuntos, com uma restrição adicional (PPC+), formado por essas colunas.

4.1.2.3 Busca Tabu

Tabu Search (Busca Tabu – BT) é um procedimento que restringe a busca e procura por otimalidades locais, armazenando a história da busca em memória. Ela proíbe (faz tabu) movimentos na vizinhança com certos atributos, com o objetivo de guiar o processo de busca para além de soluções que (baseadas em informações disponíveis) tenham duplicidade ou assemelhem-se a soluções previamente armazenadas/obtidas. A função de curta duração da memória permite “esquecimentos estratégicos“, para apenas executar os t mais recentes

movimentos tabu. Entretanto o estado tabu de um movimento não é absoluto. O critério de aspiração leva um movimento tabu a ser selecionado se apresentar certo nível de qualidade. Memórias de média e longa duração também podem ser aplicadas a fim de promover explorações mais amplas do espaço de busca. Estratégias imediatas ou de média tendência são baseadas na modificação das regras de escolha para encorajar movimentos e soluções historicamente tidas boas, retornando para espaços atrativos do domínio da busca e intensificando a procura nestas regiões. Métodos longos diversificam a busca em áreas ainda não exploradas, podendo se basear na modificação de regras para incorporar atributos na solução que não é frequentemente utilizada (JAIN E MEERAN, 1998, 48p. apud BRANCO, 2010, p. 83).

4.1.2.4 Clustering Search

Segundo Chaves (2009a) o Clustering Search (CS) procura dividir o espaço de busca e localizar regiões promissoras por meio do enquadramento dessas em clusters. Para os fins do CS, um cluster pode ser definido por três atributos $C = (c; v; r)$. O centro c_i é uma solução que representa o cluster C_i , identificando a sua localização dentro do espaço de busca. Ao invés de armazenar todas as soluções agrupadas no cluster, apenas parte das informações destas soluções são inseridas no centro do cluster. O volume v_i é a quantidade de soluções agrupadas no cluster C_i . Um cluster se torna promissor quando o volume atingir certo limitante λ . O índice de ineficácia r_i é uma variável de controle para identificar se a busca local está ou não melhorando o centro do cluster C_i . O valor de r_i indica o número de vezes consecutivas que a busca local foi aplicada no cluster C_i e não melhorou a solução. Este atributo evita que a busca local fique sendo executada por mais de r_{\max} vezes em regiões ruins ou regiões que já tenham sido suficientemente exploradas.

Para que o algoritmo possa agrupar soluções em clusters é necessário definir alguma forma de medir a distância entre duas soluções. Sendo assim, uma função de medida de distância $d(i; j)$ é definida, a priori, para calcular a distância entre duas soluções como um número positivo, o qual é maior dependendo de quão mais distante estão as duas soluções.

Em Oliveira et al. (2010) o PAB é tratado como dinâmico e modelado como discreto a alternativa de resolução é baseada na aplicação do método *Clustering Search* (CS), utilizando o *Simulated Annealing* (SA) como gerador de soluções.

4.1.2.5 GRASP

Segundo Ribeiro e Arroyo (2008) apud Resende e Ribeiro (2005) o método GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) é um procedimento iterativo de múltiplos reinícios, onde a cada iteração consiste de duas fases: uma fase de construção para determinar uma solução inicial x e uma fase de busca local aplicada para melhorar a solução inicial x e obtendo uma solução ótima local x' . Após de executar um número *Max_Iterações*, a meta-heurística retorna a melhor solução encontrada.

Em Lopes et al. (2011) propõe uma abordagem baseada na aplicação do método Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) de forma integrada com o método Path Relinking (PR) para resolução do PAB. Basicamente, a abordagem proposta consiste na aplicação do GRASP, para construção de soluções, com a aplicação do PR como uma estratégia de intensificação de busca. Para validação da abordagem proposta, foi utilizado um conjunto de instâncias baseado em dados reais e considerado em diversos trabalhos recentes.

4.2 SIMULATED ANNEALING

Como mencionado em Soeiro (2009), Recozimento Simulado (*Simulated Annealing*, SA) tem sua origem na analogia entre o processo físico do resfriamento de um metal em estado de fusão e o problema de otimização. Baseado em ideias da mecânica estatística e no algoritmo de simulação proposto por Metropolis et al. (.1953) o SA foi apresentado inicialmente como uma técnica de otimização combinatória por Kirkpatrick et al. (1983) que o utilizaram no projeto de sistemas eletrônicos.

Kirkpatrick et al. (1983) fez uso do SA em uma analogia com a termodinâmica ao simular o resfriamento de um conjunto de átomos aquecidos. Essa técnica começa sua busca a partir de uma solução inicial qualquer, normalmente com base na sua experiência. Trata-se de uma técnica de busca local probabilística, que se baseia em uma analogia com a termodinâmica, ao simular o resfriamento lento da matéria, após ser aquecida.

De acordo com Chaves (2009), a cada iteração do método, um novo estado é gerado a partir do estado corrente por uma modificação aleatória neste; se o novo estado é de energia menor que o estado corrente, esse novo estado passa a ser o estado corrente; se o novo estado

tem uma energia maior que o estado corrente em Δ unidades, a probabilidade de se mudar do estado corrente para o novo estado é: $e^{-\Delta/kT}$, onde k = constante de Boltzmann T = temperatura corrente. Este procedimento é repetido até se atingir o equilíbrio térmico (algoritmo de Metropolis).

No início do processo, a temperatura é elevada e a probabilidade de se aceitar soluções de piora é maior, as soluções de piora são aceitas para escapar de ótimos locais.

A probabilidade de se aceitar uma solução de piora depende de um parâmetro, chamado temperatura.

Quanto menor a temperatura, menor a probabilidade de se aceitar soluções de piora.

Atingido o equilíbrio térmico, a temperatura é diminuída, a taxa de aceitação de movimentos de piora é, portanto, diminuída com o decorrer das iterações.

No final do processo, praticamente não se aceita movimentos de piora e o método se comporta como o método da descida/subida, o final do processo se dá quando a temperatura se aproxima de zero e nenhuma solução de piora é mais aceita, evidenciando o encontro de um ótimo local.

Blum e Roli (2001) afirmam que um fator importante na técnica Simulated Annealing é o processo de resfriamento. Programações de resfriamento que garantem a convergência para um ótimo global infelizmente são impraticáveis, pois necessitam de um tempo infinito para se atingir o ótimo global. Entretanto, programações de resfriamento mais rápidas são adotadas. Uma das mais usadas segue uma lei geométrica: $T_{k+1} = \alpha T_k$, no qual k se refere à iteração e $\alpha \in]0, 1[$, que corresponde a um decréscimo exponencial da temperatura. Geralmente o valor de α oscila entre 0,90 e 0,99.

A regra de resfriamento pode variar durante a busca, com o objetivo de ajustar o balanço entre diversificação e intensificação. Por exemplo, no início da busca, a temperatura T pode ser constante ou decrescer linearmente, favorecendo assim mais a diversificação. Então, T pode seguir uma regra, como a geométrica, para convergir para um mínimo local no fim da busca, ou seja, intensificando mais do que diversificando.

Gomes (2003) menciona que a técnica Simulated Annealing apresenta vantagens e desvantagens. As *vantagens* se referem à mesma apresentar uma implementação simples, pois só visita uma única solução a cada iteração bastando calcular o valor da função objetivo da solução vizinha gerada. Além disso, Simulated Annealing pode lidar com modelos altamente não lineares, dados caóticos e muitas restrições.

A técnica SA é robusta em geral e Busseti (2001) apud Gomes (2003) afirma que: “Sua principal vantagem sobre os outros métodos é a sua habilidade e flexibilidade para se aproximar do ótimo global. O algoritmo é bastante versátil desde que ele não dependa de alguma propriedade restritiva do modelo”.

Ele também afirma que os métodos SA apresentam a vantagem de serem facilmente “ajustados”, pois para qualquer sistema estocástico ou não linear razoavelmente difícil, um dado algoritmo de otimização pode ser ajustado para aumentar sua performance, requerendo,subsequentemente, tempo e esforço para se tornar familiar com um dado código.

A habilidade para ajustar um dado algoritmo, para usar em mais de um problema, deve ser considerada uma característica importante de um algoritmo. Porém, o SA apresenta algumas *desvantagens* como:

- a) apesar de convergir para a solução ótima, a velocidade de redução de temperatura exigida implica em visitar um número exponencial de soluções;
- b) a princípio é necessário um processo lento de resfriamento e isso resulta em tempos elevados de processamento;
- c) é pouco inteligente, pois só usa a variação do valor da função objetivo como informação do problema;

Alguns autores consideram o Simulated Annealing como uma técnica heurística outros como uma técnica meta-heurística, como o presente trabalho é baseado no estudo de Mauri et al. (2008) em relação à implementação da técnica, será adotado o termo heurística Simulated Annealing.

4.2.1 DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO

Segundo Busseti (2001), a implementação do algoritmo Simulated Annealing pode ser implementada conforme a estrutura da Figura 4.2.

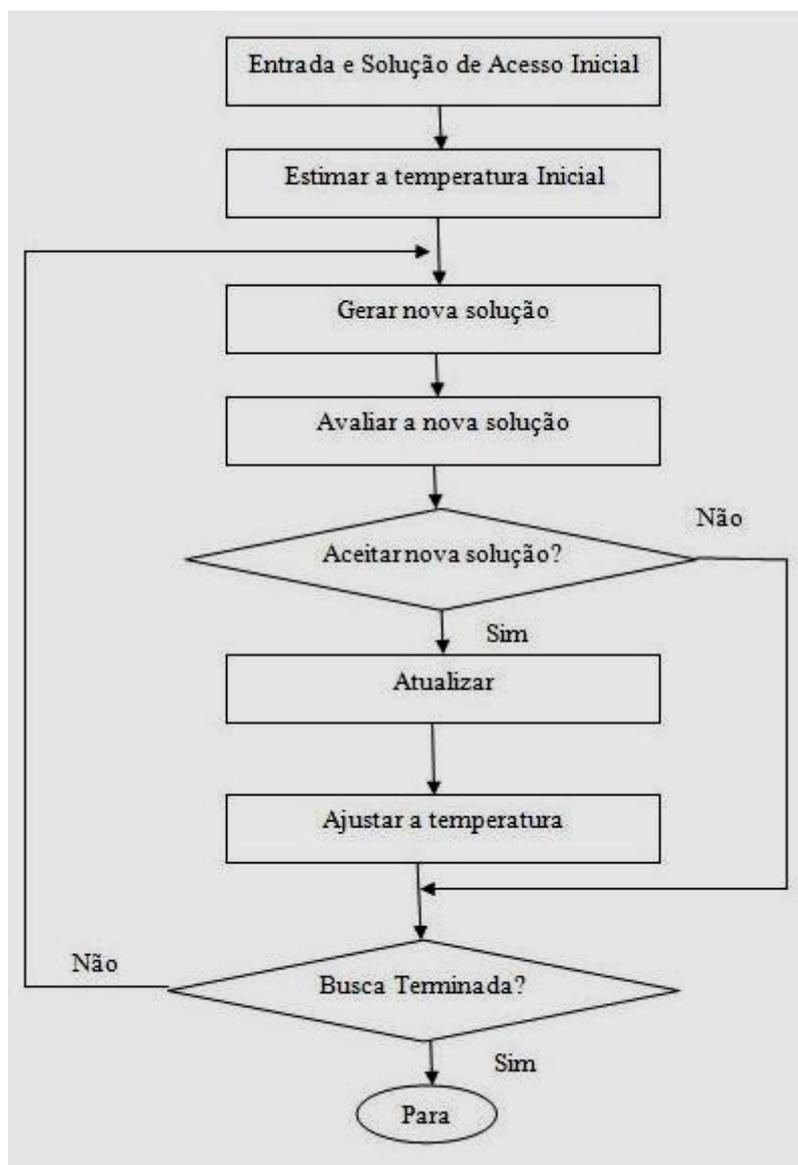


Figura 4.2 – Estrutura do algoritmo SA

Fonte: Adaptado de Busseti (2001)

Em Mauri (2008) o procedimento é descrito do seguinte modo:

O procedimento principal consiste em um loop que gera aleatoriamente, em cada iteração, um único vizinho S' da solução corrente S .

A cada geração de um vizinho S' de S ($S' \in \Psi(S)$), é testada a variação do valor da função objetivo (custo), 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 $\Delta \geq 0$ 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 de pior custo.

A temperatura T assume inicialmente um valor elevado T_0 . Após um número fixo de iterações SA_{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, dá-se uma chance maior para escapar de mínimos locais e, à medida que T aproxima-se de zero, o algoritmo comporta-se como um método de descida, 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: T_c) e nenhuma solução que piore o valor da melhor solução é mais 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 SA_{max} , a temperatura inicial T_0 , e a temperatura de congelamento T_c . A seguir apresenta-se o algoritmo Simulated Annealing “padrão”.

1. DADO (α, SA_{max}, T_0 e T_c) FAÇA
2. $S^* \leftarrow S$; {Melhor solução obtida até então}
3. $IterT \leftarrow 0$; { Número de iterações na temperatura T }
4. $T \leftarrow T_0$; {Temperatura corrente}
5. ENQUANTO ($T > T_c$) FAÇA
6. ENQUANTO ($IterT < SA_{max}$) FAÇA
7. $IterT \leftarrow IterT + 1$;
8. GERAR (um vizinho qualquer $S' \in \Psi(S)$);
9. $\Delta \leftarrow f(S') - f(S)$;
10. SE ($\Delta < 0$) $S \leftarrow S'$;

```
11.     SE ( $f(S') < f(S^*)$ )  $S^* \leftarrow S'$ ; FIM SE
12.     SENÃO
13.     TOMAR ( $x \in [0, 1]$ );
14.     SE ( $x < e^{-\Delta/T}$ )  $S \leftarrow S'$ ; FIM SE
15.     FIM SE
16.     FIM ENQUANTO
17.      $T \leftarrow \alpha * T$ ;    $\text{IterT} \leftarrow 0$ ;
18.     FIM ENQUANTO
19.      $S \leftarrow S^*$ ;
20.     RETORNAR (S).
```

5. CONTEXTUALIZAÇÃO DO LOCAL DE APLICAÇÃO E A METODOLOGIA SA

Este capítulo apresenta a contextualização do local da aplicação, Porto do Rio Grande e Terminal Portuário Tecon e trata da metodologia utilizada na resolução do problema de alocação de berços, da modelagem matemática do método proposto e a forma de implementação do Simulated Annealing, baseado nos estudos de Mauri et al. (2008). O SA tem demonstrado bons resultados na resolução do problema, visto que possibilita encontrar a melhor alocação dos navios em berços dentro de um período estabelecido, no sentido de minimizar os custos operacionais.

