UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

APLICAÇÃO DE ALGORÍTMO GENÉTICO NO PLANEJAMENTO DE EMBARQUE EM TERMINAIS DE CONTÊINERES

MARCIO LUIZ PIVA

Uberlândia, 2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

APLICAÇÃO DE ALGORÍTMOS GENÉTICOS NO PLANEJAMENTO DE EMBARQUE EM UM TERMINAL DE CONTÊINERES

MARCIO LUIZ PIVA

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, perante a banca Examinadora abaixo, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências.

Keiji Yamanaka, Ph.D. (Orientador) – UFU

Edgard Afonso Lamounier Junior, Ph.D. – UFU

Alexsandro dos Santos Soares, Dr. – UFG

DEDICATÓRIA

À pessoa que esteve presente em
todos os momentos desta tarefa,
os difíceis, os fáceis, os tranqüilos
e os turbulentos, sempre com
muita compreensão, paciência e
com palavras sábias: minha
esposa Cristina.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo fortalecimento necessário para transpor as dificuldades desta caminhada.

Aos meus pais, por proporcionarem as condições e oportunidades necessárias para que eu chegasse até aqui; sem eles, nada disso seria possível.

Ao meu orientador, Prof. Keiji Yamanaka, pelo apoio e confiança depositada para a realização desta pesquisa.

RESUMO

Em tempos de globalização, o comércio internacional torna-se, cada vez mais, parte do dia-a-dia das pessoas. Com esse crescente aumento das atividades de importação e exportação, a cadeia logística passa a ter papel vital e indispensável. Terminal de Contêiner é um importante elo da cadeia logística internacional, interface multimodal que manuseia, principalmente, cargas do modal marítimo (navio), um dos responsáveis pela agilidade e custo que as mercadorias destinadas e oriundas do comércio exterior chegam ao consumidor final. Uma das tarefas importantes do conjunto de atividades operacionais do Terminal de Contêineres é o Planejamento de Embarque, que pode ser caracterizado como um trabalho voltado à otimização combinatória de recursos e tempos. A quantidade de variáveis presentes nessa otimização é elevada, tornando-se indispensáveis ferramentas de apoio à decisão. Os Algoritmos Genéticos (AG) vêm, ao longo do tempo, sendo bastante empregados em rotinas complexas, principalmente àquelas de difícil modelagem determinística, ou que nesse tipo de abordagem os tempos computacionais tornem a solução impraticável. A proposta deste trabalho foi a construção de um AG que refletisse o mais fielmente possível a realidade do Terminal de Contêiner, ou seja, buscou-se contemplar o maior número de variáveis e restrições conhecidas para o processo. Uma rotina que se assemelha a processos de busca local, denominada rotina reparadora, foi também utilizada com o intuito de acelerar a convergência para o espaço de busca de soluções factíveis, melhorando a performance geral. Os resultados das simulações, para o conjunto de contêineres utilizado, mostraram que a técnica empregada é apropriada, considerando as características das melhores soluções e os tempos computacionais obtidos. Os trabalhos futuros sugeridos tornariam a proposta ainda mais aderente à prática cotidiana do Terminal de Contêiner.

Palavras-chave: Algoritmo Genético; Otimização; Terminal; Planejamento de Embarque; Contêiner.

ABSTRACT

In globalization times, the international trade becomes part of day-by-day of the people. With this continuous increasing of the importation and exportation activities, the logistic chain starts to have vital and indispensable role. Containers Terminal is an important component of the international logistic chain; multimodal interface that handles mainly with goods of the maritime modal (ship), become one of the responsible by the agility and the cost that the goods that are destined and came from foreign commerce reaches the final consumer. One of the more important tasks of the Container Terminal operational activities is the Stowage Planning, which can be characterized as a work of the optimize resources and schedules. The large amount of variables in these optimizations becomes decision support tools indispensable. Genetic Algorithms (GA) have being successfully used in complex problems, mainly which deterministic modeling is difficult, or if this approach brings computational times that becomes solutions infeasible. The proposal of this work was the implementation of the GA that could enclose the Container Terminal reality, with the complete and the large number of variables and restrictions known for the Stowage Planning process. In the GA developed was used also a routine that seems the local search process, called repaired routine, intending to speed up the convergence to the feasible solutions space, improving the general performance. With the container set used, the simulations results showed that the employed technique is appropriate, considering the characteristics of the best solutions and the computational times. Future works suggested would become the proposal still more adherent to daily run of the Container Terminal.

Key words: Genetic Algorithms; Terminal; Optimization; Stowage Planning; Container.

PUBLICAÇÕES

A seguir, são apresentadas as publicações e/ou submissões resultantes deste trabalho.

PIVA, M. L., KEIJI, Y. **Otimizando o Planejamento de Embarque em Terminais de Contêineres usando Algoritmos Genéticos**. Congresso Brasileiro de Automática 2008 (CBA), Juiz de Fora/MG, 2008.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I **1**

1. INTRODUÇÃO **1**

1.1. Considerações Iniciais 1

1.2. Contribuições deste trabalho 3

1.3. Objetivos 4

1.4. Organização da Dissertação 5

CAPÍTULO II **6**

2. TERMINAL DE CONTÊINERES E O PLANEJAMENTO DE EMBARQUE 6

2.1. Introdução 6

2.2. Terminal de Contêineres: Histórico e Foco de Mercado 6

2.2.1. Tipos de Terminais 9

2.2.2. O Contêiner 9

2.2.3. Principais Operações: Descarga e Embarque 10

2.3. O Planejamento de Embarque 13

2.3.1. Arranjo da área de armazenagem (pátio) 15

2.3.2. Os equipamentos de pátio 19

2.3.3. A estrutura e arranjo do navio 22

2.3.4. Os equipamentos para operação do navio 25

2.3.5. A estabilidade do navio 27

2.3.6. Demais restrições envolvidas no planejamento 28

2.3.7. O processo de planejamento manual e/ou assistido 29

2.4. Considerações Finais 30

CAPÍTULO III **32**

3. ALGORITMOS GENÉTICOS E PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO. **32**

3.1. Introdução 32

3.2. Fundamentos de um Algoritmo Genético (AG) 32

3.2.1. História dos AG's 33

3.2.2. As bases genéticas e evolucionárias 33

3.2.3. Principais conceitos e definições 34

3.2.4. Funcionamento básico do AG 35

3.2.4.1. Critérios de Seleção 38

3.2.4.2. Operadores de Cruzamento 39

3.2.4.3. Mutação 42

3.2.4.4. Avaliação do Indivíduo 44

3.2.4.5. Condições de Parada 45

3.3. Aplicações dos Algoritmos Genéticos 46

3.4. Problemas de Otimização 47

3.4.1. Complexidade dos problemas 47

3.4.2. Otimização multi-objetivos 49

3.4.3. Manuseio de restrições 50

3.4.4. Problemas relacionados 52

3.5. Considerações Finais 53

CAPÍTULO IV **54**

4. IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO **54**

4.1. Introdução 54

4.2. Tecnologias empregadas 55

4.3. Estrutura do Cromossomo, codificação e decodificação 57

4.4. Construção da População 59

4.5. Operadores Genéticos (Seleção, Cruzamento e Mutação). 60

4.6. Avaliação da Solução (Fitness) e as Restrições 61

4.7. Rotina de reparação 70

4.8. Funcionamento básico 72

4.8.1. Dados utilizados 72
4.8.2. Parâmetros e processamento 79
4.8.3. Saídas 81
4.9. Considerações Finais 83

CAPÍTULO V 84
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 84
5.1. Introdução 84
5.2. Simulações 84
5.3. Breve análise dos resultados encontrados 95
5.4. Trabalhos relacionados 96
5.5. Considerações Finais 99

CAPÍTULO VI 100
6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 100
6.1. Introdução 100
6.2. Conclusões 100
6.3. Trabalhos Futuros 101

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 103

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Layout geral de um Terminal de Contêineres 8
Figura 2.2: Fluxo geral de descarga em um Terminal de Contêiner 11
Figura 2.3: Fluxo geral de embarque em um Terminal de Contêiner 13
Figura 2.4: Área de armazenagem (pátio) – Rodrimar S/A..... 16
Figura 2.5: Representação esquemática de uma quadra do Pátio 18
Figura 2.6: Representação esquemática dos endereços (quadra A)..... 18
Figura 2.7: Equipamento de Pátio – ReachStacker 20
Figura 2.8: Equipamento de Pátio – RTG (Rubber Tyred Gantry) 21
Figura 2.9: Pátio com Transteineres nas quadras (indicados pelas letras)..... 22
Figura 2.10: Navio com seus bays (on deck e in hold) 24
Figura 2.11: Navio com seus bays, rows e tiers (visão popa à proa) 24
Figura 2.12: Visão de um bay com interferências estruturais do navio 25
Figura 2.13: Operação de Navio com MHC (Mobile Harbor Crane) 26
Figura 2.14: Operação de Navio com Portêiner (QC – Quay Crane) 27
Figura 2.15: Considerações sobre estabilidade do navio (KANG, 2002)... 28
Figura 2.16: Interface Sistema Navis 30
Figura 3.1: Fluxo básico do AG geracional 37
Figura 3.2: Crossover de um e dois pontos de corte 40
Figura 3.3: Partially-Mapped Crossover (PMX) 41
Figura 3.4: Order Crossover (OX)..... 41
Figura 3.5: Cycle Crossover (CX) 42
Figura 3.6: Mutação swap 43
Figura 3.7: Mutação por inserção 44
Figura 3.8: Mutação por embaralhamento de sublista 44
Figura 4.1: Netbeans IDE™ 55
Figura 4.2: MySQL Query Browser™ 56
Figura 4.3: MySQL Administrator™ 57

Figura 4.4: Cromossomo exemplo..... 58
Figura 4.5: Vetores de codificação e decodificação de Contêineres
e Slots..... 59
Figura 4.6: Geração dos genes (população inicial) 60
Figura 4.7: Aplicação de pesos (*Fitness*)..... 70
Figura 4.8: Ação da rotina reparadora de cromossomo..... 71
Figura 4.9: Ocupação de pátio 1, quadra A 73
Figura 4.10: Ocupação de pátio 2, quadra A 74
Figura 4.11: Ocupação de pátio 3, quadra A 74
Figura 4.12: Loading List viagem 1..... 75
Figura 4.13: Loading List viagem 2..... 76
Figura 4.14: Loading List viagem 3..... 77
Figura 4.15: Portos de Escala 78
Figura 4.16: Bay 3-2 78
Figura 4.17: Bays disponíveis (plano de carga)..... 79
Figura 4.18: Configuração do AG 80
Figura 4.19: Parâmetros gerais 81
Figura 4.20: Lista de Embarque 82
Figura 4.21: Console de acompanhamento do processamento 82