5.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO LOCAL DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

5.1.1 Porto do Rio Grande

Segundo Arruda e Bastos (2000), o Porto do Rio Grande é responsável pela movimentação de 25% das cargas trocadas no âmbito do MERCOSUL e esta se empenhando em adotar políticas operacionais e em fazer investimentos que, além de consolidar sua atual posição, também o faça assumir um papel cada vez mais importante no sistema marítimo-portuário do continente sul-americano.

Localizado no município de Rio Grande (RS), está situado a 32 graus 07 minutos e 20 segundos ($32^{\circ} 07' 20''$) de latitude Sul e a 52 graus 05 minutos e 36 segundos ($52^{\circ} 05' 36''$) de longitude Oeste de Greenwich. É o porto de mar mais meridional do Brasil, localizado na margem Oeste do Canal do Norte, que é o escoadouro natural de toda a bacia hidrográfica da Laguna dos Patos.

A maior parte da movimentação de contêineres é realizada no Tecon Rio Grande e uma pequena quantidade no cais público do Porto Novo.

O Porto do Rio Grande é constituído por três áreas de operação portuária com possibilidade de expansão para a área conface ao Porto Novo, no município de São José do Norte onde é apresentado pelas Figuras 5.1 e 5.2.



Figura 5.1 – Áreas de Operação portuária.

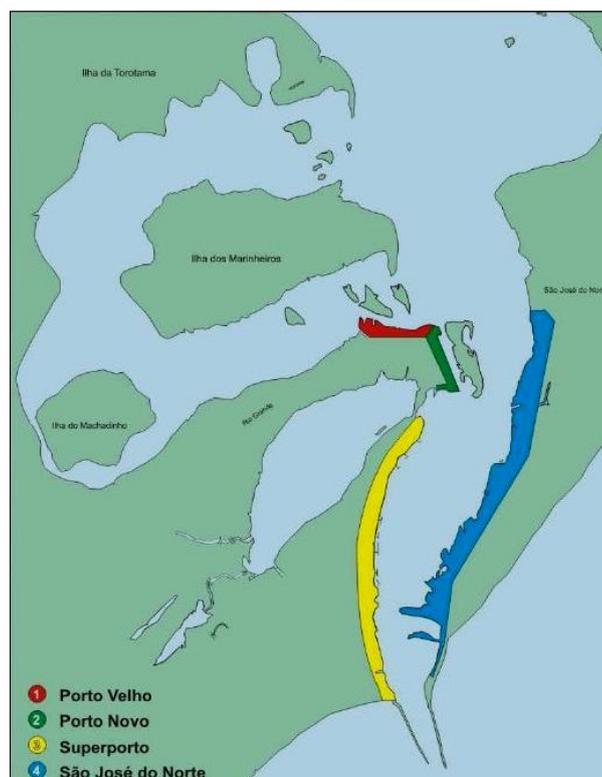


Figura 5.2 – Zona Portuária.

Fonte: Plano de Zoneamento das Áreas do Porto Organizado do Rio Grande (2001)

Porto Velho: são desenvolvidas diversas atividades, entre elas, a pesca; há ainda uma área destinada ao embarque e desembarque de passageiros para a travessia Rio Grande/São José do Norte. Essa zona está dividida em: Área de Carga Geral para Navegação, Área de Ensino e Pesquisa, Área de Turismo e Lazer, Terminal de Passageiros, Área Pesqueira, Área Militar e Área de Serviços, em destaque na Figura 5.3.



Figura 5.3 – Área do Porto Velho.

Fonte: Plano de Zoneamento das Áreas do Porto Organizado do Rio Grande (2001)

Porto Novo: possui um cais acostável de aproximadamente 1950 metros e calado com a profundidade média de 31 pés. Nas áreas de embarque e desembarque, o terminal Porto Novo, possui os seguintes berços: de ROLL – ON / ROLL - OFF, de Carga Geral, de Contêineres e Fertilizantes, de Construção e Reparo Naval, que está destacado na Figura 5.4.

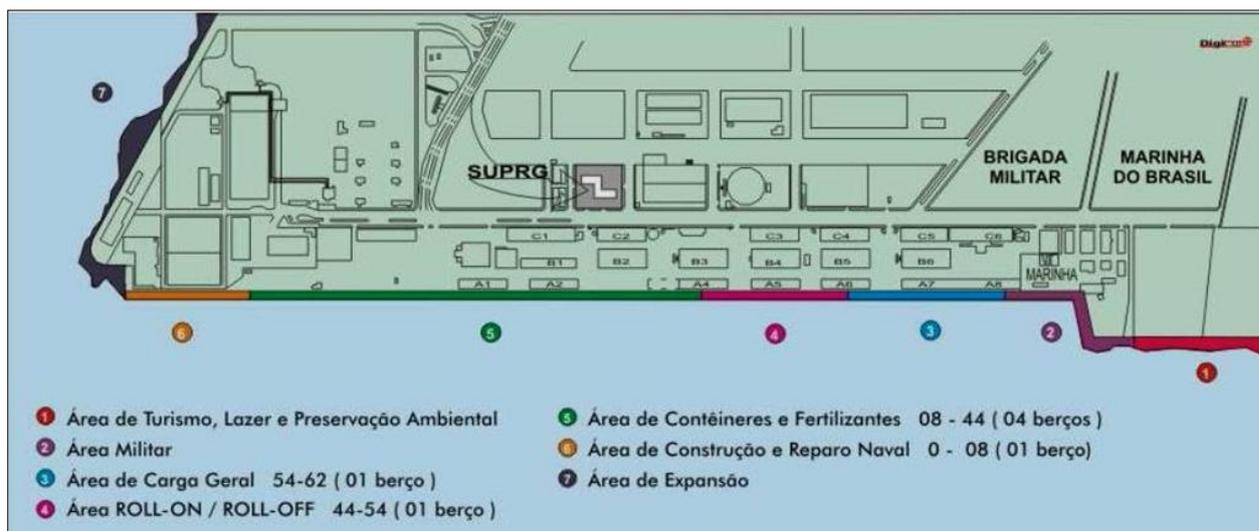


Figura 5.4 – Porto novo.

Fonte: Plano de Zoneamento das Áreas do Porto Organizado do Rio Grande (2001)

Superporto: zona portuária destacam-se as áreas de: Serviços, de Graneis Líquidos e Fertilizantes, Construção e Reparo Naval, de Graneis Agrícolas, de Contêineres, de Ligação Rio Grande/ São José do Norte, de Produtos Florestais, Exploração Portuária, que estão apresentadas na Figura 5.5.



Figura 5.5 – Superporto.

Fonte: Plano de Zoneamento das Áreas do Porto Organizado do Rio Grande (2001)

São José do Norte: essa zona está dividida pelas áreas de : Produtos Florestais, de Construção e Reparo Naval e de Expansão, apresentadas na Figura 5.6.

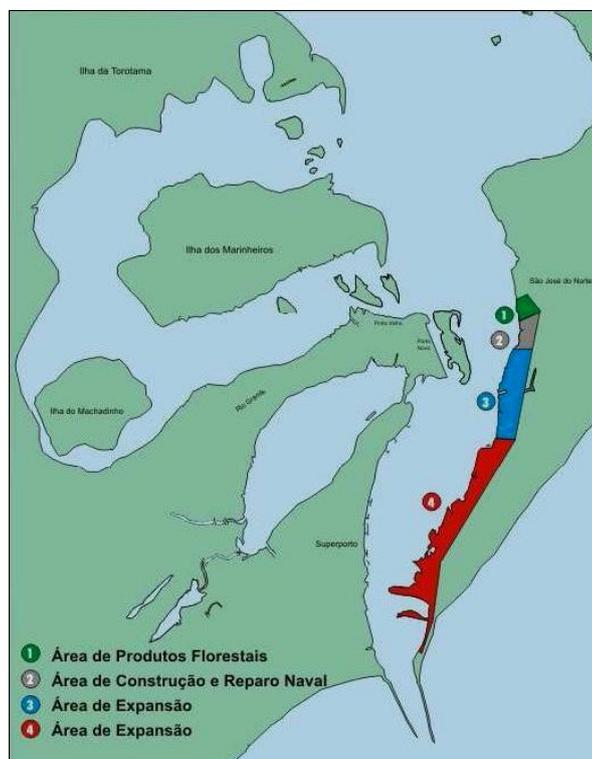


Figura 5.6 – São José do Norte.

Fonte: Plano de Zoneamento das Áreas do Porto Organizado do Rio Grande (2001)

O Porto do Rio Grande fornece aos seus clientes uma ferramenta via-internet que possibilita o acompanhamento da movimentação portuária, essa movimentação é acompanhada pelo Cais Virtual.

O Cais Virtual tem o objetivo de facilitar o acesso dos clientes as informações e agilizar o trabalho do Setor de Operações e Fiscalização. Através de uma imagem de satélite, o sistema mostra o local exato onde está ou ficará atracado o navio, bem como os números dos berços de atracação, zoneamento das áreas do porto, boias de sinalização, dolphins e o nome dos terminais. É possível também visualizar os navios esperados, programados e fundeados.

A Figura 5.7 apresenta a imagem de satélite do Cais Virtual. Os passos de armazenamento dos dados são os seguintes:

1) Ao navio chegar à zona de fundeio a Praticagem da Barra coloca a data e hora de fundeio (verde) e as coordenadas e ângulo da localização;

- 2) Recebimento de documentação do navio no Setor de Operações e Fiscalização do Porto;
- 3) Colocação de informações no Sistema Porto, ficando o navio como previsto (em amarelo);
- 4) Executar a programação do navio, adquirindo o status de programado (vermelho);
- 5) Informar dados de atracação, passando o navio para operação (azul);
- 6) Alteração do posicionamento do navio junto ao cais.



Figura 5.7 – Cais Virtual.

5.1.2 Terminal Portuário Tecon

O Tecon Rio Grande iniciou suas operações em 1997, buscando aumento de produtividade e redução de custos, melhorando assim a competitividade do comércio exterior brasileiro. Foram investidos até o momento cerca de US\$ 60 milhões em infraestrutura, equipamentos, sistemas informatizados e capacitação de pessoal. Em 2007 o Tecon Rio Grande movimentou 622 mil TEUS, sendo considerado um dos melhores e mais modernos terminais da América do Sul. O terminal possui uma estrutura de funcionamento de operações 24 horas/dia e 7 dias/semana, com sistema de janela de atracação (terminal reserva ao armador dia e hora em que o navio atracará num determinado berço).

Sua infraestrutura é de 900 metros de comprimento de cais (com três berços de atracação, podendo alocar simultaneamente até três navios de no máximo 280 metros,), 45' de calado, área total de 735 mil m² e área pavimentada 390.882 m², apresentada na Figura 5.8.

A capacidade estática de estocagem de contêineres é 39.000 TEUs, dispondo de 2000 tomadas para contêineres refrigerados e 17mil m² de área de armazém para cargas especiais e gerais.

O acesso para os caminhões na área interna é feita através de dez portões (gates). São disponíveis seis guindastes Impsa Post-Panamax e três guindastes móveis 100 t. Os equipamentos do pátio contam 18 reach stackers, sete front loaders, 22 fork lifts, 48 tratores de pátio e oito Guindastes RTGs.

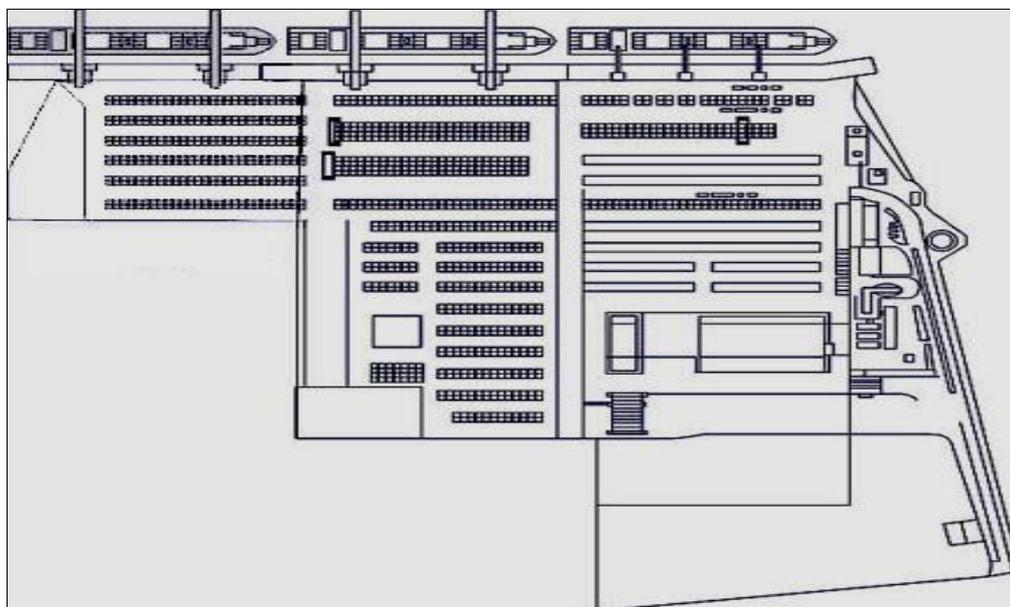


Figura 5.8 – Infraestrutura Tecon.

Fonte: Wilson, Sons

Segundo NEW,S (2008), a entrega do terceiro berço de atracação do Tecon Rio Grande, possibilitará uma capacidade operacional 60% maior. Já no primeiro mês de atividades do novo cais, registrou-se operação recorde no terminal. A isso soma-se o notável desempenho da área de operações *offshore*, que registrou expansão de 106,6% no faturamento.

Na Figura 5.9 é possível visualizar a expansão do Tecon Rio Grande com a inauguração do terceiro berço, possibilitando mais agilidade.



Figura 5.9 – Expansão do Tecon Rio Grande

Com os três berços em atividade a capacidade de movimentação sobe para 670 mil contêineres ou 1,13 milhão de TEUs (medida para contêineres de 20 pés) por ano.

O objetivo da empresa é concentrar no local a carga dos países do Cone Sul, com base nas facilidades físicas e geográficas, nos investimentos realizados e no preço competitivo.

Segundo a Revista Portos e Navios (2012), em 1997 a movimentação no porto do Rio Grande era de 90 mil TEUs, enquanto a média dos últimos anos do terminal é de 640 mil TEUs. Em 2006, a companhia atingiu 670 mil TEUs. O Tecon Rio Grande movimenta 98% da carga containerizada que passa pelo porto de Rio Grande.