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Legenda interpretativa da figura 4 17
Tabela 2.2: Restrições indispensáveis 29
Tabela 2.3: Restrições não desejáveis (minimizáveis) 29
Tabela 4.1: Variáveis relacionadas ao Pátio 63
Tabela 4.2: Varíavies relacionadas aos Portos de escala 63
Tabela 4.3: Variávies relacionadas aos Contêineres a Embarcar 63
Tabela 4.4: Variávies relacionadas ao Navio..... 64
Tabela 4.5: Tabela de Pesos e Valores Aplicados 69
Tabela 4.6: Contêineres viagem 1 75
Tabela 4.7: Portos viagem 1 75
Tabela 4.8: Contêineres viagem 2 76
Tabela 4.9: Portos viagem 2 76
Tabela 4.10: Contêineres viagem 3 76
Tabela 4.11: Portos viagem 3 77
Tabela 4.12: Parâmetros AG 80
Tabela 5.1: Parâmetros Gerais das Simulações 85
Tabela 5.2: Primeira Simulação – Primeiro Grupo 87
Tabela 5.3: Segunda Simulação – Primeiro Grupo 87
Tabela 5.4: Terceira Simulação – Primeiro Grupo..... 88
Tabela 5.5: Primeira Simulação – Segundo Grupo 88
Tabela 5.6: Segunda Simulação – Segundo Grupo 89
Tabela 5.7: Terceira Simulação – Segundo Grupo..... 89
Tabela 5.8: Primeira Simulação – Terceiro Grupo..... 90
Tabela 5.9: Segunda Simulação – Terceiro Grupo..... 90
Tabela 5.10: Terceira Simulação – Terceiro Grupo 91
Tabela 5.11: Primeira Simulação – Quarto Grupo 91
Tabela 5.12: Segunda Simulação – Quarto Grupo 92
Tabela 5.13: Terceira Simulação – Quarto Grupo 92

Tabela 5.14: Síntese dos trabalhos relacionados 98

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1: Evolução AG sem rotina reparadora 93
Gráfico 5.2: Evolução AG com rotina reparadora (1ª. Geração)..... 94
Gráfico 5.3: Evolução AG com rotina reparadora (Todas as Gerações) ... 94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PNB: Produto Nacional Bruto

LIFO: Last-in, First-out

AG: Algorítmo Genético

DNA: Deoxyribonucleic acid

NP: nondeterministic polynomial

OX: Order crossover

PMX: Partially-Mapped Crossover

CX: Cycle Crossover

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

O transporte é parte integrante indissociável da cadeia de suprimento, como considera CHOPRA (CHOPRA, MEINDL, 2003). Complementarmente ao transporte, no caso do transporte aquaviário, é necessário um manuseio especial dos itens transportados, principalmente por tratar-se de itens de grande volume e peso, necessitando-se de empresas especializadas e com equipamentos de grande porte.

Em tempos de globalização, o comércio internacional se torna, cada vez mais, parte do dia-a-dia de todas as pessoas. O comércio mundial aumentou nas últimas décadas em volume absoluto, valor e importância relativamente ao PNB[1] ou a outros indicadores da vida econômica (LANARI, 1999). Com este aumento crescente das atividades de importação e exportação, a cadeia logística passa a ter papel vital e indispensável. Um Terminal de Contêineres é um importante elo da cadeia logística internacional. Caracterizado como uma interface multimodal[2], é responsável pela agilidade com que as mercadorias oriundas e/ou destinadas ao comércio exterior são manuseadas.

Uma das atividades que mais influenciam na agilidade de um Terminal de Contêiner é a do Planejamento de Embarque. Esta atividade é parte integrante dos processos de manuseio das cargas para exportação e é ela que

[1] PNB: Produto Nacional Bruto. Mede a produção nacional, entendida como tal a dos seus fatores de produção, independentemente do país em que atuem (MACEDO, 2004).
[2] Interface Multimodal: terminal que opera entre dois ou modais de transporte (rodoviário, ferroviário, aéreo ou marítimo).

dita, principalmente, como será a performance geral da operação. O Planejamento de Embarque pode ser visto como uma série de processos logísticos menores, iniciando no recebimento de documentos e finalizando com os relatórios e memorandos gerais do embarque dos contêineres em um determinado navio. A atividade principal do Planejamento de Embarque é a execução do embarque propriamente dito, ou seja, inicia-se a remoção dos contêineres que estão acondicionados no pátio do Terminal de Contêineres e procede-se a entrega em área próxima ao navio (costado) para que eles sejam acondicionadas a bordo da embarcação. Os contêineres no pátio são armazenados em pilhas, uns sobre os outros, o que restringe o livre movimento a somente o contêiner no topo da pilha (LIFO[3]); um processo pode conter aproximadamente uma centena de contêineres a embarcar. Cada contêiner que pertencente ao processo de embarque tem como destino o navio, que tem conformação parecida para acondicionamento: espaços divididos em pilhas, ou seja, espaços onde serão armazenados contêineres também uns sobre os outros.

O acondicionamento dos contêineres no navio deve satisfazer diversas restrições, dentre elas uma que deriva diretamente da característica LIFO: um navio, normalmente, está em viagem de escala, ou seja, está obedecendo a um itinerário definido anteriormente (KEEDI, 2002). O porto que está executando a operação de embarque de contêineres pode estar no meio da rota definida para o navio, sendo que nos próximos portos a serem visitados poderá haver descarga de diversas unidades; posições de embarque mal planejadas podem gerar desnecessárias remoções no manuseio da unidade a ser desembarcada.

Além desta importante restrição da operação, ainda deseja-se otimizar a performance, tanto dos equipamentos que fazem o manuseio dos contêineres para bordo do navio, quanto dos equipamentos que realizam a remoção dos contêineres armazenados no pátio do Terminal de Contêineres. As citadas são as restrições mínimas; é preciso enfatizar que o Planejamento de Embarque também deve contemplar outros aspectos, como a estabilidade do navio, a

[3] LIFO: *Last-in, First-out*, ou, o último a entrar é o primeiro a sair.

distância percorrida pelo recurso de bordo, as posições especiais a bordo, e outros (DUBROVSKY; LEVITIN; PENN, 2002), que serão mais bem detalhadas no decorrer deste trabalho.

Têm-se, portanto, objetivos conflitantes e de difícil balanceamento. Como citado por Dubrovsky (DUBROVSKY; LEVITIN; PENN, 2002) alguns trabalhos propõe soluções para este tipo de problema utilizando programação linear. Mas, encontrar soluções ótimas utilizando estes modelos é um tanto limitado, principalmente relativamente aos tempos computacionais, devido ao grande número de variáveis e restrições necessárias para sua formulação.

Conforme citado por Linden (LINDEN, 2006), os Algoritmos Genéticos podem ser adotados sempre que houver uma necessidade de busca e otimização, destacando, contudo, que aquelas situações onde pode ser aplicado um algoritmo exato devem ser assim feito. Como já comentado, no problema abordado algoritmos exatos podem não apresentar a eficiência necessária devido ao vasto espaço de busca.

O foco para a realização deste trabalho foi abranger todo o espaço de busca, ou seja, não sendo trabalhada nenhuma segmentação de área nem de pátio nem de navio. Além do espaço de busca total, procurou-se abarcar toda a gama de restrições que estão presentes no problema, exceto a quantidade de equipamentos presentes na operação. Com esta abordagem ampla o que se buscou foi uma metodologia que pudesse tratar o problema em todos os seus aspectos, incluindo todas as características presentes no mundo real.

1.2. Contribuições deste trabalho

Este trabalho almeja contribuir criando uma proposta que visa reduzir os custos totais da operação de embarque de contêineres em um Terminal de Contêineres. Pretende-se mostrar como os Algoritmos Genéticos podem se caracterizar como importante tecnologia que deve ser considerada nos processos de otimização e como esta tecnologia pode contribuir para solucionar o problema do Planejamento de Embarque de contêineres.

Pretende-se ainda contribuir para o aumento do conhecimento de uma área bastante importante para a economia do país, que é o comércio exterior, focando um dos seus principais atores, o Terminal de Contêineres.

1.3. Objetivos

O objetivo deste trabalho é tratar o Planejamento de Embarque a partir do momento em que os contêineres encontram-se armazenados no Terminal de Contêineres em sua área de retaguarda, denominada área de armazenagem ou pátio. Com a operação de um navio agendada já é possível iniciar o Planejamento de Embarque, mesmo antes da sua atracação efetiva. É fornecido pelo transportador um plano de carga indicando como deve ser operado o seu navio. Com olhar direcionado exclusivamente à operação de embarque, neste plano constarão os contêineres que devem ser embarcados e, caso hajam, condições específicas de acondicionamento no navio.

Este trabalho visa, de posse deste plano de carga, auxiliar na obtenção de um seqüenciamento otimizado de remoção dos contêineres do pátio, concomitantemente à sugestão otimizada do acondicionamento destes contêineres no navio. Para atingir este objetivo principal, assim foram definidas as tarefas intermediárias:

1. Construir um modelo que reflita tanto a estrutura do pátio como a estrutura do navio;
2. Criar uma base de dados lógica que pudesse armazenar e garantir a persistência dos dados para as simulações;
3. Identificar uma codificação para o Algoritmo Genético que facilitasse sua compreensão e aplicação dos operadores;
4. Obter dados reais para as simulações propostas;
5. Criar uma interface para gerar as soluções em forma de listas para validação das restrições;
6. Disponibilizar, na mesma interface, a evolução das variáveis da solução para avaliação.