Entre os principais produtos exportados pelo Tecon Rio Grande estão fumo (25% do total), frango congelado (22%) e arroz (13%). Há embarques também de calçados, resinas do pólo petroquímico localizado em Triunfo, próximo a Porto Alegre, móveis, calçados, couro, máquinas agrícolas e borracha, entre outros.

5.2 SIMULATED ANNEALING APLICADO AO PAB

5.2.1 Modelo Proposto

Para resolver o PAB, foi desenvolvida uma heurística baseada no Simulated Annealing. Para utilização dessa heurística, é proposto um modelo matemático baseado nos estudos de Mauri et al. (2008), sendo esse modelo uma relaxação do modelo apresentado por Cordeau et al. (2005).

No modelo, as restrições (3.7) e (3.8), mencionadas anteriormente, foram relaxadas, sendo transferidas para a função objetivo (5.2). De forma análoga, as restrições (3.9) e (3.10), mencionadas anteriormente, também foram transferidas para a função objetivo (5.3). As demais restrições foram mantidas, porém, na função objetivo foram adicionados fatores de penalização ($w = [w_0, w_1, w_2]$) para cada termo. O modelo proposto é apresentado a seguir:

Minimizar

$$Z^* = w_0 \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} v_i \left(T_i^k - a_i + t_i^k \sum_{j \in NU\{d(k)\}} x_{ij}^k \right) + \quad (5.1)$$

$$w_1 \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \left(\max(0, a_i - T_i^k) + \left(\max \left(0, T_i^k + t_i^k \sum_{j \in NU\{d(k)\}} x_{ij}^k - b_i \right) \right) \right) + \quad (5.2)$$

$$w_2 \sum_{k \in M} (\max(0, s^k - T_{0(k)}^k) + \max(0, T_{d(k)}^k - e^k)) \quad (5.3)$$

Sujeito à:

$$\sum_{k \in M} \sum_{j \in NU\{d(k)\}} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in N \quad (5.4)$$

$$\sum_{j \in NU\{d(k)\}} x_{0(k)j}^k = 1 \quad \forall k \in M \quad (5.5)$$

$$\sum_{i \in NU\{o(k)\}} x_{id(k)}^k = 1 \quad \forall k \in M \quad (5.6)$$

$$\sum_{j \in NU\{d(k)\}} x_{ij}^k - \sum_{j \in NU\{o(k)\}} x_{ji}^k = 0 \quad \forall k \in M, \quad \forall i \in N \quad (5.7)$$

$$T_i^k + t_i^k - T_j^k \leq (1 - x_{ij}^k)M_{ij}^k \quad \forall k \in M, \forall (i, j) \in A^k \quad (5.8)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in M, \forall (i, j) \in A^k \quad (5.9)$$

Nesse modelo, pode-se notar que o tempo de serviço (com seu valor de custo associado) é representado no termo (5.1). O termo (5.2) minimiza as violações nas janelas de tempo dos navios nos berços. Já o termo (5.3) minimiza as violações nas janelas de tempo de funcionamento dos berços.

Analisando as restrições do modelo acima, pode-se notar que se trata de um Problema de Roteamento de Veículos com Garagens Múltiplas sem Janelas de Tempo, ou seja, um problema cuja resolução é menos árdua em relação ao modelo descrito anteriormente (com janelas de tempo). O objetivo então é minimizar os custos referentes ao porto e ao navio, que está relacionado com o tempo de serviço dos navios. Caso os navios não tenham a mesma importância, uma soma dos tempos de serviço dos navios, considerando uma penalização para indicar a sua devida importância, pode refletir melhor a prática de gerenciamento de alguns portos ou terminais. Os pesos nessa soma podem representar um esquema do valor estimado da carga ou do número de contêineres movimentados.

Deve-se destacar ainda que nesse modelo (5.1 a 5.9) pode resultar em soluções inviáveis para o PAB, porém essas inviabilidades são eliminadas durante a execução das heurísticas apresentados a seguir.

5.2.1.1 Solução Inicial

Mauri et al. (2008) apresenta as *heurística de distribuição* e *heurística de programação* e a solução inicial é gerada através dessas duas heurísticas: A heurística de distribuição é responsável pela atribuição dos navios aos berços e a heurística de programação determina o horário de atendimento dos navios nos berços.

Na *heurística de distribuição*, são criados inicialmente m berços vazios. Os n navios são organizados por ordem de chegada ao porto, e são distribuídos sequencialmente aos berços de forma aleatória, porém sempre verificando se o berço selecionado poderá atender o navio em questão. Após essa distribuição, fica garantido que cada navio foi atribuído a um berço que poderá atendê-lo. O horário em que o navio será atendido ainda poderá ser incoerente, podendo apresentar sobreposição e/ou violações nas janelas de tempo, tanto dos navios quanto do berço. A seguir apresenta-se a heurística de distribuição.

1. CRIAR (m berços vazios);
2. CRIAR (uma lista L com todos os navios);
3. ORDENAR (a lista L pelo horário de chegada dos navios ao porto);
4. PARA (cada navio j em L, $j = 1, 2, \dots, n$) FAÇA
5. SELECIONAR (um berço i, $i = 1, 2, \dots, m$);
6. SE (o berço i não puder atender ao navio j)
7. VOLTAR (para o passo 5);
8. SENÃO
9. ATRIBUIR (o navio j ao berço i);
10. FIM PARA;

Na *heurística de programação*, são efetuados os cálculos do horário de atracação de cada navio, da função objetivo para cada berço k e o somatório das funções objetivos (equações 5.1, 5.2 e 5.3) de todos os berços que resulta na função objetivo da solução. Nessa heurística, a sobreposição de horários é eliminada através do cálculo do horário de atracação dos navios. A heurística de programação é descrita a seguir.

1. SEJA (k um berço qualquer);
2. PARA (cada navio i atribuído a k) FAÇA
3. $T_i^k = \begin{cases} \max(a_i, s^k) & i = 1 \\ \max(a_i, T_{i-1}^k + t_{i-1}^k) & i > 1 \end{cases}$
4. FIM PARA;
5. CALCULAR (a função objetivo (5.1, 5.2 e 5.3) para o berço k);

5.2.1.2 Estrutura de Vizinhaça

Os movimentos de troca são apresentados conforme Mauri et. al.(2008), *Reordenar navios, Realocar navio e Trocar navios*. Assim como na geração da solução inicial, esses movimentos garantem que cada navio seja atribuído apenas a berços que possam atendê-los.

O movimento *Reordenar navios* (Figura 5.10) 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).

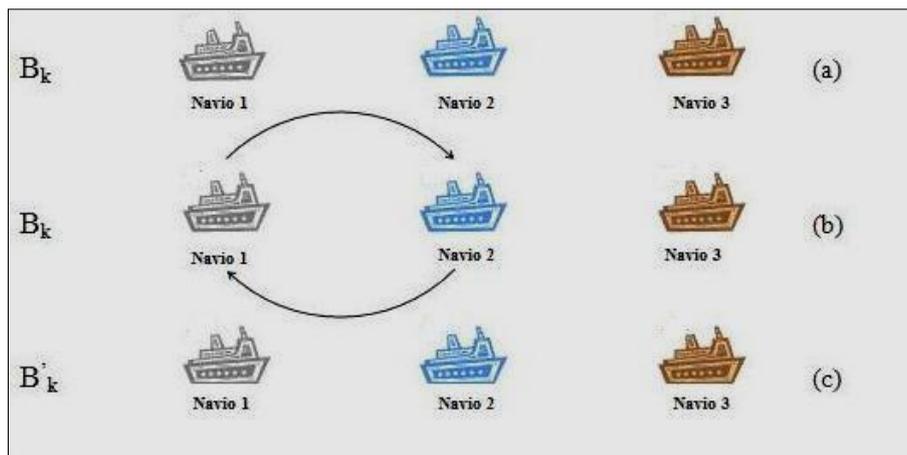


Figura 5.10 – Movimento Reordenar navios.

Fonte: Adaptado de Mauri et al. (2008).

O movimento *Realocar navios* (Figura 5.11) consiste basicamente em selecionar dois berços quaisquer pertencentes à solução, 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 através da ordenação pelo horário de chegada dos navios (c).



Figura 5.11– Movimento Realocar navios.

Fonte: Adaptado de Mauri et al. (2008).

O movimento *Trocar navios* (Figura 5.12) consiste basicamente em selecionar dois berços quaisquer pertencentes à solução, 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).



Figura 5.12 – Movimento Trocar navios.

Fonte: Adaptado de Mauri et al. (2008).

A partir dessa estrutura de vizinhança, o SA é implementado de uma forma em 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.

A função-objetivo $f(S)$, utilizada para avaliar as soluções, é aquela descrita pelas equações (5.1, 5.2 e 5.3) e as restrições do modelo (5.4 a 5.9) são atendidas implicitamente nas heurísticas de distribuição e programação e nos movimentos de troca, aqui descritos. Um pseudocódigo do SA implementado é apresentado a seguir. Os parâmetros de controle do procedimento são a razão de resfriamento α , o número de iterações para cada temperatura SA_{max} , a temperatura inicial T_0 e a temperatura de congelamento T_c .

1. DADO (α, SA_{max}, T_0 e T_c) FAÇA
2. GERAR (uma solução S através da heurística de distribuição);
3. AVALIAR (a solução S através da heurística de programação);
4. $S^* \leftarrow S$; {Melhor solução obtida até então}
5. $IterT \leftarrow 0$; {Número de iterações na temperatura T }
6. $T \leftarrow T_0$; {Temperatura corrente}
7. ENQUANTO ($T > T_c$) FAÇA
8. ENQUANTO ($IterT < SA_{max}$) FAÇA
9. $IterT \leftarrow IterT + 1$;
10. GERAR (um vizinho qualquer S' através de um dos mov. de troca);
11. AVALIAR (a solução S' através da heurística de programação);
12. $\Delta \leftarrow f(S') - f(S)$;
13. SE ($\Delta < 0$) $S \leftarrow S'$;
14. SE ($f(S') < f(S^*)$) $S^* \leftarrow S'$; FIM SE
15. SENÃO
16. TOMAR ($x \in [0, 1]$);
17. SE ($x < e^{-\Delta/T}$) $S \leftarrow S'$; FIM SE
18. FIM SE
19. FIM ENQUANTO
20. $T \leftarrow \alpha * T$; $IterT \leftarrow 0$;
21. FIM ENQUANTO
22. $S \leftarrow S^*$;
23. RETORNAR (S).

5.2.1.3 Reaquecimento

O reaquecimento é uma técnica que tem o intuito de melhorar ainda mais as soluções obtidas pelo SA. Essa técnica consiste em, depois de executar o SA, aplicá-lo novamente à melhor solução obtida até então como solução inicial. No reaquecimento, são utilizados diferentes valores de parâmetros. A temperatura inicial é reduzida, em relação ao SA “normal”, e o número máximo de iterações é aumentado. Dessa forma, a busca por melhores soluções é intensificada na região do espaço de busca próxima à solução inicial, ou seja, o reaquecimento faz um refinamento na solução obtida pelo SA.

6. INTERFACE DO SOFTWARE E EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Neste capítulo é apresentada a interface do software desenvolvido com o auxílio da linguagem de programação Delphi®. O software é um suporte à implementação do algoritmo SA possibilitando a realização de cenários de estudo sobre dados reais de um Terminal de Contêineres. A interface facilita a simulação e possibilita a representação de aspectos dinâmicos, dessa forma tornando o modelo mais aderente à realidade que se deseja representar.

6.1 INTERFACE DO SOFTWARE

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, da metodologia utilizada e dados utilizados é apresentado a seguir a interface do software proposto de maneira a facilitar a compreensão de seu funcionamento.

O software desenvolvido utiliza a técnica Simulated Annealing para resolver o problema PAB e permitirá ao usuário a simulação de diferentes cenários com o intuito de encontrar a melhor alocação dos navios aos berços, com isso reduzir (minimizar) a fila de espera dos navios bem como o custo operacional.

O software é baseado em informações prévias em relação aos dados dos navios: data e horário de chegada, duração prevista do atendimento, custo do tempo de serviço, comprimento, duração da janela de tempo (período de tempo em minutos oferecido pelo terminal ao armador, para que o navio num determinado dia possua a garantia de um berço reservado para atracação ou o pagamento de penalidades pelo terminal caso esse chegue na janela determinada e não possa atracar em virtude de não haver disponibilidade de berço). A partir da informação sobre os horários e datas, o software distribui e programa os navios aos berços ao longo do período previamente estabelecido (aproximadamente a programação é de 2 meses de antecedência disponibilizada por um Terminal de Contêineres no Porto de Rio Grande).

O programa foi desenvolvido com o auxílio da linguagem de programação Delphi®, pois este permite incluir diversas facilidades de simulação e possibilita a representação de aspectos dinâmicos, dessa forma tornando o modelo mais aderente à realidade que se deseja representar.

A ferramenta desenvolvida possibilita gerar um relatório sobre os dados cadastrados: lista prevista da chegada dos navios (horário e data prevista, custo (R\$) por minuto, comprimento (m) do navio); lista de berços (capacidade em relação ao comprimento, horário de abertura e fechamento). Esse relatório pode ser visualizado no Anexo A.

São ainda registrados todos os resultados (Figura 6.1) obtidos durante o processo, o tempo de procedimento da técnica e as melhores soluções obtidas bem como os parâmetros na aplicação da técnica SA. São também registrados o total de movimentos de realocação, reordenação e troca de navios permitindo uma avaliação maior sobre essa estrutura de vizinhança que utiliza os três movimentos, onde a escolha é feita de forma aleatória, porém uniformemente distribuída. Destaca-se a possibilidade de fixar navios aos berços, visto que, em situações reais esses navios só poderão ser alocados em berços apropriados ao seu tipo de carga.