1.4. Organização da Dissertação

Dividiu-se esta em seis capítulos, descritos abaixo de forma sucinta:

Capítulo I – Introdução: são apresentadas as considerações iniciais do trabalho, assim como a motivação, os objetivos, bem como a organização da dissertação;

Capítulo II – Terminal de Contêineres e o Planejamento de Embarque: neste capítulo é feita a contextualização de um Terminal de Contêineres, seu foco de mercado, principais processos, dentre eles, destacando o Planejamento de Embarque e suas premissas;

Capítulo III – Algoritmos Genéticos e Problemas de Otimização: o objetivo deste capítulo é fazer uma revisão dos conceitos de Algoritmos Genéticos, suas características fundamentais, principalmente no que concerne a problemas de otimização;

Capítulo IV – Implementação da Solução: aqui são apresentadas as fases para a confecção da solução informatizada objeto deste estudo;

Capítulo V – Resultados e Discussões: apresenta as análises dos resultados para o conjunto de dados propostos, bem como as discussões do modelo proposto;

Capítulo VI – Conclusão e Trabalhos Futuros: descreve as conclusões do trabalho e deixa as sugestões de trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

2. TERMINAL DE CONTÊINERES E O PLANEJAMENTO DE EMBARQUE

2.1. Introdução

Terminal de Contêineres é um dos atores mais importantes presente no contexto do comércio exterior, agindo principalmente onde há presença de grandes volumes de carga, para importação ou exportação. Neste capítulo serão tratadas as suas características estruturais principais, bem como o foco principal do trabalho, que é o Planejamento de Embarque, mostrando as variáveis e restrições intrínsecas à problemática.

2.2. Terminal de Contêineres: Histórico e Foco de Mercado

O transporte marítimo tem predominado sobre os demais modais e com perspectivas de ainda continuar mantendo esta posição pelos próximos anos (KEEDI, 2002). De forma geral, sobre o tema transporte, há um consenso de que vias marítimas, fluviais e lacustres, por envolverem forma natural de transporte, sejam mais baratas relativamente à outras modalidades, como o aéreo, por exemplo (LANARI, 1999). Também, pelo tipo e conformação da carga transportada (peso e volume) não haveria possibilidade de transportá-la de forma adversa à marítima.

Conforme destacado por Keedi (KEEDI, 2002), embora o transporte marítimo deva ser considerado um meio de transporte excepcional, e apresente

boas vantagens, como é normal, também possui suas desvantagens, pois embora seja rápido considerando as grandes quantidades deslocadas, é relativamente lento para os padrões e necessidades modernos, com viagens muito longas, em face da necessidade de escalas em muitos portos. Hoje, conforme citado por Dubrovsky (DUBROVSKY; LEVITIN; PENN, 2002), um navio porta-contêineres moderno pode transportar 5000 contêineres ou mais e visitar de 10 a 25 portos em uma única viagem.

É atividade dos Terminais de Contêineres o embarque e desembarque de mercadorias em navios atracados em áreas sob sua responsabilidade. A Lei 8630 de 1993 (BRASIL, 1993), a chamada “Lei dos Portos”, dispõe sobre o regime jurídico de exploração dos portos organizados e das instalações portuárias, qualificando a figura do Terminal de Contêineres como o responsável por toda a movimentação e armazenagem de mercadorias destinadas ou provenientes de transporte aquaviário, neste ensejo, cargas conteinerizadas.

Um Terminal de Contêineres é um empreendimento que pode ser comparado à uma indústria, onde uma grande variedade de atividades ocorrem paralelamente. O propósito principal das atividades é transferir cargas em contêineres o mais rápido e eficientemente possível entre os modais em que faz interface. No Brasil, a principal interface realizada pelo Terminal de Contêineres é entre o modal rodoviário e o modal marítimo.

De forma geral, um Terminal de Contêineres é composto fisicamente, além da área de armazenagem (pátio), que será melhor detalhada à frente, pelo cais e berços, que são as estruturas onde os navios se dispõem após a atracação para a operação. Os navios que chegam irão atracar no berço mais conveniente, ou num berço livre que possa recebê-lo. Caso não haja berços livres, ou pelo menos berços livres adequados à operação do navio em questão, este navio irá para uma fila de navios aguardando atracação, como explicado por Fernandes (FERNANDES, 2001).

A figura 2.1 resume o layout geral do Terminal de Contêineres:

- Área 1 (área de atracação de navios): representam os berços de atracação; área de águas dividida lógica e fisicamente para admitir navios para a operação;
- Área 2 (área de operação de navios): é a área física onde os equipamentos de terra estão conformados para executarem as operações de carga e descarga dos contêineres diretamente para os navios. O destino de contêiner que está no navio pode ser área intermediária em solo ou diretamente um caminhão que o levará até a área de armazenagem (pátio);
- Área 3 (área de armazenagem de contêineres): é onde ficam acondicionados os contêineres que são descarregados do navio aguardando posterior destinação (destinação final – dono da mercadoria ou seu representante) ou os contêineres que estão aguardando para serem embarcados em navio específico;
- Área 4 (*gates* de entrada e saída de contêineres): são os "portões" físicos de controle de entrada e saída de contêineres de um Terminal de Contêineres.

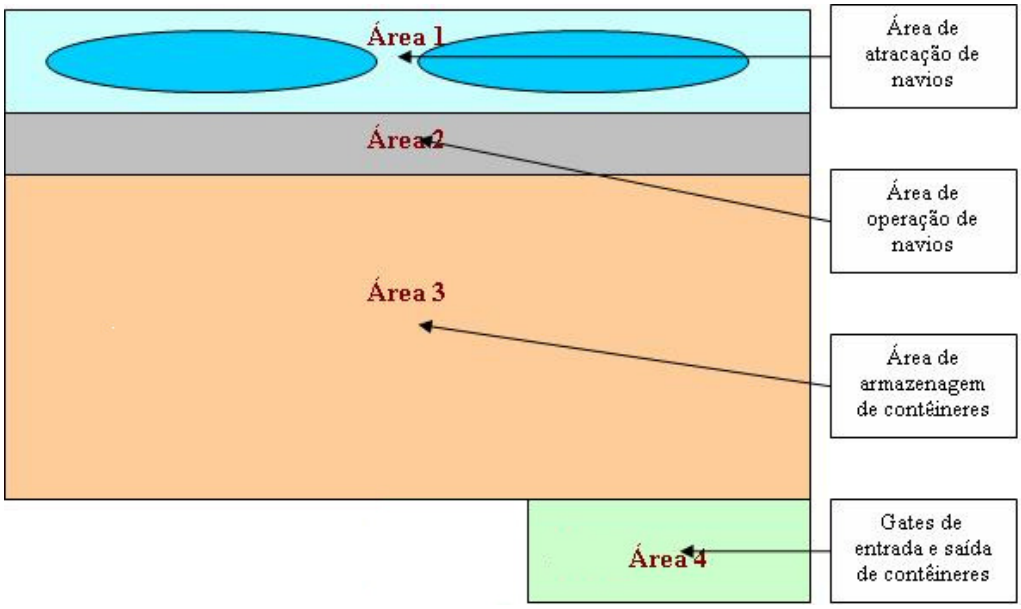


Figura 2.1: Layout geral de um Terminal de Contêineres

2.2.1. Tipos de terminais

O Terminal de Contêiner, elemento principal da operação, pode ser dividido em dois tipos principais (PAIVA, 2006):

a. Terminais Regionais: objetivam principalmente o atendimento, distribuição e recebimento de contêineres das regiões geograficamente próximas, ou que sejam atendidas por determinado porto e sua rede de transportes (*hinterland*);

b. Terminais Concentradores (*Hub Ports*): neste tipo de arranjo o foco está na possibilidade de recebimento de navios de grande porte, que podem ter suas escalas (portos visitados) reduzidas, sendo os contêineres transbordados para navios menores (*feeders*), estes últimos destinados aos terminais regionais;

2.2.2. O contêiner

A unidade de manuseio das mercadorias é o contêiner, importante e versátil unidade de carga, que atende aos desejos dos embarcadores e consignatários das cargas por sua facilidade de movimentação e segurança (KEEDI, 2002). Os Terminais de Contêineres são empresas especializadas na movimentação dos contêineres e possuem, para tanto, equipamentos adequados à essa prática.

Os contêineres podem comportar diferentes tipos de mercadorias e, para isso, se apresentam em tipos diversos, adequados as mais diversas situações. Os contêineres são divididos em dois grandes grupos: os fechados e os abertos. Os contêineres fechados são os mais comuns, e apresentam-se em várias configurações, podendo ter apenas uma porta numa de suas extremidades, ou também escotilhas no seu teto ou até mesmo pequenas aberturas laterais. O segundo grupo, os contêineres abertos, tem ausência de

alguma de suas paredes ou teto e alguns possuem apenas o piso; eles são especialmente utilizados para mercadorias fora de especificação, ou que não podem ser acondicionadas pela porta lateral, ou ainda pelo seu grande peso que dificulta seu manuseio por equipamentos convencionais (KEEDI, 2002).

Os contêineres são padronizados na medida inglesa pés (*feet*) representada por uma aspa (’). Os mais comumente utilizados são os de 20’ e de 40’, em virtude da padronização de navios com suas baias para ambas as unidades, sendo que o de 40’ pode transportar duas unidades de 20’. As unidades de 20’ são utilizadas como uma unidade-padrão, representando um TEU – *Twenty Feet or Equivalent Unit* (unidade de vinte pés ou equivalente), utilizadas para medição de capacidade de navios, pátios, movimentação, etc. (KEEDI, 2002).

2.2.3. Principais Operações: Descarga e Embarque de Contêineres

Como já mencionado na introdução deste capítulo, os Terminais de Contêineres estão totalmente inseridos no contexto do comércio exterior; são fortes atuantes nas operações de Importação e Exportação de mercadorias. Também são interfaces presentes na operação de Cabotagem[4], utilizando o modal marítimo, ao contrário das operações de Importação e Exportação, consideradas viagens de longo-curso. Serão chamados adiante somente como processos de descarga ou embarque de mercadorias, não identificando à qual operação efetivamente estamos relatando, por possuírem, do ponto de vista operacional, as mesmas características.

Os processos gerais executados pelo Terminal de Contêineres para a operação de descarga estão identificados na figura 2.2. Toda a operação inicia-se com a interação documental que, em boa parte, diz como estão conformadas as cargas a bordo do navio. Fazem parte destes documentos a

[4] Cabotagem: navegação entre portos do mesmo país (transporte costeiro de mercadorias em território nacional) (ONO, 2001).

Lista de Carga (manifesto), o *Bapplie*[5] e a *Restow List*, ou lista de carga para rearranjo de posições a bordo. O que se procede com esses documentos é o Planejamento de Descarga. Ao final do processo de descarga novos documentos serão gerados, evidenciando o relatório geral da operação. São documentos como *Discharging List* (ou lista de descarga), *Restow List* (ou lista de rearranjos de posições a bordo) e os *Tallies*[6], que se assemelham a um relatório detalhado de produção, com os tempos e movimentos efetivos de cada tarefa executada, identificando recursos, pessoas e unidades descarregadas.

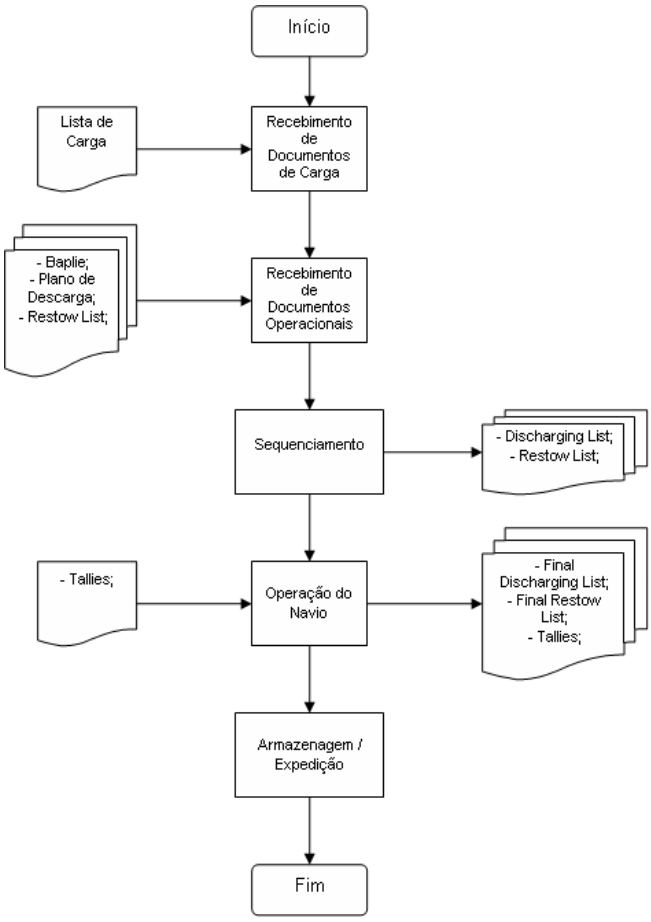


Figura 2.2: Fluxo geral de descarga em um Terminal de Contêiner

[5] Baplie: *Bayplan/Stowage Plan Occupied and Empty Locations Message*. Mensagem eletrônica padronizada por *United Nations Directories for Electronic Data Interchange for Administration, Commerce and Transport* (UN/EDIFACT).

[6] Tallie: Documento em que consta toda a mercadoria ou contêineres embarcados ou desembarcados, incluindo suas características, pesos e volumes.

Os processos para embarque, onde se enquadra o Planejamento de Embarque foco deste estudo, é mostrado na figura 2.3. Inicia-se com recebimento do chamado *Booking* ou nota de reserva, que caracteriza a reserva de espaço (*slot*) em determinado navio que tem atracação anunciada. Após este recebimento eletrônico dá-se o recebimento físico dos contêineres constantes das reservas e são acondicionados em área do pátio denominada área de *Pre-Stacking*, de onde serão posteriormente removidos para o navio. Estes documentos, os mesmos já comentados no processo de descarga, são o Plano de Carga, o *Baplie* e a *Restow List*; nestes documentos constam informações necessárias ao embarque. Face a esses documentos e após a descarga procede-se o sequenciamento para embarque dos contêineres gerando os documentos de conferência que serão submetidos à aprovação do transportador marítimo. A checagem levará em consideração as necessidades específicas do plano de carga e as características estruturais e de estabilidade do navio, que serão melhor discutidas no item “Planejamento de Embarque”. Uma vez finalizada a operação de embarque, os documentos finais gerados serão os mesmos já discutidos no processo de descarga, exceto o *Discharging List*, que desta feita será substituído pelo *Loading List*, o qual fará menção a todos os contêineres embarcados e suas posições finais relativas.

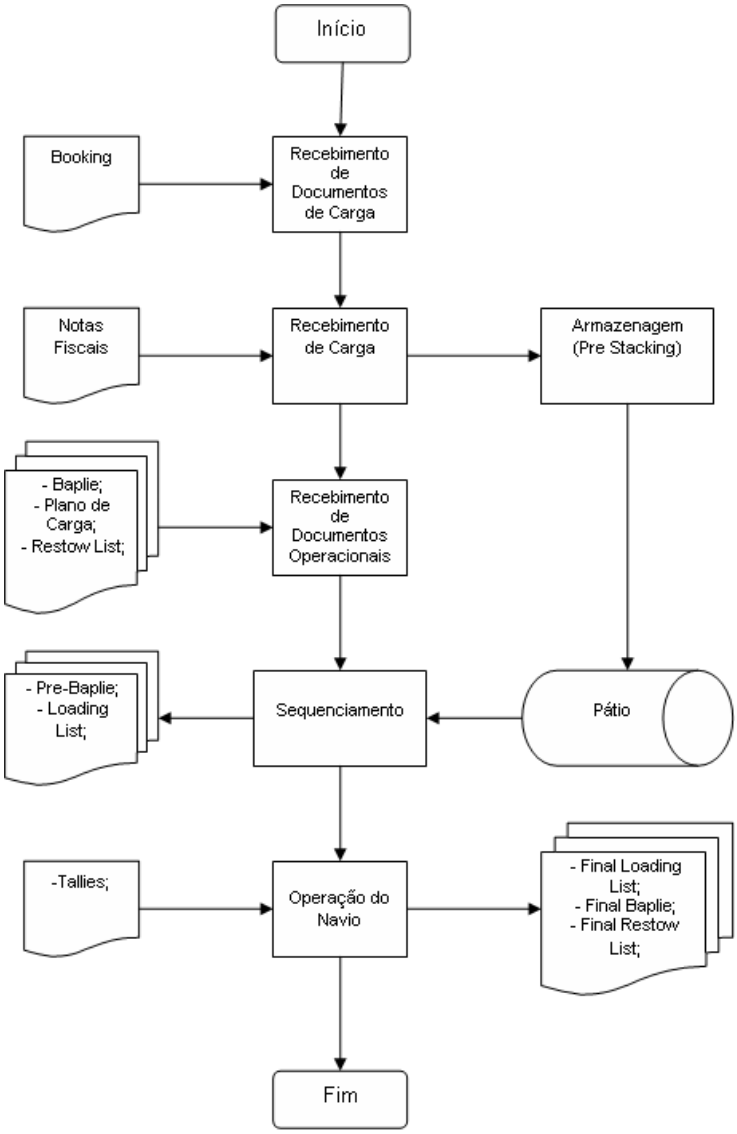


Figura 2.3: Fluxo geral de embarque em um Terminal de Contêiner

2.3. O Planejamento de Embarque

O Planejamento de Embarque é o processo pelo qual o Terminal de Contêineres organiza o embarque dos contêineres que estão destinados a determinado navio. Consiste em, de posse do Plano de Carga e da

conformação atual do navio[7], determinar a ordem com que os contêineres serão removidos do pátio (seqüência), planejar os recursos[8] de pátio que serão utilizados para a remoção dos contêineres, planejar os recursos que serão utilizados no navio e determinar as posições efetivas do navio que cada contêiner ocupará, obedecendo todas as restrições pertinentes.

O primeiro produto do Planejamento de Embarque, o *Pre-Loading List*, será submetido à avaliação do transportador para checagem e aprovação para início de operação. Essa checagem leva somente em conta as posições que cada contêiner ocupará a bordo, fazendo todos os cálculos estruturais e de estabilidade estática, confrontando com as características suportadas pelo navio, considerando ainda todas as margens de segurança para a viagem (estabilidade dinâmica).

Como será destacado a seguir, o Planejamento de Embarque sofre total influência de como e onde os contêineres estão acondicionados no pátio de armazenagem, e também como estão dispostos os contêineres já a bordo do navio.

Das principais dificuldades do processo de Planejamento de Embarque, podem ser citadas:

- Planejar o uso de recursos finitos no pátio e navio;
- Ordenar e minimizar as remoções no pátio;
- Suprir a demanda dos recursos do navio (tempo);
- Manter o navio estável (estabilidade estática);
- Obedecer ao plano de carga;
- Considerar a diversidade de tipos de contêineres;
- Minimizar o retrabalho nos portos de escala; e
- Operar o navio no menor tempo possível.

[7] No momento em que o navio atraca em determinado Terminal de Contêineres normalmente já existem diversos contêineres acondicionados a bordo, necessitando-se saber quais suas características para planejamento do embarque dos novos contêineres.

[8] Deve-se entender como recursos, além de máquinas e equipamentos, todo o contingente operacional, incluindo o pessoal envolvido na operação.

2.3.1. Arranjo da área de armazenagem (pátio)

A área de armazenagem (pátio) de um Terminal de Contêineres é dividida de forma lógica visando ser o mais operacional possível, adequando-se ao seu conjunto de clientes e às características de suas cargas. A figura 2.4 mostra uma área de armazenagem e suas principais divisões. Enfatizando a logística de movimentação dos contêineres, a característica dos equipamentos utilizados para sua movimentação e a característica das mercadorias, o pátio é disposto em quadras. A legenda para interpretação da figura 2.4 está disposta na tabela 2.1.