OPÇÕES SELECIONADAS (Simulated Annealing)																
Simulated Annealing				Re-Aquecimento												
Ti	Tc	α	SAmáx	Ti	Tc	α	SAmáx	Distribuição Manual	Fixar Navios em Berços	Usar Movimentos	Rejeitar Navios	Re-Aquecimento	Interagir em cada Solução	Tempo entre atendimentos	Valor do Tempo	Método
40000,00	0000,01	0,975	01000	10000,00	0000,01	0,975	03000	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	00:00:00	Simulated Annealing
RESUMO (Simulated Annealing)																
Data	Tempo de Cálculo	Navios Usados	Navios Rejeitados	Navios Alocados	Navios Não Alocados	Reduções na F.O.	Funções Objetivo			Redução % da F.O Final	Temperatura de Parada (S.A.)	Temperatura de Parada (Re-Aquecimento)	Parcelas Finais			
							F.O. Inicial	F.O. Final	F.O. Efetiva				Eq. 12	Eq. 13	Eq. 14	
27/01/2012	00:00:15:142	003 000	002 001	001 001	004770,17	003650,17	000000,00	000000,00	000000,00	23,48	00000,01	00000,00	000000,0	000000,0	003650,2	
28/01/2012	00:00:08:438	002 000	002 000	002 000	010765,17	000000,00	000000,00	000000,00	100,00	00000,01	00000,00	000000,0	000000,0	000000,0		
29/01/2012	00:00:15:858	003 000	002 001	001 001	019230,17	005700,17	000000,00	000000,00	70,36	00000,01	00000,00	000000,0	000000,0	005700,2		
30/01/2012	00:00:07:387	002 000	002 000	000 000	000000,00	000000,00	000000,00	000000,00	00000	00000,01	00000,00	000000,0	000000,0	000000,0		
31/01/2012	00:00:07:961	002 000	000 002	001 001	012105,17	001150,33	000000,00	000000,00	90,50	00000,01	00000,00	000000,0	000000,0	001150,3		
01/02/2012	00:00:06:165	002 000	002 000	000 000	000000,00	000000,00	000000,00	000000,00	00000	00000,01	00000,00	000000,0	000000,0	000000,0		
TOTAIS	00:01:00:951						0010500,7	0000000,0					0000000	0000000	0010501	
Total de Re-Ordenações		Total de Re-Alocações				Total de Trocas										
7766		321844				96420										

Figura 6.1 – Resumo dos Resultados¹.

¹Eq. 12, Eq. 13 e Eq. 14 equivalem, respectivamente, as equações 5.1, 5.2 e 5.3.

Os primeiros passos para a execução do algoritmo é adicionar os navios em seguida cadastrar os berços e por último aplicar a técnica SA.

Definir Navios – informações sobre nome do navio, data e hora de chegada prevista, comprimento (m), tempo de atendimento, duração da janela de tempo, custo por minuto (R\$). A leitura dos dados é feita através de um arquivo Excel em formato .xls.

Definir Berços – informações sobre nome do berço, capacidade em relação ao comprimento (m), dia da semana em que o berço opera constando o horário de abertura e fechamento do berço.

Histórico – durante o processo do SA o usuário acompanha os resultados, o valor das melhores soluções da função objetivo de cada dia, as iterações na estrutura de vizinhança e o resfriamento do T_c .

Salvar – salva os dados fornecidos anteriormente, os resumos da programação dos navios aos berços, em um arquivo no formato pdf.

Temas – modifica a visualização da interface, alterando cores e formas dos menus.

A Figura 6.2 apresenta os navios inseridos ao software, no calendário é possível visualizar a programação de chegada prevista do conjunto de navios para um determinado dia.

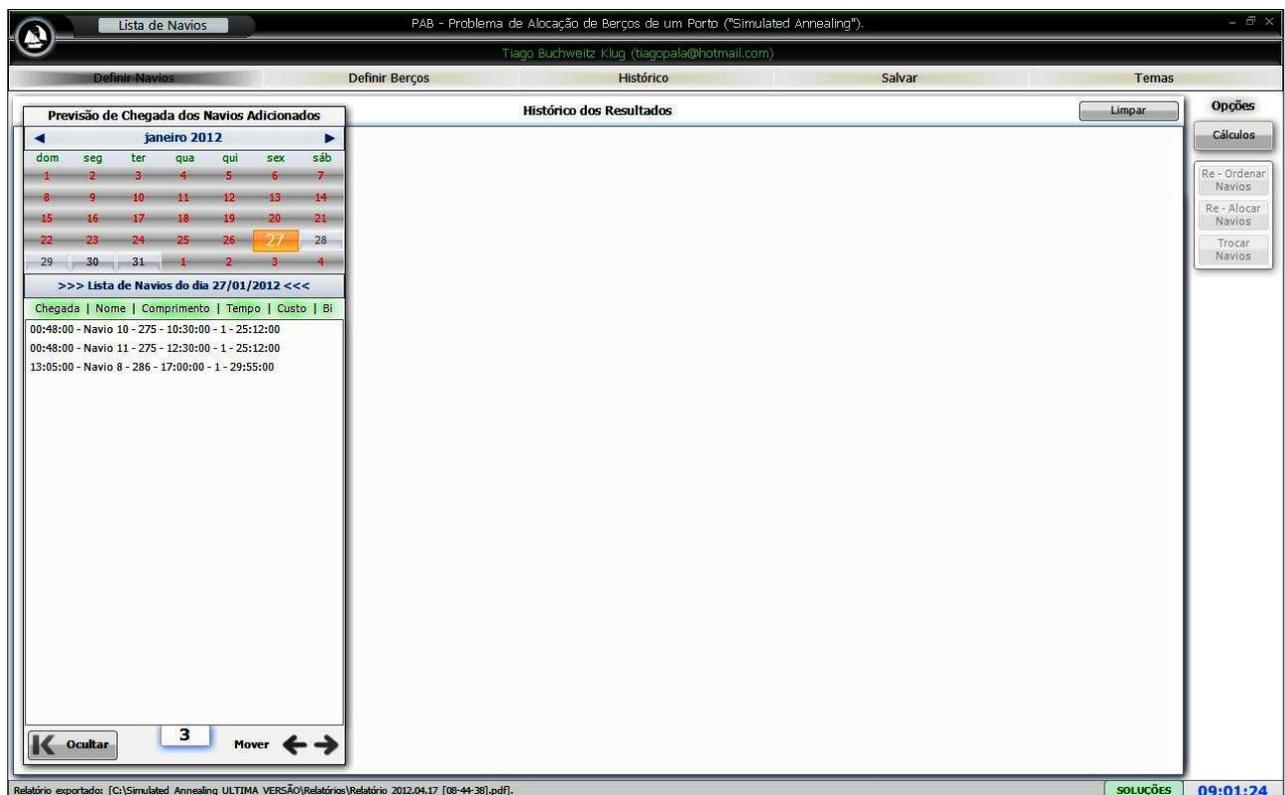


Figura 6.2 – Calendário da programação de chegada dos navios previstos.

A Figura 6.3 apresenta como os berços são cadastrados.

Berços

Nome :

Capacidade (metros) :

Intervalo de abertura:

SEG: 00:00:00 às 00:00:00

TER: 00:00:00 às 00:00:00

QUA: 00:00:00 às 00:00:00

QUI: 00:00:00 às 00:00:00

SEX: 00:00:00 às 00:00:00

SÁB: 00:00:00 às 00:00:00

DOM: 00:00:00 às 00:00:00

Adicionar

Berços Adicionados : [03]

Carregar Berços do Exemplo ✖ Remover Berço Selecionado

Resumo (até 12 berços serão aceitos)

Nome	Dias de Operação	Capacidade
Berço 1	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	300
Berço 2	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	205
Berço 3	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	175

Cancelar Aceitar

Figura 6. 3 – Horário de abertura e fechamento dos berços por dias da semana em um período determinado.

A Figura 6.4 mostra as opções de cálculo para executar o algoritmo. Essa opção permite escolher o método de cálculo Simulated Annealing ou Simulated Annealing + Reaquecimento.

OPÇÕES

Método de Cálculo

Simulated Annealing Re-Aquecimento

Algoritmo Genético

Simulated Annealing

Ti: 40000 SAMax: 1000

Tc: 0,01 α : 0,975

Re-Aquecimento

Ti: 10000 SAMax: 3000

Tc: 0,01 α : 0,975

Solução Inicial:

Definida Rejeitar Navios

Fixar Navios em Berços

Usar Movimentos

Cálculos:

Re-Alocar Forçado

Manipular cada Solução

Genético

Individuos: 100

-> Cruzar: 70

-> Manter: 6

Iterações: 1000

Cruzamento:

Único Duplo

Mutar: 20

Operadores:

CX HX

OX PMX

Solução Inicial:

Fixar Navios em Berços/Rejeitar

Ordenada

Cálculos:

Re-Alocar Forçado

Visualizações

Atualizar a cada 1000 movimentos

Atualizar na menor solução

Mostrar operações (lento)

Parar 3 segundo(s)

Interromper após:

60 segundos

Cancelar Padrão Iniciar

Figura 6.4 – Tela correspondente às opções de cálculo na execução do Algoritmo.

A **Solução Inicial** pode ser obtida a partir de quatro opções que são descritas como:
Definida pelo Usuário – os navios podem ser distribuídos (inseridos) aos berços manualmente (quando selecionada a opção) ou aleatoriamente conforme heurística de distribuição, quando essa opção não for selecionada.

Fixar Navios em Berços – determinados navios só podem ser atendidos por específicos berços, de forma que os mesmos não podem ser alocados em outros berços.

Usar Movimentos – após a distribuição dos navios (antes de qualquer cálculo), podem ser feitos tantos movimentos da estrutura de vizinhança, quanto desejado, se a correspondente opção foi selecionada.

Rejeitar Navios – cancela a programação do navio de um determinado dia, sendo esse automaticamente transferido para a lista dos navios do próximo dia.

A opção **Calcular** executa o algoritmo SA. Nessa opção, o custo operacional de cada dia de alocação dos navios aos berços é informado. O Algoritmo SA pode ser executado com ou sem o **Reaquecimento**. A técnica de Reaquecimento permite que o usuário tenha a possibilidade de melhorar ainda mais as soluções obtidas, nesse caso o algoritmo SA é novamente executado, tendo como solução inicial a melhor solução encontrada.

A opção **Tempo entre atendimentos** define um tempo de parada do berço durante a saída de um navio e atracação de outro.

O relógio pode interromper tanto o cálculo do SA quanto do Reaquecimento (tempo de parada).

O procedimento termina quando a temperatura chega a um valor próximo de zero (temperatura de congelamento: T_c) e nenhuma solução que piore o valor da melhor solução encontrada é mais aceita, isto é, quando o sistema está estável.

Após todos os cálculos realizados, aparecerá na tela principal (Figura 6.5) uma listagem com as datas dos navios alocados (basta clicar na data e ver a solução para o correspondente dia, podendo visualizar o valor da função objetivo inicial e final, tempo de processamento do algoritmo, a quantidade de navios alocados e não alocados nesse dia).

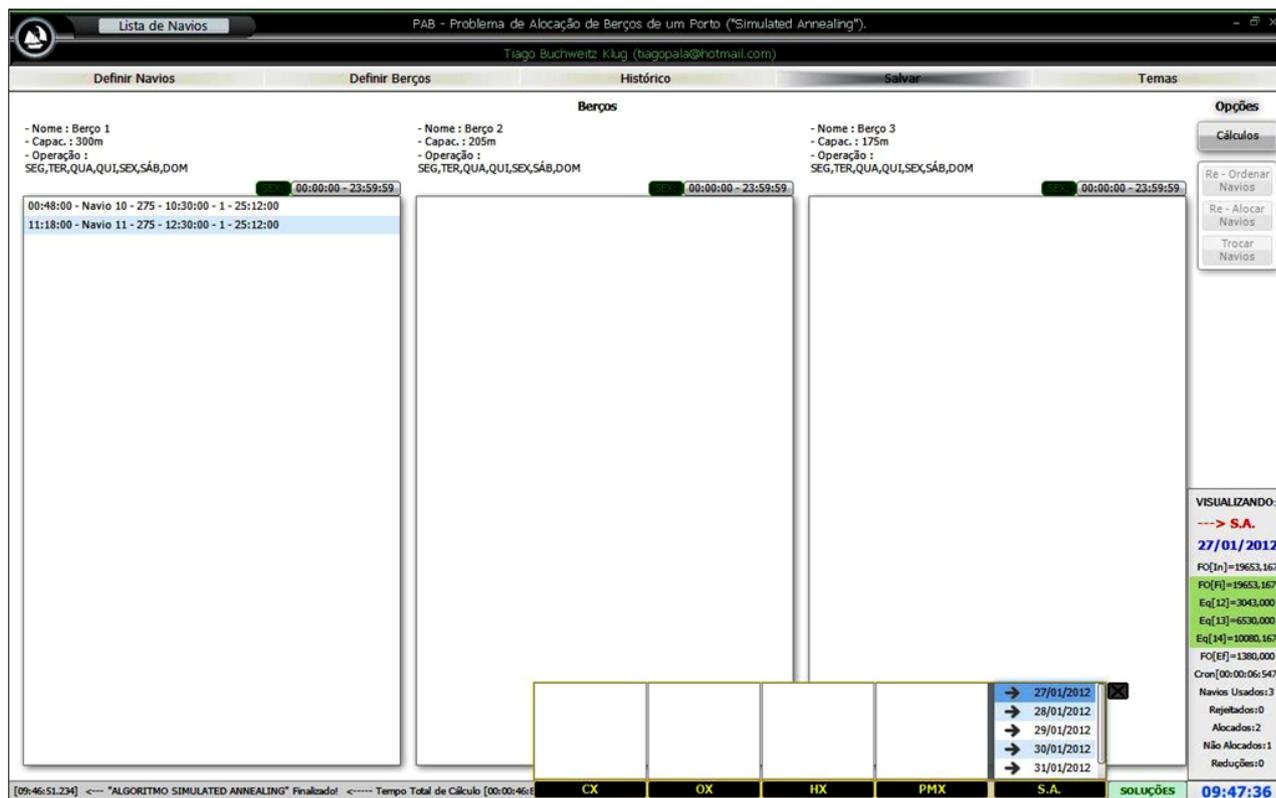


Figura 6.5 – Lista das datas dos navios alocados.

6.2 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Para a simulação dos cenários foram coletados dados de 62 navios, no site (<http://www.teconline.com.br/Terminais/Forms/NavioProgramacaoConsultar.aspx>) do Terminal de Contêineres Tecon, no período de 01/01/2012 a 31/01/2012. (Anexo B)

Os dados obtidos foram: horário e data de chegada prevista, comprimento do navio (m), tempo de atendimento (duração prevista da operação), duração da janela de tempo (período que o navio tem o berço reservado desde a chegada ao porto até a sua saída). Em relação ao valor do custo (R\$) de tempo de serviço por minuto, em todos os cenários foi considerado como 1, pois esse dado não foi disponibilizado.

Os testes foram realizados em um PC com processador Intel ® Pentium® Dual CPU T3400 2.17 GHz e 2 GB de memória RAM. A implementação foi desenvolvida com o auxílio do Delphi® baseada em *Object Pascal (Pascal com extensões orientadas a objetos)*. Os parâmetros utilizados foram: $\alpha = 0,975$, $T_0 = 40000$, $T_c = 0,01$ e $SA_{max} = 1000$ e as penalizações utilizadas foram $w = [1,10,10]$. Para o reaquecimento os parâmetros foram

$\alpha = 0,975$ e $T_0 = 40000$, $T_c = 0,01$ e $SA_{max} = 2000$. Esses parâmetros foram obtidos de Mauri et al. (2008).