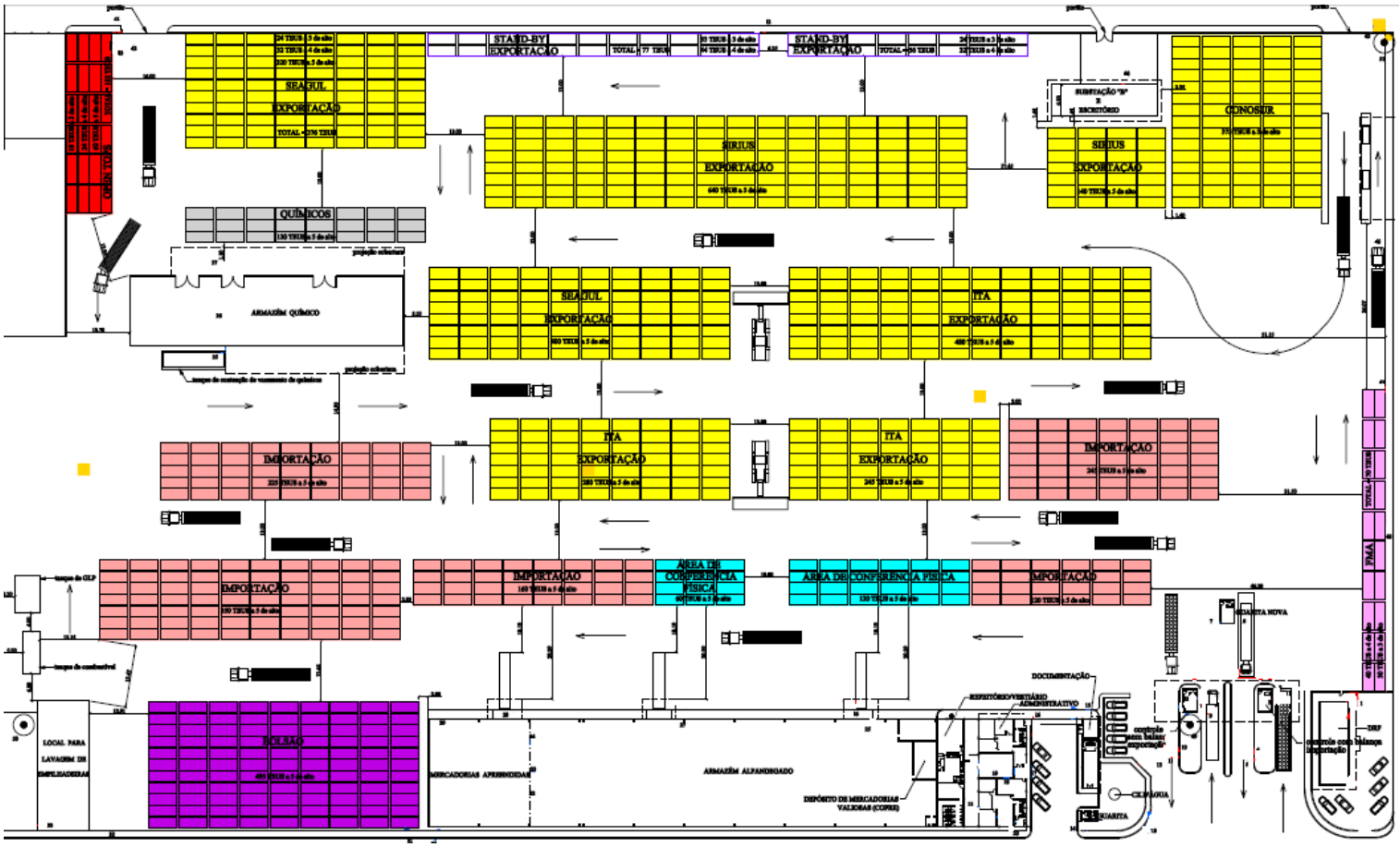


Figura 2.4: Área de armazenagem (pátio) – Rodrimar S/A

	Contêineres especiais (*Open Tops*)
	Contêineres com mercadorias abandonadas
	Área destinada à conferência de carga
	Contêineres com carga perigosa (químicos)
	Contêineres de Importação
	Bolsão interno
	Contêineres para Exportação (*Pre-Stacking*)
	Área de troca (espera)

Tabela 2.1: Legenda interpretativa da figura 4

Esses blocos, denominados quadras, acondicionam os contêineres em alturas variadas, de acordo com os equipamentos escolhidos para realizarem a sua movimentação. No pátio representado na figura 2.4 os contêineres são armazenados em pilhas com cinco unidades (altura 5). A profundidade dessas quadras é relativa aos equipamentos de movimentação e à sua disposição física. Quadras situadas nas laterais do pátio só permitem acesso por um dos lados, exigindo que equipamentos do tipo *Reachstacker* (detalhado no item sobre equipamentos de pátio) encontrem restrições operacionais para movimentação. A figura 2.5 detalha as dimensões geométricas que são assim nomeadas:

x: rua;

y: andar ou altura;

z: fila ou lastro;

Para o conjunto das três dimensões mencionadas mais a identificação da quadra dá-se o nome de endereço de pátio, com capacidade para um contêiner de 20’ ou um TEU. A figura 2.6 mostra uma simplificação dos endereços de uma quadra no pátio (quadra A).

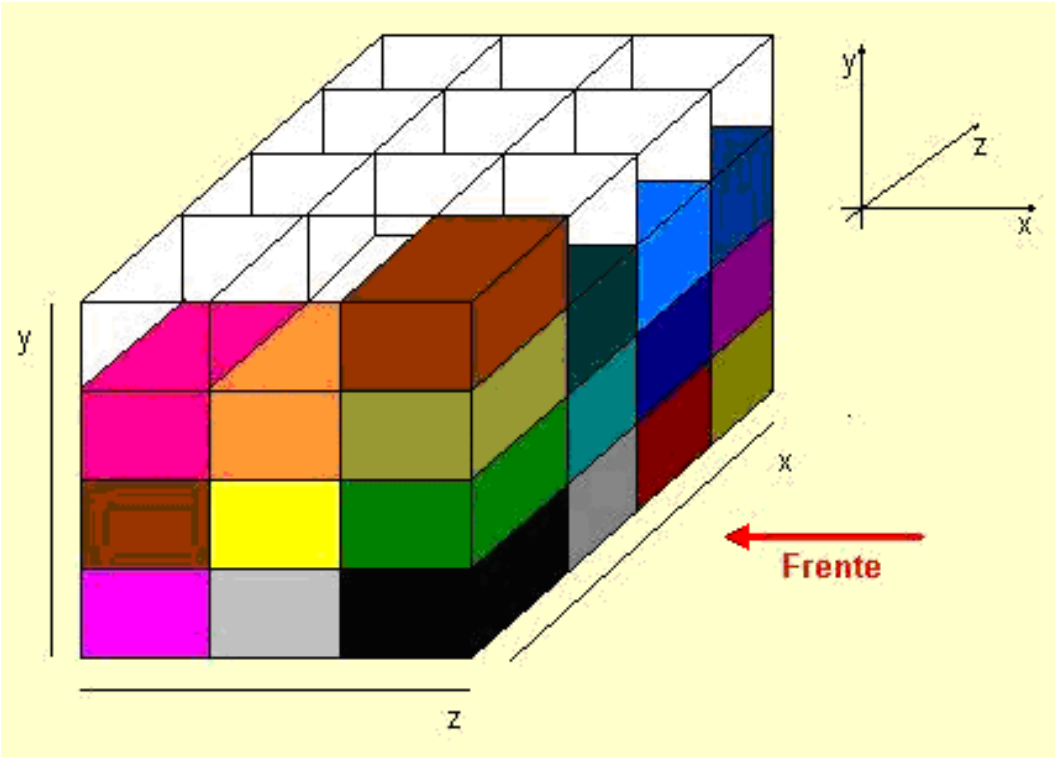


Figura 2.5: Representação esquemática de uma quadra do Pátio

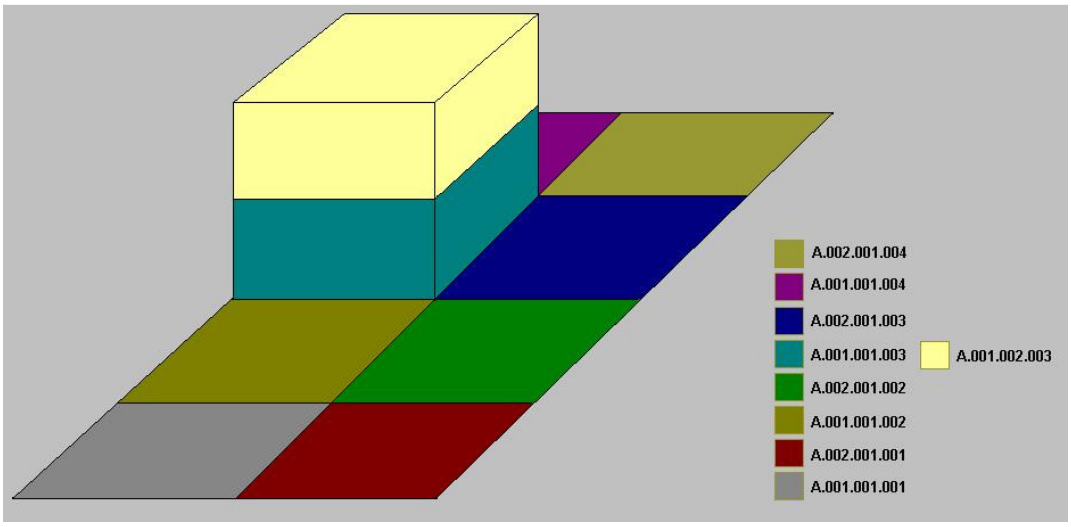


Figura 2.6: Representação esquemática dos endereços (quadra A)

2.3.2. Os equipamentos de pátio

Os equipamentos de pátio são as máquinas que determinam como os contêineres poderão ser acondicionados naquele local e deles derivam também as restrições para as movimentações. Serão detalhados dois dos principais equipamentos de pátio para compreensão sucinta de como os equipamentos influenciam nas movimentações dos contêineres.

O equipamento exibido na figura 2.7 é denominado *Reachstacker*. É uma empilhadeira que faz o içamento dos contêineres pelo seu topo, com o auxílio de um dispositivo denominado *Spreader*[9], que é capaz de se acoplar aos quatros encaixes disponíveis no topo dos contêineres (AGÓS, 1991). Esse equipamento tem capacidade nominal de aproximadamente 40 toneladas, dependendo das suas características técnicas, sendo capaz de empilhar, em média, 5 contêineres cheios, ou seja, manuseia pilhas com 5 alturas. Em altura 5 é somente capaz de movimentar a primeira fila (z) de contêineres, ou seja, sendo necessário remover um contêiner que está na segunda fila, havendo uma fila a sua frente com 5 alturas, é necessário a remoção de alguns contêineres da primeira fila. Não existindo pilhas com altura máxima à frente, esse equipamento é capaz de alcançar contêineres na segunda fila sem necessidade de remoção. Segundo Keedi (KEEDI, 2002), o *Reachstacker* é um equipamento bastante versátil, podendo dirigir-se a qualquer ponto do pátio, mas, em compensação, utiliza mais espaço para movimentar-se, necessitando de ruas de cerca de 12 metros de largura para as manobras.

[9] Spreader: quadro que trava automaticamente na unidade (contêiner) para movimentá-la.