Na Tabela 1 e Tabela 2 os cenários de estudos são respectivamente obtidos através do método Simulated Annealing e Simulated Annealing + Reaquecimento, em ambos cenários os dados utilizados são os dados reais do Terminal de Contêineres.

Tabela 1 – Cenários obtidos com o método Simulated Annealing (dados reais)

Cenários	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Simulated Annealing	Sim	Sim	Sim	Sim
Solução Inicial Definida	Não	Sim	Não	Não
Solução Inicial Rejeitar	Não	Não	Sim	Não
Fixar Navios	Não	Não	Não	Sim
Tempo	00:13:13:505	00:24:35:89	00:17:04:380	00:20:51:738
Reordenações	304.525	297.251	365.507	1.458.455
Realocações	1.963.263	1.932.176	1.798.346	0
Trocas	851.481	845.349	838.833	0
Valor da Função Objetivo Inicial (R\$)	610.217,53	138.528,69	503.376,26	413.864,02
Valor da Função Objetivo Final (R\$)	215.320,50	215.320,50	157.434,70	404.974,00

Tabela 2 – Cenários obtidos com o método Simulated Annealing + Reaquecimento (dados reais)

Cenários	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
Simulated Annealing	Sim	Sim	Sim	Sim
Solução Inicial Definida	Não	Sim	Não	Não
Solução Inicial Rejeitar	Não	Não	Sim	Não
Fixar Navios	Não	Não	Não	Sim
Tempo	00:29:38:927	00:42:29:089	00:33:13:978	00:37:11:287
Reordenações	1.007.248	1.034.929	876.882	2.396.276
Realocações	5.795.619	6.087.802	5.398.581	0
Trocas	2.580.926	2.641.213	2.344.157	0
Valor da Função Objetivo Inicial (R\$)	458.502,27	292.710,69	336.660,05	413.864,02
Valor da Função Objetivo Final (R\$)	215.320,50	215.320,50	154.614,30	404.974,00

A seguir algumas observações pertinentes sobre os cenários realizados.

Analisando os cenários da Tabela 1 observa-se que o custo da solução inicial do cenário 2 é melhor que o custo da solução inicial do cenário 1. No entanto, o tempo de execução no cenário 1 é menor do que no cenário 2. Isso pode ser justificado porque o tempo de processamento do algoritmo tende a ser maior quando a distribuição dos navios é feita manualmente.

O cenário 3, é realizado com a intenção de avaliar o desempenho do software quando os navios são rejeitados (navios que por algum motivo não conseguem chegar na data prevista). Nesse cenário, 10 navios foram rejeitados aleatoriamente, sendo esses automaticamente inseridos na lista de espera. O valor da função objetivo tende a ser menor que nos cenários 1 e 2 devido não haver penalização sob o ponto de vista do terminal.

No cenário 4, os 62 navios foram fixados aos berços de acordo com a informação do Terminal, com o intuito de avaliar o custo da solução final e a programação dos mesmos. Nesse cenário não existem os movimentos de realocação e troca de navios, visto que todos os navios são fixos. Dessa forma, observa-se que o movimento de reordenação dos navios ainda melhora o valor da função objetivo. Cabe salientar que a metodologia utilizada faz o cálculo da programação dos navios conforme os navios são alocados aos berços com o intuito de minimizar a violação do atendimento dos navios aos berços. Se compararmos o cenário 1 com o cenário 4, o valor da função objetivo final do cenário 1 é bem menor, mas isso é justificado pelas melhorias dos movimentos de realocação e troca.

Nos cenários da Tabela 2 são apresentados os resultados com a aplicação do reaquecimento a fim de verificar a possibilidade de melhora da solução final encontrada.

Observa-se que nos cenários 5 e 6 não há melhora da solução a partir do reaquecimento. No entanto, no cenário 7, correspondente ao cenário 3 com reaquecimento há uma melhora de aproximadamente 1,8 % na solução final. No cenário 8, correspondente ao cenário 4 com reaquecimento, não há melhora na solução da função objetivo final, permanecendo essa igual.

Nos cenários apresentados a partir dos dados reais, alguns navios violaram a janela de tempo (tempo de serviço no porto), mas todos foram programados para serem alocados em um dia e horário disponível de modo que essa violação fosse a que gerasse o menor custo possível.

Portanto, uma análise mais significativa sobre os navios que excederam as janelas de tempo foi realizada. Os cenários possibilitam ao tomador de decisão um ajuste sobre o tempo

de permanência desses navios no porto a fim de que essas janelas de tempo não fossem excedidas. (Anexo C)

Na Tabela 3 e Tabela 4 os cenários de estudos são respectivamente obtidos através do método Simulated Annealing e Simulated Annealing + Reaquecimento, em ambos cenários as janelas de tempo sobre os dados reais do Terminal foram ajustadas com a finalidade da não violação do tempo de serviço.

Tabela 3 – Cenários obtidos com o método Simulated Annealing (janelas ajustadas)

Cenários	Cenário 9	Cenário 10	Cenário 11
Simulated Annealing	Sim	Sim	Sim
Solução Inicial Definida	Não	Sim	Não
Solução Inicial Rejeitar	Não	Não	Sim
Tempo	00:12:33:670	0:20:25:206	0:13:46:853
Reordenações	257.186	321.222	223.899
Realocações	1.930.525	2.009.003	1.674.608
Trocas	805.049	852.095	678.976
Valor da Função Objetivo Inicial (R\$)	416.863,37	287.195,53	286.333,19
Valor da Função Objetivo Final (R\$)	194.095,50	194095,50	134.689,00

Tabela 4 – Cenários obtidos com o método Simulated Annealing + Reaquecimento (janelas ajustadas)

Cenários	Cenário 12	Cenário 13	Cenário 14
Simulated Annealing	Sim	Sim	Sim
Solução Inicial Definida	Não	Sim	Não
Solução Inicial Rejeitar	Não	Não	Sim
Tempo	00:35:34:528	00:43:54:147	00:35:40:832
Reordenações	761.435	952.218	930.263
Realocações	5.877.446	5.720.172	4.951.209
Trocas	2.437.199	2.517.365	2.149.959
Valor da Função Objetivo Inicial (R\$)	461.115,72	274.510,69	333.601,37
Valor da Função Objetivo Final (R\$)	194.095,50	194.095,50	134.689,00

Comparando os resultados dos cenários (9, 10 e 11) da Tabela 3, com os cenários (1, 2 e 3) da Tabela 1, observa-se que a Tabela 3 apresenta os melhores resultados em relação ao valor da função objetivo final. Isso se deve ao fato de não haver penalização e, portanto a não violação das janelas de tempo com relação ao atendimento dos navios.

No cenário 11, foram rejeitados os mesmos navios que no cenário 3, e o valor da função objetivo final foi menor devido ao ajuste nos tempos de atendimento dos navios e também porque não houve penalização.

Nos cenários da Tabela 4, são aplicados o método reaquecimento a fim de verificar, se ainda é possível melhorar a função objetivo final.

Nos cenários 12, 13 e 14 utilizando o método do reaquecimento não foi possível melhorar a solução da função objetivo final, sendo assim permanecendo a mesma.

Uma melhor compreensão da violação da janela de tempo do atendimento aos navios é apresentada no Anexo A. O Anexo A.1 e A.2 representa os dados relativos ao navio 8, cuja previsão de saída era o dia 28/01/2012 às 19:00. O algoritmo Simulated Annealing foi aplicado, tendo como resultado de programação de alocação os dados do Anexo A.4. Mas avaliando o resumo do Anexo A.5, o navio 8, violou a janela de tempo pois o único berço que esse poderia atracar não estava disponível (berço 1). Automaticamente o navio ingressou na lista de espera e foi alocado no dia 29/01/2012 às 00:00, violando a janela de tempo, com isso gerando um custo ao Terminal. O mesmo acontece com os navios 3 e 5.

A estratégia de solução adotada para o Problema de alocação de Berços é apropriada para os cenários aqui realizados e o software desenvolvido é de fácil manipulação e possibilita gerar relatórios para acompanhar como a programação é realizada. Além do mais, a simulação tornou possível estipular duração de janela de tempo avaliando custos e penalizações.

Finalmente, considerando a natureza não polinomial do problema de otimização combinatória, o tempo computacional gasto na solução dos mesmos não é deterministicamente calculado. Fatores como custo, capacidades dos berços, duração das janelas de tempo contribuem para o tempo total de solução. Assim, dependendo da programação dos navios aos berços sobre determinados portos, os tempos computacionais poderão sofrer alterações significativas.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

A estratégia de solução adotada por Mauri et al. (2008) para o Problema de alocação de Berços é apropriada para os cenários aqui realizados, que foram construídos a partir de situações reais encontradas na programação de navios de um Terminal de Contêineres. Contudo uma avaliação mais criteriosa deveria ser realizada se houvesse condições de comparar o modelo e a técnica de resolução adotada pelo Terminal.

O problema abordado teve o intuito de mostrar que não é preciso grandes despesas para se resolver um dos problemas operacionais detectados no sistema portuário. Através de um estudo aprofundado sobre a técnica Simulated Annealing, compreensão da modelagem do problema foi possível propor um modelo computacional heurístico para auxiliar na alocação dos navios aos berços.

Como o Problema de Alocação de Berços (PAB) é um dos problemas presentes no sistema portuário, o estudo em tecnologia para aperfeiçoar o problema é crescente, pois a logística é fundamental no desempenho portuário, dessa maneira contribuem para acelerar o desenvolvimento econômico que por sua vez é condição indispensável à continuidade do processo, a expansão e o aperfeiçoamento do sistema de transportes.

O software proposto possibilita desenvolver cenários que se aproximam da realidade, mostrando que é possível facilitar o trabalho dos operadores logísticos. Muitos portos, até pouco tempo, realizavam manualmente a elaboração do plano de atracação.

Finalmente, espera-se que o trabalho tenha contribuído para evidenciar a importância de um software que suporta o algoritmo Simulated Annealing na resolução do problema de alocação de berços no sistema portuário e venha incentivar o leitor na implementação de ferramentas computacionais.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho não finaliza os estudos sobre o Problema de Alocação de Berços. Os resultados obtidos são encorajadores, sendo necessário recomendar estudos posteriores através das seguintes investigações:

- i) Em novas situações, verificar as características do problema, a fim de adequar a estratégia de solução adotada no trabalho.
- ii) Um aspecto muito importante é estudar uma estratégia em que o algoritmo recupere as informações sobre a violação das janelas de tempo.
- iii) Comparação da técnica proposta com a implementação do Algoritmo Genético.
- iv) Inclusão de outras restrições de decisão na alocação dos navios aos berços.

A.3 Resumo das opções selecionadas e do método¹

----- OPÇÕES SELECIONADAS (Simulated Annealing) -----																
Simulated Annealing				Re-Aquecimento												
Ti	Tc	α	SAmáx	Ti	Tc	α	SAmáx	Distribuição Manual	Fixar Navios em Berços	Usar Movimentos	Rejeitar Navios	Re-Aquecimento	Interagir em cada Solução	Tempo entre atendimentos	Valor do Tempo	Método
40000,00	0000,01	0,975	01000	10000,00	0000,01	0,975	03000	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	NÃO	00:00:00	Simulated Annealing

----- RESUMO (Simulated Annealing) -----															
Data	Tempo de Cálculo	Navios				Reduções na F.O.	Funções Objetivo			Redução % da F.O Final	Temperatura de Parada (S.A.)	Temperatura de Parada (Re-Aquecimento)	Parcelas Finais		
		Usados	Rejeitados	Alocados	Não Alocados		F.O. Inicial	F.O. Final	F.O. Efetiva				Eq. 12	Eq. 13	Eq. 14
27/01/2012	00:00:12:837	003	000	002	001	000	019753,00	019753,00	001380,00	00,00	00000,01	00000,00	003043,0	006530,0	010180,0
28/01/2012	00:00:11:580	002	000	001	001	001	010865,00	002475,00	000000,00	77,22	00000,01	00000,00	001525,0	000000,0	000950,0
29/01/2012	00:00:54:632	004	000	002	002	000	027155,00	027155,00	000000,00	00,00	00000,01	00000,00	002005,0	016750,0	008400,0
30/01/2012	00:00:11:436	003	000	001	002	001	021161,00	021096,00	000000,00	00,31	00000,01	00000,00	003546,0	010800,0	006750,0
31/01/2012	00:00:47:355	004	000	001	003	000	014075,00	014075,00	000000,00	00,00	00000,01	00000,00	002425,0	005750,0	005900,0
01/02/2012	00:00:41:011	003	000	003	000	000	001115,00	001115,00	001115,00	00,00	00000,01	00000,00	001115,0	000000,0	000000,0
TOTAIS	00:02:58:851							0085669,0	0002495,0				0013659	0039830	0032180

Total de Re-Ordenações	Total de Re-Alocações	Total de Trocas
191903	570469	0

¹Eq. 12, Eq. 13 e Eq. 14 equivalem, respectivamente, as equações 5.1, 5.2 e 5.3.

A.4 Programação de Alocação dos Navios

----- RESULTADO POR DATA -----
SOLUÇÃO FINAL (Simulated Annealing)

Data	Berço n°	Alocado	Navio	Comprimento	Custo	Chegada	Atracou	Tempo	Saiu	bi	Berço Nome
27/01/2012											
sexta											
	01										Berço 1
		SIM	Navio 10	275	01,00	sex 27/01/2012 00:48:00	00:48:00	10:30:00	11:18:00	sáb 28/01/2012 02:00:00	↑ABERTO
		SIM	Navio 11	275	01,00	sex 27/01/2012 00:48:00	11:18:00	12:30:00	23:48:00	sáb 28/01/2012 02:00:00	
		NÃO	Navio 8	286	01,00	sex 27/01/2012 13:05:00	--:--:--	17:00:00	--:--:--	sáb 28/01/2012 19:00:00	
28/01/2012											
sábado											
	01										Berço 1
		SIM	Navio 7	261	01,00	sáb 28/01/2012 00:30:00	00:30:00	07:55:00	08:25:00	sáb 28/01/2012 10:50:00	↑ABERTO
		NÃO	Navio 8	286	01,00	sex 27/01/2012 13:05:00	--:--:--	17:00:00	--:--:--	sáb 28/01/2012 19:00:00	
29/01/2012											
domingo											
	01										Berço 1
		SIM	Navio 8	286	01,00	sex 27/01/2012 13:05:00	00:00:00	17:00:00	17:00:00	sáb 28/01/2012 19:00:00	↑ABERTO
		NÃO	Navio 4	295	01,00	dom 29/01/2012 23:00:00	--:--:--	10:30:00	--:--:--	seg 30/01/2012 11:00:00	
		NÃO	Navio 5	277	01,00	dom 29/01/2012 08:45:00	--:--:--	10:20:00	--:--:--	seg 30/01/2012 10:00:00	
	02										Berço 2
		SIM	Navio 6	183	01,00	dom 29/01/2012 02:00:00	02:00:00	13:45:00	15:45:00	dom 29/01/2012 23:00:00	↑ABERTO
30/01/2012											
segunda											
	01										Berço 1
		SIM	Navio 4	295	01,00	dom 29/01/2012 23:00:00	00:00:00	10:30:00	10:30:00	seg 30/01/2012 11:00:00	↑ABERTO
		NÃO	Navio 3	275	01,00	seg 30/01/2012 00:44:00	--:--:--	14:15:00	--:--:--	seg 30/01/2012 17:19:00	
		NÃO	Navio 5	277	01,00	dom 29/01/2012 08:45:00	--:--:--	10:20:00	--:--:--	seg 30/01/2012 10:00:00	
31/01/2012											
terça											
	01										Berço 1
		SIM	Navio 3	275	01,00	seg 30/01/2012 00:44:00	00:00:00	14:15:00	14:15:00	seg 30/01/2012 17:19:00	↑ABERTO
		NÃO	Navio 1	264	01,00	ter 31/01/2012 17:00:00	--:--:--	08:15:00	--:--:--	qua 01/02/2012 16:15:00	
		NÃO	Navio 5	277	01,00	dom 29/01/2012 08:45:00	--:--:--	10:20:00	--:--:--	seg 30/01/2012 10:00:00	
	02										Berço 2
		NÃO	Navio 2	179	01,00	ter 31/01/2012 15:00:00	--:--:--	09:40:00	--:--:--	qua 01/02/2012 13:50:00	↑ABERTO
01/02/2012											
quarta											
	01										Berço 1
		SIM	Navio 1	264	01,00	ter 31/01/2012 17:00:00	00:00:00	08:15:00	08:15:00	qua 01/02/2012 16:15:00	↑ABERTO
		SIM	Navio 5	277	01,00	dom 29/01/2012 08:45:00	08:15:00	10:20:00	18:35:00	seg 30/01/2012 10:00:00	
	02										Berço 2
		SIM	Navio 2	179	01,00	ter 31/01/2012 15:00:00	00:00:00	09:40:00	09:40:00	qua 01/02/2012 13:50:00	↑ABERTO

A.5 Navios rejeitados e não atendidos

NAVIOS REJEITADOS E NÃO ATENDIDOS ("S.A.")								
Navio	Comprimento	Custo	Chegada		Tempo	bi	Situação	
Navio 8	286	01,00	sex 27/01/2012	13:05:00	17:00:00	sáb 28/01/2012	19:00:00	Não alocado (Violou a janela de tempo!)
Navio 3	275	01,00	seg 30/01/2012	00:44:00	14:15:00	seg 30/01/2012	17:19:00	Não alocado (Violou a janela de tempo!)
Navio 5	277	01,00	dom 29/01/2012	08:45:00	10:20:00	seg 30/01/2012	10:00:00	Não alocado (Violou a janela de tempo!)

ANEXO B – Tabela dos dados reais do Terminal de Contêineres Tecon

Nome do Navio	Hora de Chegada Prevista	Comprimento (m)	Tempo de Atendimento	Janela de Tempo (bi)	Data de Chegada Prevista
CAP IRENE	17:00:00	264	08:15:00	14:15:00	31/01/2012
COPACABANA	15:00:00	179	09:40:00	12:50:00	31/01/2012
MSC FORTUNATE	00:44:00	275	14:15:00	16:35:00	30/01/2012
MSC NERISSA	23:00:00	295	10:30:00	12:00:00	29/01/2012
MONTEVIDEO EXPRESS	08:45:00	277	10:20:00	25:15:00	29/01/2012
LOG IN AMAZONIA	02:00:00	183	13:45:00	21:00:00	29/01/2012
HANJIN PIRAEUS	00:30:00	261	07:55:00	10:20:00	29/01/2012
RIO BLANCO	13:05:00	286	17:00:00	29:55:00	27/01/2012
MSC GENEVA	00:48:00	275	10:30:00	25:12:00	27/01/2012
MAERSK LETICIA	18:00:00	300	14:15:00	26:00:00	26/01/2012
LICA MAERSK	11:45:00	267	05:45:00	10:15:00	26/01/2012
CAP ROCA	19:00:00	234	08:30:00	31:15:00	25/01/2012
PUELICHE	11:00:00	304	13:15:00	25:50:00	25/01/2012
ALIANCA IPANEMA	00:15:00	192	18:10:00	22:30:00	25/01/2012
HANSA FLENSBURG	03:40:00	175	12:10:00	21:20:00	24/01/2012
CSAV LAJA	02:12:00	260	16:15:00	22:18:00	24/01/2012
CSAV HOUSTON	06:00:00	277	09:10:00	23:10:00	23/01/2012
MSC TOKYO	01:24:00	275	14:30:00	65:00:00	23/01/2012
MSC ROSARIA	22:00:00	275	13:25:00	10:20:00	22/01/2012
HANSA ATLANTIC	16:42:00	292	22:00:00	54:00:00	22/01/2012
LOGIN JACARANDA	14:20:00	218	12:30:00	54:40:00	21/01/2012
WAN HAI 507	08:30:00	269	08:30:00	10:40:00	21/01/2012
MONTE CERVANTES	06:00:00	272	06:00:00	09:00:00	21/01/2012
MAERSK LIRQUEN	21:00:00	300	09:45:00	14:30:00	19/01/2012
LAURA MAERSK	13:35:00	266	08:35:00	11:25:00	19/01/2012

ANEXO B – Continuação

CAP PALMAS	10:00:00	208	08:15:00	13:00:00	19/01/2012
MAIPO	17:30:00	306	10:35:00	14:30:00	18/01/2012
HANSA AUGSBURG	00:30:00	176	06:00:00	26:45:00	18/01/2012
CAP HENRI	07:00:00	262	10:30:00	22:20:00	17/01/2012
SINGAPORE	21:00:00	276	09:00:00	17:00:00	16/01/2012
RR EUROPA	14:00:00	201	13:45:00	16:25:00	16/01/2012
FOLEGANDROS	14:00:00	279	10:40:00	13:30:00	16/01/2012
MSC ADRIATIC	01:45:00	277	11:30:00	32:45:00	16/01/2012
MESSOLOGI	22:15:00	294	10:00:00	20:55:00	15/01/2012
LOG IN PANTANAL	10:40:00	183	16:30:00	39:10:00	15/01/2012
ZIM SAO PAULO	08:30:00	260	08:45:00	11:30:00	14/01/2012
RIO DE LA PLATA	05:45:00	284	11:00:00	14:15:00	14/01/2012
MSC GEMMA	23:30:00	277	10:15:00	28:45:00	12/01/2012
SANTA CLARA	09:36:00	300	13:25:00	28:50:00	12/01/2012
ALIANCA MARACANA	01:00:00	192	11:00:00	22:00:00	12/01/2012
XIN YAN TIAN	23:30:00	280	18:15:00	21:35:00	11/01/2012
CAP MELVILLE	21:00:00	208	12:00:00	27:00:00	11/01/2012
LEXA MAERSK	19:30:00	266	16:20:00	37:00:00	11/01/2012
ER BERLIN	16:40:00	276	16:30:00	20:20:00	11/01/2012
HS SMETANA	23:24:00	176	13:30:00	34:06:00	10/01/2012
CAP GREGORY	02:48:00	264	13:00:00	34:12:00	10/01/2012
CCNI AMAZONAS	13:45:00	275	01:10:00	27:25:00	09/01/2012
CAP ISABEL	07:36:00	264	13:00:00	68:00:00	09/01/2012
MSC SARAH	22:00:00	294	22:00:00	47:30:00	08/01/2012
LOG IN SANTOS	21:50:00	169	06:55:00	18:40:00	08/01/2012
MSC ORIANE	12:30:00	277	12:40:00	68:30:00	08/01/2012

ANEXO B – Continuação

HAMMONIA ROMA	20:42:00	208	16:25:00	21:28:00	07/01/2012
RIO MADEIRA	06:00:00	286	13:00:00	16:10:00	07/01/2012
SANTA ROSA	11:20:00	300	16:00:00	28:55:00	05/01/2012
MAULLIN	10:00:00	306	21:00:00	23:30:00	05/01/2012
COPACABANA	03:30:00	179	09:00:00	18:30:00	05/01/2012
LOG IN AMAZONIA	23:35:35	183	13:00:00	16:25:00	04/01/2012
LAUST MAERSK	21:15:00	267	13:35:00	24:05:00	04/01/2012
CAP HARALD	18:00:00	262	12:05:00	12:15:00	03/01/2012
MSC BRINDISI	12:30:00	275	12:05:00	15:00:00	02/01/2012
SCOUT	08:00:00	93	05:30:00	26:00:00	02/01/2012
CHACABUCO	02:18:00	275	11:30:00	38:05:00	01/01/2012

ANEXO C – Tabela de dados com as janelas de tempo ajustadas

Nome do Navio	Hora de Chegada Prevista	Comprimento (m)	Tempo de Atendimento	Janela de Tempo (bi)	Data de Chegada Prevista
CAP IRENE	17:00:00	264	08:15:00	23:15:00	31/01/2012
COPACABANA	15:00:00	179	09:40:00	22:50:00	31/01/2012
MSC FORTUNATE	00:44:00	275	14:15:00	16:35:00	30/01/2012
MSC NERISSA	23:00:00	295	10:30:00	12:00:00	29/01/2012
MONTEVIDEO EXPRESS	08:45:00	277	10:20:00	25:15:00	29/01/2012
LOG IN AMAZONIA	02:00:00	183	13:45:00	21:00:00	29/01/2012
HANJIN PIRAEUS	00:30:00	261	07:55:00	10:20:00	29/01/2012
RIO BLANCO	13:05:00	286	17:00:00	29:55:00	27/01/2012
MSC GENEVA	00:48:00	275	10:30:00	25:12:00	27/01/2012
MAERSK LETICIA	18:00:00	300	14:15:00	26:00:00	26/01/2012
LICA MAERSK	11:45:00	267	05:45:00	10:15:00	26/01/2012
CAP ROCA	19:00:00	234	08:30:00	31:15:00	25/01/2012
PUELICHE	11:00:00	304	13:15:00	39:50:00	25/01/2012
ALIANCA IPANEMA	00:15:00	192	18:10:00	22:30:00	25/01/2012
HANSA FLENSBURG	03:40:00	175	12:10:00	21:20:00	24/01/2012
CSAV LAJA	02:12:00	260	16:15:00	22:18:00	24/01/2012
CSAV HOUSTON	06:00:00	277	09:10:00	23:10:00	23/01/2012
MSC TOKYO	01:24:00	275	14:30:00	65:00:00	23/01/2012
MSC ROSARIA	22:00:00	275	13:25:00	24:20:00	22/01/2012
HANSA ATLANTIC	16:42:00	292	22:00:00	54:00:00	22/01/2012
LOGIN JACARANDA	14:20:00	218	12:30:00	54:40:00	21/01/2012
WAN HAI 507	08:30:00	269	08:30:00	10:40:00	21/01/2012
MONTE CERVANTES	06:00:00	272	06:00:00	09:00:00	21/01/2012
MAERSK LIRQUEN	21:00:00	300	09:45:00	14:30:00	19/01/2012
LAURA MAERSK	13:35:00	266	08:35:00	11:25:00	19/01/2012

ANEXO C – Continuação

CAP PALMAS	10:00:00	208	08:15:00	13:00:00	19/01/2012
MAIPO	17:30:00	306	10:35:00	25:30:00	18/01/2012
HANSA AUGSBURG	00:30:00	176	06:00:00	26:45:00	18/01/2012
CAP HENRI	07:00:00	262	10:30:00	22:20:00	17/01/2012
SINGAPORE	21:00:00	276	09:00:00	17:00:00	16/01/2012
RR EUROPA	14:00:00	201	13:45:00	30:25:00	16/01/2012
FOLEGANDROS	14:00:00	279	10:40:00	24:30:00	16/01/2012
MSC ADRIATIC	01:45:00	277	11:30:00	32:45:00	16/01/2012
MESSOLOGI	22:15:00	294	10:00:00	20:55:00	15/01/2012
LOG IN PANTANAL	10:40:00	183	16:30:00	39:10:00	15/01/2012
ZIM SAO PAULO	08:30:00	260	08:45:00	11:30:00	14/01/2012
RIO DE LA PLATA	05:45:00	284	11:00:00	14:15:00	14/01/2012
MSC GEMMA	23:30:00	277	10:15:00	28:45:00	12/01/2012
SANTA CLARA	09:36:00	300	13:25:00	28:50:00	12/01/2012
ALIANCA MARACANA	01:00:00	192	11:00:00	22:00:00	12/01/2012
XIN YAN TIAN	23:30:00	280	18:15:00	21:35:00	11/01/2012
CAP MELVILLE	21:00:00	208	12:00:00	27:00:00	11/01/2012
LEXA MAERSK	19:30:00	266	16:20:00	54:00:00	11/01/2012
ER BERLIN	16:40:00	276	16:30:00	54:00:00	11/01/2012
HS SMETANA	23:24:00	176	13:30:00	34:06:00	10/01/2012
CAP GREGORY	02:48:00	264	13:00:00	34:12:00	10/01/2012
CCNI AMAZONAS	13:45:00	275	01:10:00	27:25:00	09/01/2012
CAP ISABEL	07:36:00	264	13:00:00	68:00:00	09/01/2012
MSC SARAH	22:00:00	294	22:00:00	47:30:00	08/01/2012
LOG IN SANTOS	21:50:00	169	06:55:00	18:40:00	08/01/2012
MSC ORIANE	12:30:00	277	12:40:00	68:30:00	08/01/2012

ANEXO C – Continuação

HAMMONIA ROMA	20:42:00	208	16:25:00	21:28:00	07/01/2012
RIO MADEIRA	06:00:00	286	13:00:00	16:10:00	07/01/2012
SANTA ROSA	11:20:00	300	16:00:00	48:00:00	05/01/2012
MAULLIN	10:00:00	306	21:00:00	45:30:00	05/01/2012
COPACABANA	03:30:00	179	09:00:00	19:20:00	05/01/2012
LOG IN AMAZONIA	23:35:35	183	13:00:00	16:25:00	04/01/2012
LAUST MAERSK	21:15:00	267	13:35:00	24:05:00	04/01/2012
CAP HARALD	18:00:00	262	12:05:00	19:15:00	03/01/2012
MSC BRINDISI	12:30:00	275	12:05:00	39:00:00	02/01/2012
SCOUT	08:00:00	93	05:30:00	08:00:00	02/01/2012
CHACABUCO	02:18:00	275	11:30:00	13:05:00	01/01/2012

ANEXO D – Interface do Software

Previsão de Chegada dos Navios Adicionados						
fevereiro 2012						
dom	seg	ter	qua	qui	sex	sáb
29	30	31	1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	1	2	3

>>> Lista de Navios do dia 17/02/2012 <<<

Chegada	Nome	Comprimento	Tempo	Custo	Bi
00:00:00	Navio_12	160	00:33:00	5	89:00:00
00:00:00	Navio_24	85	00:44:00	22	17:00:00
13:00:00	Navio_13	140	00:22:00	6	12:00:00
13:00:27	Navio_02	90	00:50:00	4	07:00:00
13:15:00	Navio_01	104	00:40:00	3	22:00:00
14:00:00	Navio_14	100	00:47:00	8	13:00:00
15:00:00	Navio_15	280	00:19:00	4	11:00:00
15:16:00	Navio_03	130	00:35:00	5	12:00:00
16:00:00	Navio_04	120	00:33:00	2	09:00:00
16:18:00	Navio_16	265	00:44:00	9	05:00:00
17:00:00	Navio_05	260	00:22:00	7	00:00:00
17:00:00	Navio_17	270	00:40:00	4	18:00:00
18:00:00	Navio_18	210	00:50:00	5	14:00:00
18:23:00	Navio_06	210	00:47:00	11	03:00:00
19:00:00	Navio_07	310	00:19:00	12	12:00:00
19:00:00	Navio_19	295	00:35:00	6	11:00:00
20:00:00	Navio_08	315	00:44:00	6	07:00:00
20:00:00	Navio_20	315	00:33:00	7	22:00:00
21:00:00	Navio_09	240	00:40:00	7	04:00:00
21:32:00	Navio_21	170	00:22:00	8	18:00:00

23

Figura 1 – Calendário com lista dos navios previstos.