Figura 2.7: Equipamento de Pátio – ReachStacker

O equipamento mostrado na figura 2.8 é chamado de Transteiner ou Guindastes Empilhadores de Contêineres sobre Pneus[10] (RTG – *Rubber Tyred Gantry*) e tem capacidade de movimentar-se sobre rodas, podendo se deslocar, inclusive, de uma quadra à outra. Esse equipamento aumenta a área útil do pátio, já que passa a ser dispensável as divisões (ruas) para passagem de empilhadeiras e caminhões (AGÓS, 1991). Sua capacidade em toneladas e sua característica de içamento de contêineres de assemelham-se às da *Reachstacker*, entretanto pode chegar à qualquer pilha sem necessidade de remoção; somente serão necessárias remoções se o contêiner desejado estiver bloqueado em altura. Ele se movimenta nos dois sentidos e faz a remoção dos contêineres para caminhões em áreas laterais pré-definidas. A perda de versatilidade desse equipamento, como mostrado por Keedi (KEEDI, 2002) está na exigência de empilhamento menor que os *Reachstackers* e na maior dificuldade (lentidão) de deslocamento entre quadras.

[10] O transteiner pode também apresentar-se sobre trilhos.

Figura 2.8: Equipamento de Pátio – RTG (*Rubber Tyred Gantry*)

A figura 2.9 mostra uma configuração de pátio com utilização massiva de Transteineres.

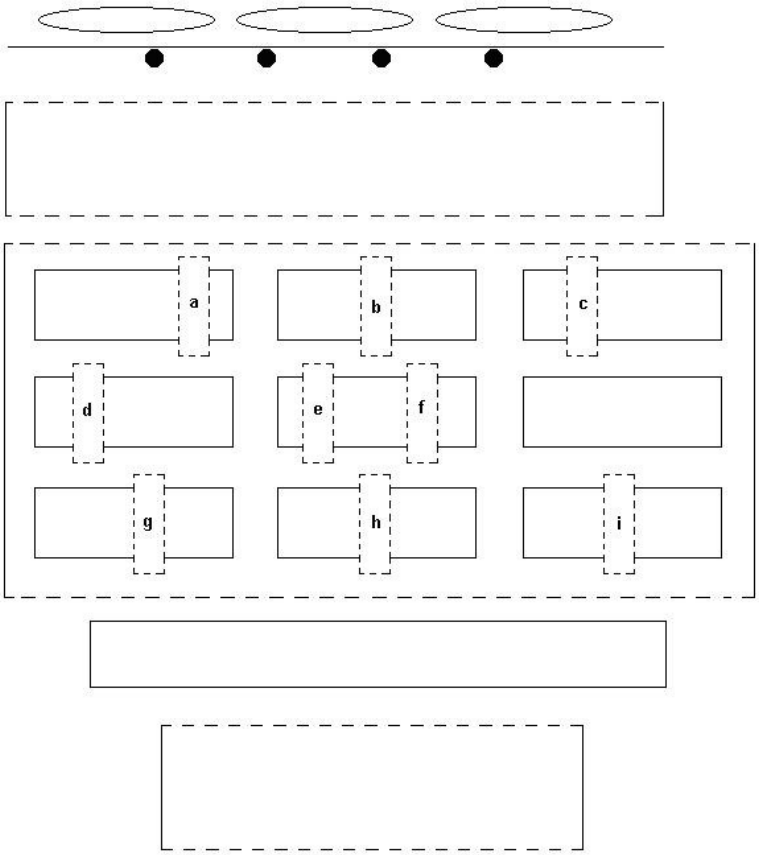


Figura 2.9: Pátio com Transteineres nas quadras (indicados pelas letras)

2.3.3. A estrutura e arranjo do navio

Os navios, veículos utilizados para transporte em vias aquáticas, apresentam diversas características, tipos, tamanhos e possibilidades de transporte de cargas. Eles podem apresentar-se sem equipamentos de bordo, dependentes totalmente dos equipamentos portuários, ou auto-sustentados, possuindo guindastes para auto-operação de embarque e desembarque. Há diferentes tipos de navios, sendo: navios para carga geral, multi-propósitos ou especializados.

Na categoria de carga geral e multi-propósitos estão os navios para carga geral seca e cargas frigorificadas, dotados de porões e *decks* (pisos), podendo transportar cargas as mais diversas. Navios multipropósitos podem

transportar cargas de outros navios de carga geral ou especializados simultaneamente, tornando-os bastante versáteis.

Na categoria dos navios especializados estão os graneleiros para líquidos ou sólidos, divididos também em porões, porém não apresentam divisões em *decks*.

Para transporte de contêineres pode-se utilizar ambas as categorias, ou navios porta-contêineres. Os navios porta-contêineres são especializados somente em transporte de contêineres, não comportando outro tipo de carga. Nestes, as divisões são chamadas de *Bays*, sendo compartimentos que se estendem de bombordo a boreste (bordo a bordo), sendo construídos para a colocação de contêineres de 20' ou 40'. As *bays* são numeradas da proa para o popa em números ímpares e são divididas em colunas para encaixe dos contêineres, denominadas *Rows*, numeradas a partir do centro para os bordos (bombordo e boreste), com um lado ímpar e outro lado par. No empilhamento dos contêineres no navio são formadas as camadas, que são denominadas *Tiers*[11]. O conjunto destas três denominações forma as alocações para os contêineres, denominadas *Slot* (*bay-row-tier*). O contêiner é armazenado (estivado) longitudinalmente, de proa para popa, alinhando-se ao navio. Ao se colocar dois contêineres de 20' juntos, por exemplo, temos uma unidade no *bay* 9 e outra no *bay* 11. Se o contêiner for de 40', esses dois *bays* se transformarão em um *bay* par, indicando que o contêiner está alocado no *bay* 10 (contêineres de 20' em *bays* ímpares e contêineres de 40' em *bays* pares) (KEEDI, 2002). A figura 2.10 mostra o navio com seus *bays*.

[11] Convencionalmente, as *tiers* são numeradas de 02 a 18 *in hold* (abaixo do *deck*) e de 80 a 96 *on deck* (acima do *deck*).

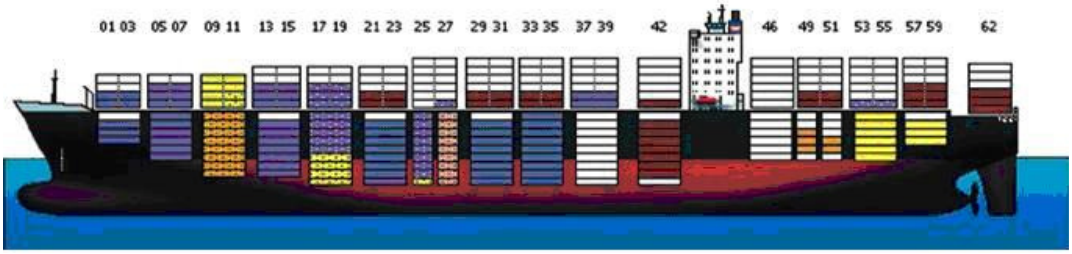


Figura 2.10: Navio com seus *bays* (*on deck* e *in hold*)

A figura 2.11 proporciona outra visão do navio com seus *bays*, em novas perspectivas (visão de popa à proa) onde é possível também destacar as numerações das *rows* e *tiers*. Destacados na figura três *slots*, respectivamente, da esquerda para direita: *slots* 531212, 530788 e 551184 (considerando contêineres de 20').

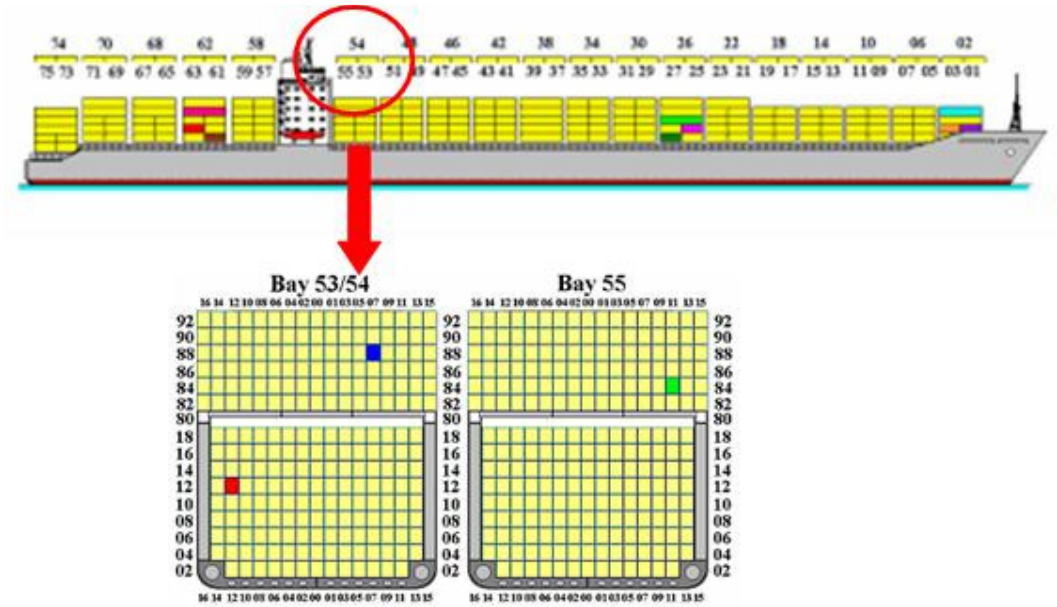


Figura 2.11: Navio com seus *bays, rows e tiers* (visão popa à proa)

Nem todo o espaço aparentemente disponível no navio pode ser utilizado para alocação de contêineres. A figura 2.12 apresenta a visão de um

bay que é limitado em algumas posições devido à interferências estruturais do navio.

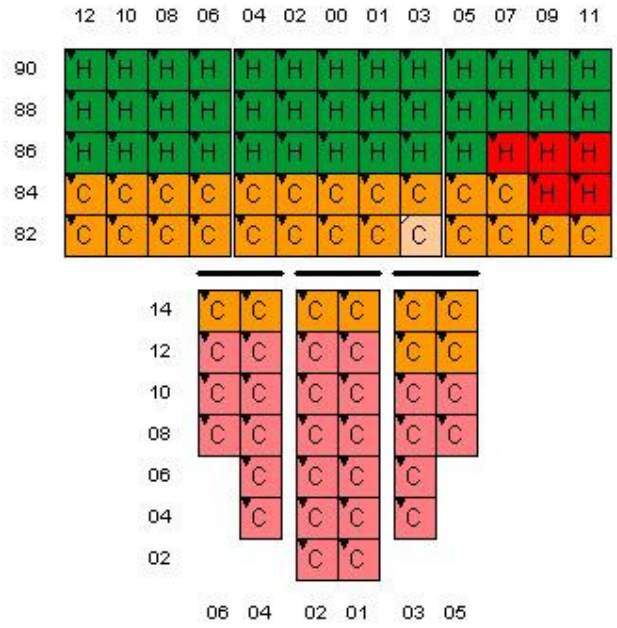


Figura 2.12: Visão de um *bay* com interferências estruturais do navio

2.3.4. Os equipamentos para operação do navio

Os equipamentos de terra convencionalmente utilizados para operação dos navios são, principalmente, os guindastes MHC (*mobile harbor crane*) como os exibidos na figura 2.13. Esses equipamentos têm capacidade para manuseio de cargas com grande peso e volume.