ANEXO D – Continuação

Berços

Nome :

Capacidade (metros) :

Adicionar

Berços Adicionados : [12]

Carregar Berços do Exemplo ✖ Remover Berço Selecionado

Resumo (até 12 berços serão aceitos)

Nome	Dias de Operação	Capacidade
Berço do Cais	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	320
Berço Central	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	200
Berço Principal	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	260
Berço Rotativo	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	130
Berço Cidade	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	190
Berço Pesca	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	270
Berço Antigo	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	360
Berço Praia	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	200
Berço Reserva	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	260
Berço Jardim	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	110
Berço do Canal	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	140
Berço Encosta	SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM	170

Cancelar Aceitar

Figura 2 – Cadastro de 12 berços com seus respectivos horários.

Lista de Navios
PAB - Problema de Alocação de Berços de um Porto ("Simulated Annealing")

Definir Navios
Definir Berços
Histórico
Salvar
Temas

Berços

- Nome : Berço do Cais
- Capac : 320m
- Operação : SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM

Horários...

- Nome : Berço Central
- Capac : 200m
- Operação : SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM

Horários...

- Nome : Berço Principal
- Capac : 260m
- Operação : SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM

Horários...

- Nome : Berço Rotativo
- Capac : 130m
- Operação : SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM

Horários...

- Nome : Berço Cidade
- Capac : 190m
- Operação : SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM

Horários...

- Nome : Berço Pesca
- Capac : 270m
- Operação : SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM

Horários...

- Nome : Berço Antigo
- Capac : 360m
- Operação : SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM

Horários...

- Nome : Berço Praia
- Capac : 200m
- Operação : SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM

Horários...

- Nome : Berço Reserva
- Capac : 260m
- Operação : SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM

Horários...

- Nome : Berço Jardim
- Capac : 110m
- Operação : SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM

Horários...

- Nome : Berço do Canal
- Capac : 140m
- Operação : SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM

Horários...

- Nome : Berço Encosta
- Capac : 170m
- Operação : SEG,TER,QUA,QUI,SEX,SÁB,DOM

Horários...

Opções

Cálculos

Re - Ordenar Navios

Re - Alocar Navios

Trocar Navios

... último passo ...
04:30:26

Figura 3 – Berços inseridos (12) ao software com seus respectivos dados.

ANEXO D – Continuação

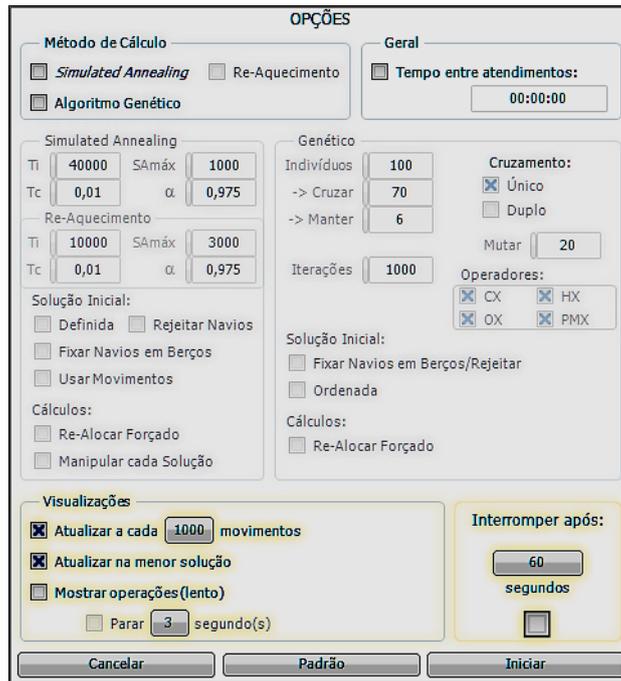


Figura 4 – Opções de Cálculo.

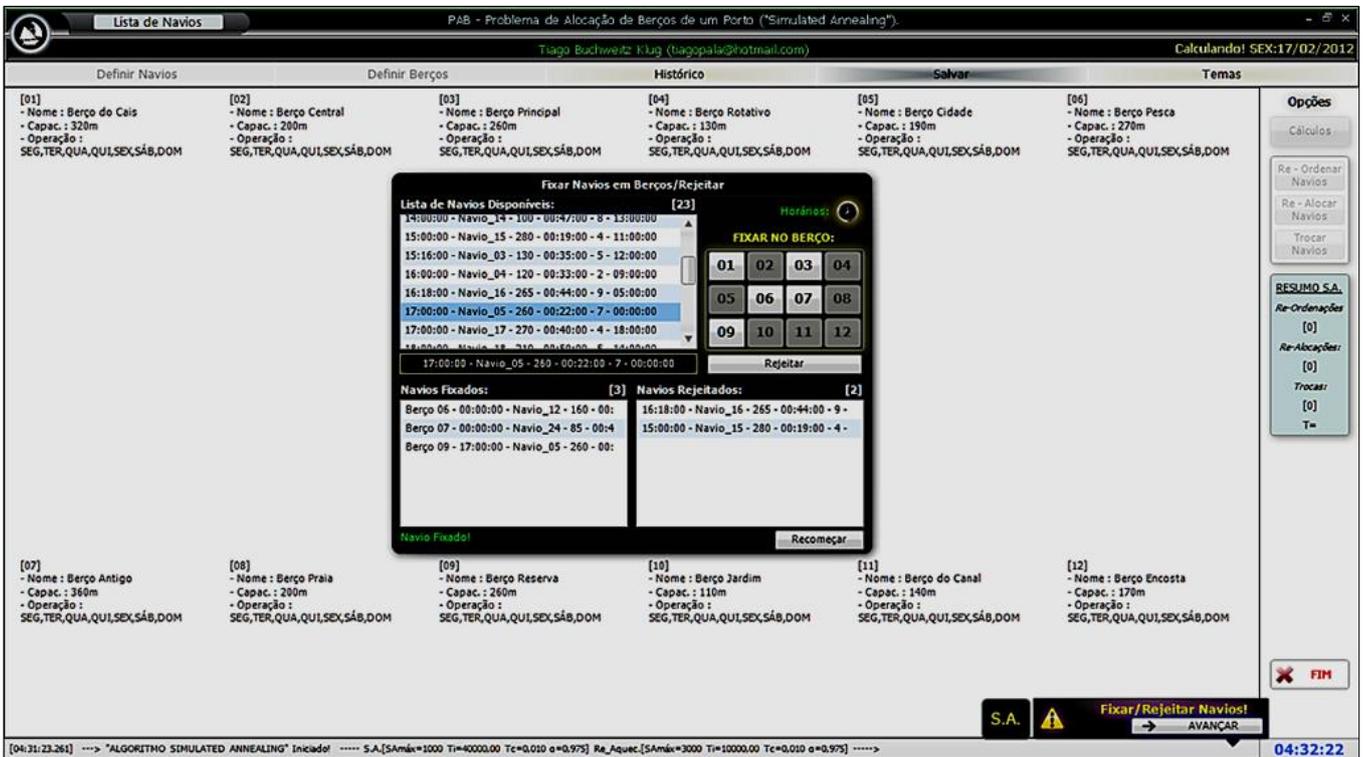


Figura 5 – Fixar/ Rejeitar navios.

ANEXO D – Continuação

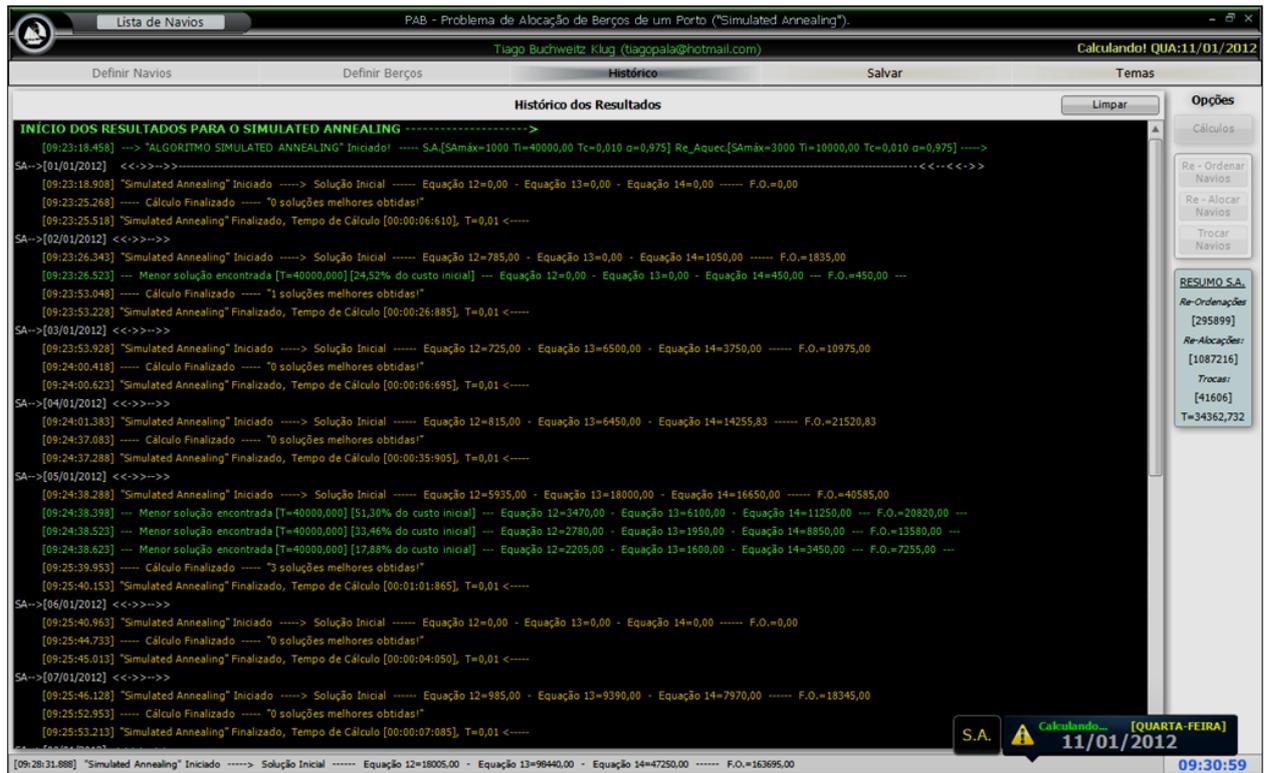


Figura 6 – Histórico dos Resultados.

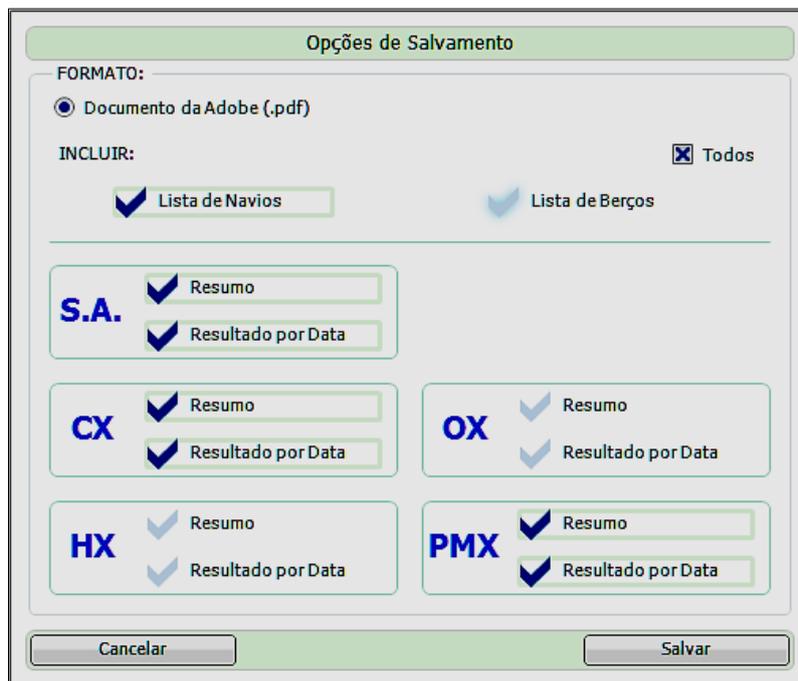


Figura 7 – Opções para salvar resumos.

ANEXO D – Continuação

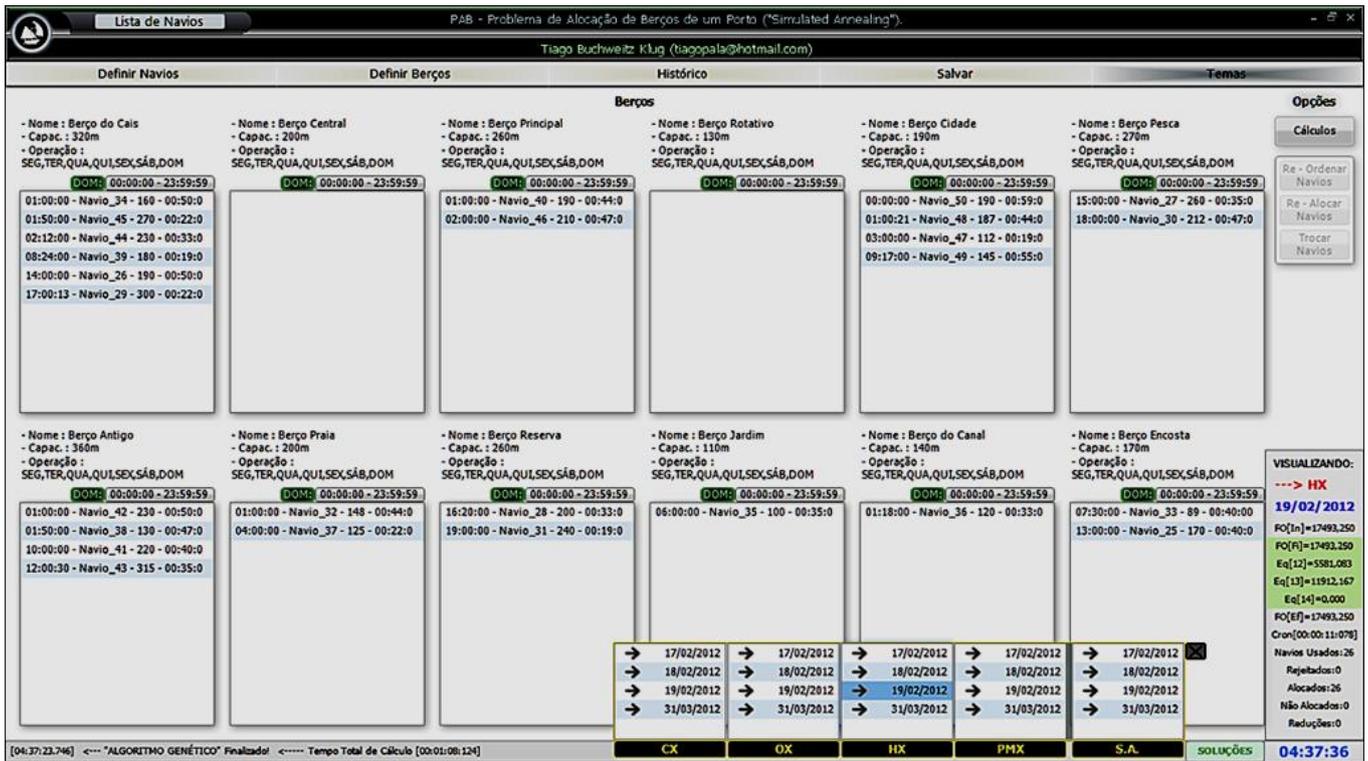


Figura 8 – Navios Alocados nos berços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRUDA, J. B. F.; BASTOS, M. M. M. Pesquisa de dados secundários marítimos portuários: Brasil e Europa. In: XIV ANPET - Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2000, Gramado/RS.

BERTOLANI, A. D; LEME, F. L.. Carregamento de Contêineres em Navios. Disponível em: http://www.mackenzie.br/fileadmin/Graduacao/EE/Revista_on_line/carregamento_containers.pdf. Out. 2004. Acesso em: 05.04.2012.

BOTTER, R. C; PATRÍCIO, M. Análise de regras de atracação de navios em terminais de contêineres. In: CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTES MARÍTIMOS, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE. Rio de Janeiro, 2004. Inserção do setor marítimo, construção naval e offshore brasileiro no mercado global. Rio de Janeiro Sobena, 2006. p. 1-14.

BLUM, C.; ROLI, A. Metaheuristics in Combinatorial Optimisation: **Overview and Conceptual Comparison**. Technical Report TR/IRIDIA/2001-13, IRIDIA, Université Libre de Bruxelles, Belgium, 2001.

BRANCO, R. M. Agendamento de tarefas em sistemas de manufatura job-shop realista com demanda por encomenda: solução por algoritmo genético. Florianópolis, SC. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

BUSSETI, F. Simulated Annealing overview.

Disponível em: <http://163.18.62.64/wisdom/Simulated%20annealing%20overview.pdf>.

Acesso em: 18.05. 2010.

CASSEL, G. L.; VACCARO, G. L. R. A Aplicação de simulação-otimização para a definição do mix ótimo de produção de uma indústria metal-mecânica. ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2007, Foz do Iguaçu.

CECATTO, C. A importância do transporte marítimo. Disponível em: http://www.ecivilnet.com/artigos/transporte_maritimo_importancia.htm.

Acesso em: 02.01.2012.

CHAVES, A.A. Notas de Aula de Antonio Augusto Chaves: Simulated Annealing, 2009.

Disponível em: http://www.lac.inpe.br/~lorena/cap/Aula_C01.pdf

Acesso em: 18.05. 2010.

CHAVES, A. A., Meta-heurísticas híbridas com busca por agrupamentos para problemas de otimização combinatória. Tese de Doutorado em Computação Aplicada - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2009a.

CISNEROS, J. C. M. e BRINATI H. L. Redução dos Impactos ambientais causados pelo Transporte Marítimo. In: 23º Congresso Nacional de Transportes Marítimos Construção Naval e Offshore, 2010, Rio de Janeiro.

Disponível em: http://www.ipen.org.br/downloads/XXI/182_Montoya_Juan_C_.pdf

Acesso em: 02.01.2012.

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.

FERNANDES, M. G. Modelo econômico-operacional para análise e dimensionamento de terminais de contêineres e veículos. São Paulo, 2001. 128p. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FLEURY, P. F. Perspectivas para a logística brasileira. **Revista Tecnológica**, n. 30, p. 26, maio 1998.

GOEBEL, D. Logística – Otimização do Transporte e Estoques na Empresa. Estudos em Comércio Exterior Vol. I nº 1 – jul/dez 1996. Disponível em: http://www.ie.ufrj.br/ecex/pdfs/logistica_otimizacao_do_transporte_e_estoques_na_empresa.pdf. Acesso: 16.01.2011.

GOEBEL, D. A Competitividade Externa e a Logística Doméstica. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico - BNDES, 2004. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br>. Acesso: 16.01.2011.

GOMES, H. A. S Utilização da Meta-heurística Simulated Annealing no Problema de Alocação de Pessoal em Empresas de Transporte Coletivo por Ônibus. Fortaleza, 2003.

GUAN, Yongpei; CHEUNG, Raymond K. The berth allocation problem: models and solutions methods. **OR Spectrum**, v. 26, p. 75-92, 2004.

GUNTHER, H. O.; KIM, K. H. Container terminals and terminal operations. **OR Spectrum**, v. 28, n. 4, p. 437 - 445, 2006.

HANSEN, P.; OGUZ, C.; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search for minimum cost berth allocation. **European Journal of Operational Research**, v. 191, n. 3, p. 636 - 649, 2008.

IMAI, A.; NAGAIWA, K.; CHAN, W. T. Efficient planning of berth allocation for container terminals in asia. **Journal of Advanced Transportation**, v. 31, n. 1, p. 75 - 94, 1997.

IMAI, A.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. The dynamic berth allocation problem for a container port. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 35, n. 4, p. 401-417, 2001.

_____. Berth allocation with service priority. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 37, n. 5, p. 437 - 457, 2003.

_____. Berthing ships at a multi-user container terminal with a limited quay capacity. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 44, n. 1, p. 136 - 151, 2008.

IMAI, A.; SUN, X.; NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 39, n. 3, p. 199 - 221, 2005.

JAIN, A. S., MEERAN, S., A State-of-the-art Review of Job-Shop Scheduling Techniques, UK, Scotland: University of Dundee - Department of Applied Physics, Electronic and Mechanical Engineering. 48p. Relatório Técnico. 1998.

KIM, K. H.; MOON, K. C. Berth scheduling by simulated annealing. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 37, n. 6, p. 541- 560, 2003.

KIRKPATRICK, S.; GELLAT, D. C.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science**, v. 220, n. 4598, p. 671 - 680, 1983.

KOTLER, Philip, Administração de marketing: análise, planejamento, implementação e controle. 5.ed. Sao Paulo: Atlas, 1998.

LACERDA, S. M. Navegação e Portos no Transporte de Contêineres. **Revista do BNDES**. Vol. 11, nº 22, p.215-243, dez 2004. Rio de Janeiro, RJ.

LEE, D.; WANG, H. Q.; MIAO, L. Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 44, n. 1, p. 124 - 135, 2008.

LEGATO, P.; MONACO, F.; TIGANI, N. Berth planning at gioia tauro's maritime terminal by logistic distribution models. In: ANNUAL CONFERENCE OF ITALIANOPERATIONAL RESEARCH SOCIETY, v. 32, 2001, Cagliari. **Proceedings...** Cagliari: AIRO, 2001.

LOPES, A.T.; SCHULZ, V.M.L.; MAURI, G.R. Grasp com path relinking para o problema de alocação de berços. **PODes - Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento**, v.3, n.3, p. 218-229, 2011.

MAGALHÃES, P.B., Transporte Marítimo cargas, navios, portos e terminais. Aduaneiras, São Paulo, 2010.

MAURI, G. R. Novas abordagens para representação e obtenção de limitantes e soluções para alguns problemas de otimização combinatória. São José dos Campos, 2008. 239 p. Tese de Doutorado em Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

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*, v. 1, p. 113-127, 2008.

MAURI, G.R.; OLIVEIRA, A.C.M; LORENA, L.A.N. Resolução do problema de alocação de berços através de uma técnica de geração de colunas. **Pesquisa Operacional**, 30(3), 547-562, 2010.

METROPOLIS, N. C; ROSENBLUTH, A. W; ROSENBLUTH M. N; TELLER, A. H; TELLER; E. Equation of state calculations by fast computing machines, *Journal of Chemical Physics*, v. 21, 6 (1953), 1087-1092.

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.

MOON, K. C. A mathematical model and a heuristic algorithm for berth planning. *Brain Korea 21 Logistics Team*, July, 2000.

NEW,S. Expansão Antecipada : Tecon Rio Grande inaugura berço de atracação. *Edição Especial*, ano 5, nº 30, 2008.

Disponível em:

http://www.wilsonsons.com/revista_news/revista_news_pdf/new,s30_para%20internet.pdf

Acesso: 16.01.2011.

NISHIMURA, E.; IMAI, A.; PAPADIMITRIOU, S. Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms. **European Journal of Operational Research**, v. 131, n. 2, p. 282 - 292, 2001.

NORONHA, T. F; SILVA, M. M. E ALOISE D. J. Uma Abordagem sobre Estratégias Meta-heurísticas. **Revista Eletrônica de Iniciação Científica**, ano I, número I, agosto 2001.

Disponível em: <http://portal.sbc.org.br/index.php?language=1&subject=101>

Acesso: 28.04.2012.

OLIVEIRA, R. C. *Pesquisa Operacional*. Pará, 2008. 72p. Universidade do Estado do Pará, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia Departamento de Engenharia.

OLIVEIRA, R.M.; MAURI, G.R.; LORENA, L.A.N. Clustering search aplicado ao problema de alocação de berços. XLII SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Bento Gonçalves - RS, 30 de agosto a 3 de setembro de 2010.

PERCHÉ, M. H. P.; SUBRAMANIAN A.; MUNHOZ P. L. A.E OCHI, L. S. Uma heurística baseada em Iterated Local Search para o Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos, 2010.

Disponível em: <http://www.ic.uff.br/~satoru/conteudo/artigos/SBPO2010-Mario.pdf>

Acesso: 16.01.2011.

PLANO DE ZONEAMENTO DAS ÁREAS DO PORTO ORGANIZADO DO RIO GRANDE, dezembro 2011.

Disponível em: www.portoriogrande.com.br/site/estrutura_zoneamento_do_porto.php

Acesso: 16.01.2011

PORTO DO RIO GRANDE. Disponível em: <http://www.portoriogrande.com.br>.

Acesso: 16.01.2011.

REVISTA PORTOS E NAVIOS. Tecon Rio Grande: Terminal Completa 15 anos de operação. Editora: Portos e Logísticas, página 16, 01/04/12.

Disponível em:

<http://www.info4.com.br/ocr-gomateria.asp?k=Wilson,+Sons&codcli=2654&codmat=668>

Acesso: 01.05.2012.

RESENDE, M. G. C. e RIBEIRO, C.C. GRASP with path-relinking: Recent advances and applications, in: T.Ibaraki, K. Nonobe, M. Yagiura (Eds.), Metaheuristics: Progress as Real Problem Solvers, Springer, p. 29–63, 2005.

RIBEIRO, W. S.; ARROYO, J. E. C.. Metaheurística GRASP para um problema bi-objetivo de localização de facilidades não capacitado. Em: XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2008, Rio de Janeiro. XXVIII ENEGEP, v. 1, p. 1-10, 2008.

RIO GRANDE TURISMO. Disponível em: <http://www.riograndeturismo.com.br>.

Acesso: 16.01.2011.

SILVA, V. M. D. ; COELHO, A. S. ; MAYERLE, S. F. ; ABREU, L. F. . Heurística Para a Resolução do Problema de Alocação de Navios em Berços Usando Algoritmos Genéticos. **Revista da Engenharia de Instalações no Mar**, v. 1, p. 1-15, 2008.

SILVA, V. M. D.; COELHO, A. S. ; MAYERLE, S. F. . Proposta Heurística de Resolução do problema de Alocação de Navios em Berços usando Algoritmo Genético. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA (SPOLM). Rio de Janeiro, RJ, 2008b.

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

SOEIRO, F. J. C. P.; Becceneri, J. C.; SILVA, N. A. J. Recozimento Simulado (Simulated Annealing). In: Antônio J. Silva Neto; José Carlos Becceneri. (Org.). Técnicas de Inteligência Computacional Inspiradas na Natureza - Aplicação em Problemas Inversos em Transferência Radiativa. São Carlos: SBMAC - Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, 2009, v. 41, p. 43-50.

TECON. Disponível em: <http://www.tecon.com.br>. Acesso: 16.01.2011.

VIEIRA, G. B. B.; PASA, G. S.; SANTOS, C. H. S.; BASSANESI, M. M. R.; MACHADO, J. K. . O nível de serviço do Tecon Rio Grande a partir da ótica dos usuários. In: III SINAP - Simpósio Internacional de Gestão de Negócios em Ambiente Portuário, 2006, Santos. Anais do III SINAP - Simpósio Internacional de Gestão de Negócios em Ambiente Portuário. Santos, 2006.

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

WILSON, SONS. Disponível em: <http://www.wilsonsons.com.br>.

Acesso: 16.01.2011.