Figura 2.13: Operação de Navio com MHC (*Mobile Harbor Crane*)

Outro equipamento de terra utilizado na operação são os denominados Portêineres (QC – *Quay Crane*) que tem funcionamento similar aos *Reachstackers* e Transteineres já comentados anteriormente, porém somente utilizados para embarque e desembarque de contêineres em navios (figura 2.14). Estes equipamentos tem relativa flexibilidade para se mover de um berço de atracação a outro (RASHIDI, 2004).

Existe relativa vantagem em performance de movimentação dos Portêineres em relação aos guindastes. Os Portêineres, dada a sua estrutura e disposição, são capazes de operar mais rapidamente que os guindastes.

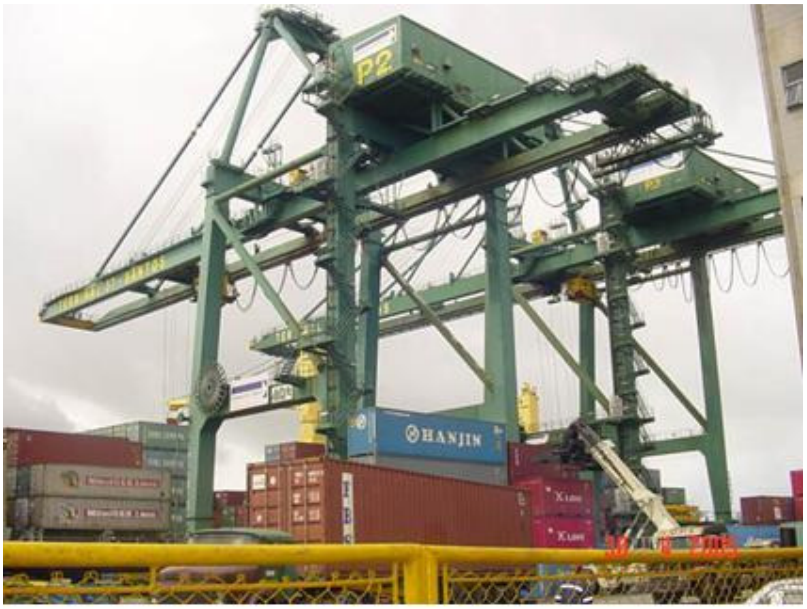


Figura 2.14: Operação de Navio com Portêiner (QC – *Quay Crane*)

2.3.5. A estabilidade do navio

Conforme explicado por Kang (KANG, 2002), para assegurar a estabilidade de um navio de contêineres o plano de embarque deve satisfazer várias restrições. Um navio se torna instável se a distribuição de peso vertical, transversal ou longitudinal estiver excessivamente desbalanceada. Em casos de plano de embarque provocar instabilidade do navio, rearranjos de contêineres devem ser promovidos.

Ainda segundo Kang (KANG, 2002), vários são fatores para cálculo da estabilidade do navio, mas três os considerados mais importantes, a altura do metacentro (GM), *heel* e *trim*. GM (figura 15 – (a)) é definido com a distância do centro de gravidade (G) e o metacentro do navio (M). Para um navio estável, GM deve ser maior que o mínimo permitido para a altura do metacentro do navio, caso contrário o navio poderá emborcar (*capsized*). *Heel* (figura 15 (a)) é a inclinação do navio para lado mar ou lado terra. Deve sempre ficar em torno de zero, em relação a linha central do navio. E finalmente *trim* (figura 15 (b)) diz respeito a diferença de inclinação proa-popa (ou vice-versa). Deve assumir

valores próximos a zero ou dentro dos limites de performance do navio. A figura 2.15 ilustra estes fatores de estabilidade do navio.

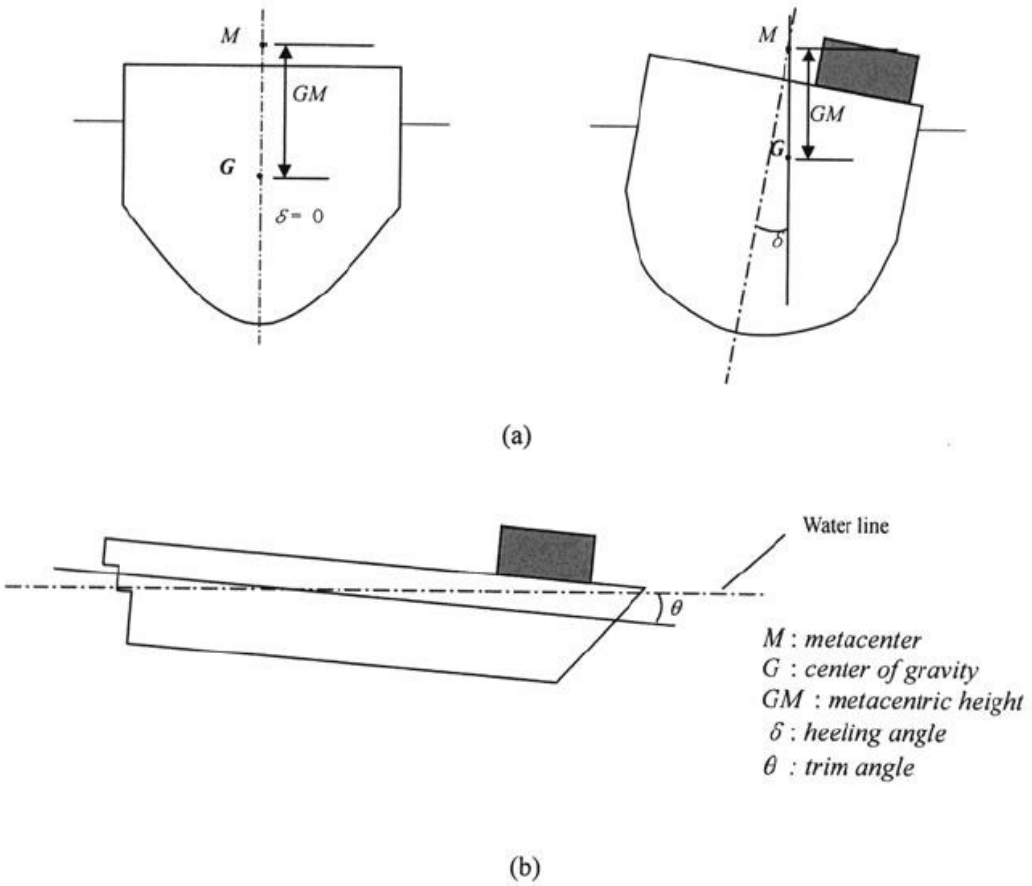


Figura 2.15: Considerações sobre estabilidade do navio (KANG, 2002)

Para o Planejamento de Embarque, ora estudado, estes fatores de estabilidade não serão levados em conta para cálculo. Contudo, serão obedecidos já que o plano mestre de carga considerado fará menção aos pesos e alturas máximos permitidos por pilha de contêineres a bordo do navio.

2.3.6. Demais restrições envolvidas no planejamento

Além da estabilidade considerada no item anterior, para que o Planejamento de Embarque tenha a aderência efetiva, é preciso considerar

uma série de outras restrições. No presente estudo, estas restrições foram divididas em dois grandes grupos: o grupo das indispensáveis (*hard constraints*) e o grupo das desejáveis (*soft constraints*) que deverão ser minimizadas.

A tabela 2.2 destaca as *restrições indispensáveis*.

RESTRIÇÕES INDISPENSÁVEIS	
01	Limite de peso por pilha (*stacking weight*)
02	Limite de altura por pilha (*stacking height*)
03	*Slots* específicos para contêineres refrigerados (*reefers*)
04	*Slots* específicos para contêineres com carga perigosa
05	*Slots* específicos para contêineres fora de padrão (*OOG*)
06	*Slots* específicos para contêineres vazios
07	*Slots* específicos para contêineres específicos (indicados)
08	Contêineres com características exigindo *Slots on deck*
09	*Bays* exclusivas para determinados Portos

Tabela 2.2: *Restrições Indispensáveis*

A tabela 2.3 destaca as que serão minimizadas (desejáveis), que o Planejamento de Embarque almeja minimizar.

RESTRIÇÕES NÃO DESEJÁVEIS (MINIMIZÁVEIS)	
01	Número de remoções nos Portos de escala (próximas visitas do navio)
02	Número de remoções no Pátio (onde os contêineres estão armazenados)
03	Contêineres fora de ordem de peso nas pilhas
04	Deslocamento total do recurso de operação do navio
05	Deslocamento total do recurso de operação do pátio
06	Pilhas de tamanhos de contêineres uniformes (20’ ou 40’)

Tabela 2.3: Restrições não Desejáveis

Para considerá-las, a cada uma destas restrições e relativamente à sua importância, foram atribuídos pesos específicos, fazendo com que algumas sejam preteridas no atendimento à outras.

2.3.7. O processo de planejamento manual e/ou assistido

O processo manual de Planejamento de Embarque consiste, boa parte, em tentativa e erro. O planejamento conta com ferramentas de *software* que prestam auxílio nas consistências necessárias, à medida que o planejamento

vai sendo executado. Este processo conta com a experiência dos planejadores (*planners*) que devem conhecer tanto as restrições do navio quanto as características de movimentação dos contêineres no pátio.

Não há garantias, haja visto a natureza do processo, que o Planejamento de Embarque manual e/ou assistido por *software* de apoio forneça soluções que, mesmo atendendo todas as restrições, ainda leve em conta os critérios inerentes às reduções de custos e maximização de performances exigidos pela operação. A figura 2.16 mostra exemplo de interfaces de sistemas de Terminais de Contêineres que oferecem apoio ao Planejamento de Embarque.

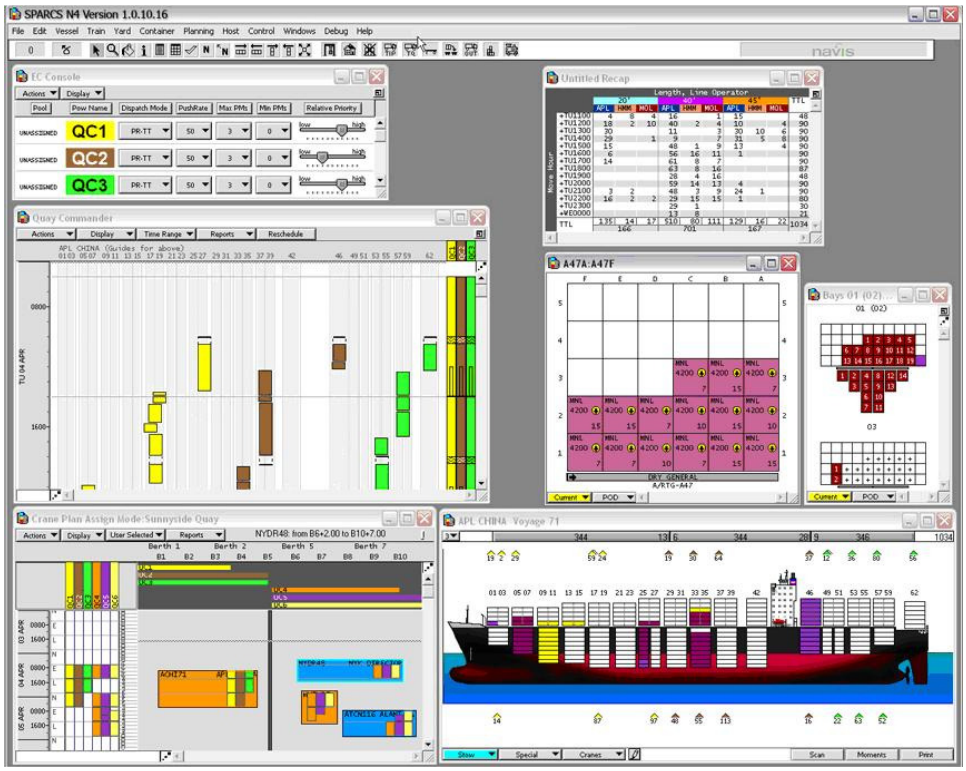


Figura 2.16: Interface Sistema Navis™

2.4. Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas as principais características de um Terminal de Contêineres e do Planejamento de Embarque. De forma geral, um

Terminal de Contêineres deve funcionar como uma indústria. A característica desta indústria chamada Terminal de Contêineres é trabalhar com equipamentos de grande porte e manusear cargas de grandes volumes e pesos. Assim como em uma indústria convencional também se almeja buscar reduções de custo e aumento de produtividade. É neste contexto que se reafirma a motivação para esta pesquisa, buscando servir de ferramenta para melhora da performance geral do sistema e otimização das tarefas individuais.

CAPÍTULO III

3. ALGORITMO GENÉTICO E PROBLEMAS DE OTIMIZAÇÃO

3.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo fundamentar o uso de Algoritmos Genéticos (AG) em problemas da categoria do aqui proposto. Para tanto, será feito um apanhado geral da história, das principais características e fundamentos de um AG, bem como os principais usos em problemas de otimização que se assemelham ao tema central desta pesquisa, o Planejamento de Embarque de Contêineres.

3.2. Fundamentos de um Algoritmo Genético (AG)

Algoritmos Genéticos (AG) são algoritmos de busca baseados nos mecanismos da seleção natural e da genética (GOLDBERG, 1989). Linden (LINDEN, 2006) complementa que os AG's são técnicas heurísticas de otimização global.

Haupt (HAUPT; HAUPT, 2004) destaca algumas vantagens do uso dos AG's:

- ✓ Podem ser usados em otimizações com variávies contínuas ou discretas;
- ✓ Lidam com um grande número de variáveis;
- ✓ Podem fugir dos mínimos locais;
- ✓ Provêem uma lista de soluções ótimas, não apenas uma solução única;

- ✓ Podem trabalhar com dados gerados numericamente, dados experimentais ou funções analíticas;

3.2.1. História dos AG

Os AG's foram desenvolvidos por John Holland, seus colegas e estudantes da Universidade de Michigan. As metas da pesquisa de Holland eram duas: abstrair e explicar rigorosamente os processos adaptativos dos sistemas naturais (natureza) e desenvolver sistemas de software que contivessem os mecanismos importantes dos sistemas naturais (GOLDBERG, 1989).

Ao representar o processo evolutivo partindo do modelo de cromossomos, Holland foi capaz de encontrar um caminho de grande e imediata aplicação prática na determinação dos máximos e mínimos de funções matemáticas, facilitando a aceitação dos AG's no meio acadêmico (GOLDBARG; LUNA *apud* SOUZA, 2004).

Entretanto, os AG's transcenderam o papel originalmente imaginado por Holland e transformaram-se em uma ferramenta de uso disseminado pelos cientistas da computação (LINDEN, 2006).

3.2.2. As bases genéticas e evolucionárias

O fundamento da seleção natural como princípio evolucionário foi formulado por Darwin muito tempo antes do descobrimento dos mecanismos genéticos. AG's usam o mesmo vocabulário da genética (MICHALEWICZ, 1996), que será detalhado no item a seguir.

No mundo real, o processo de seleção natural controla a evolução dos organismos de forma que aqueles mais adaptados ao meio-ambiente tenham vida mais longa e reproduzam-se mais. Por outro lado, os organismos menos adaptados tendem a morrer precocemente e/ou procriar-se menos. De acordo com a teoria da evolução, as principais características dos organismos que tornam possível sua sobrevivência no planeta são determinadas por reações

químicas nos cromossomos feitos de DNA[12] (CASTRO, 2001). Estas são as mesmas bases genéticas e evolucionárias aplicáveis ao AG.

Back (BACK, 2000a) enumera um conjunto de características do paradigma Darwiniano, as quais formam o arcabouço para a computação evolucionária. Destas características, podem ser citadas:

- O indivíduo é o alvo primário da seleção natural;
- Evolução é uma adaptação à mudança e diversidade, não meramente uma mudança na freqüência dos genes;
- Seleção natural é probabilística, não determinística.

3.2.3. Principais conceitos e definições

Como já citado, AG's se baseiam nas mesmas terminologias e definições da genética. Alguns conceitos são necessários para a compreensão de seu funcionamento, tais como:

- cromossomo: para um AG, um cromossomo, também chamado de indivíduo, representa uma das possíveis soluções, dentre todo o espaço de soluções do problema. A representação cromossomial é fundamental para o AG, pois quanto mais ela for adequada ao problema, maior a qualidade dos resultados obtidos (LINDEN, 2006);
- gene: é a representação de cada pedaço indivisível de um cromossomo, analogamente às partes fundamentais que compõem um cromossomo biológico;
- alelo: é o valor assumido pelo gene;
- população: certa quantidade de cromossomos (indivíduos) geradas, por conseguinte, dentro do espaço de busca do problema;

[12] DNA: principal componente do genoma; conjunto complexo de instruções para a criação de um organismo (BANZHAF et al, 1998).

- geração (*offspring*): a cada ciclo completo de um AG obtem-se uma nova geração de indivíduos, onde se espera que tenham evoluído e constituam-se em indivíduos mais bem adaptados;
- operadores genéticos: são os processos que promovem a reprodução dos indivíduos, geração à geração;
- seleção: é o processo que leva em consideração, segundo um critério pré-definido, os indivíduos mais bem adaptados e os seleciona para se reproduzirem e gerar novos descendentes; é um operador que tem por objetivo, portanto, dar ênfase nas melhores soluções da população (BACK, 2000a);
- cruzamento (*crossover*): após a seleção dos indivíduos promovida pelo processo de seleção, dois pais sofrem cruzamento do material genético, ou seja, é feita sua recombinação gerando novos indivíduos;
- mutação: é um operador exploratório que tem por objetivo aumentar a diversidade na população (CASTRO, 2001). Este operador é aplicado segundo uma probabilidade definida e promove a troca aleatória dos alelos no indivíduo;
- função de avaliação (*fitness*): é o método pelo qual um indivíduo é avaliado segundo o problema que se pretende resolver. A função de avaliação remete totalmente ao problema em questão retornando um valor pertinente à avaliação do indivíduo. Este valor será utilizado pelo método de seleção.

Os operadores genéticos, dado a sua importância, serão detalhados em itens independentes a seguir.

3.2.4. Funcionamento básico do AG

Segundo Goldberg (GOLDBERG, 1989), os AG's se diferem dos tradicionais métodos de busca e otimização de quatro maneiras:

1. AG's trabalham em um conjunto codificado do espaço de busca, não no próprio espaço busca;
2. AG's trabalham com uma população de pontos do espaço de busca, não com pontos isolados;
3. AG's usam funções de custo (funções objetivo), não diferenciávies ou outros conhecimentos auxiliares;
4. AG's usam regras de transição probabilísticas, não regras determinísticas.

O funcionamento básico de um AG geracional está demonstrado na figura 3.1 e é assim descrito suscintamente:

1. Iniciar aleatoriamente uma população de indivíduos (população Inicial);
2. Avaliar todos os indivíduos da população (*Fitness*);
3. Selecionar indivíduos para os operadores de reprodução;
4. Promover cruzamento (segundo probabilidade parametrizada) dos indivíduos selecionados;
5. Promover mutação (segundo probabilidade parametrizada) dos indivíduos selecionados;
6. Selecionar os indivíduos para a próxima geração;
7. Se não atingiu critério de parada, retornar ao passo 2;

O único processo em que um AG interage com o mundo externo, ou seja, que efetivamente conhece o problema a que está submetido, é no processo de avaliação da solução; os demais processos são passos constantes no fluxo evolucionário básico inerente ao algoritmo.

O passo que antecede ao processo de iteração do algoritmo é a importante fase de codificação do cromossomo, como já citado. É preciso salientar sua influência direta nos operadores genéticos de cruzamento (*crossover*) e mutação. Algumas codificações de indivíduos devem considerar que em uma mesma solução não pode haver repetição dos alelos. Essas

representações são ditas representações baseadas em ordem. Um exemplo de problemas desse tipo é o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), relatado no decorrer deste capítulo. No PCV, a representação do indivíduo deve conter todos os nós (cidades) colocados em uma ordem, sem repetição e, nem tão pouco falta de alguma cidade a ser visitada (LINDEN, 2006).

Do fato exposto acima é possível concluir que os dois operadores citados (*crossover* e mutação) devem ser aplicados levando em conta a representação do indivíduo, obedecendo estas restrições impostas, não gerando representações consideradas inválidas (repetições ou falta de elementos).

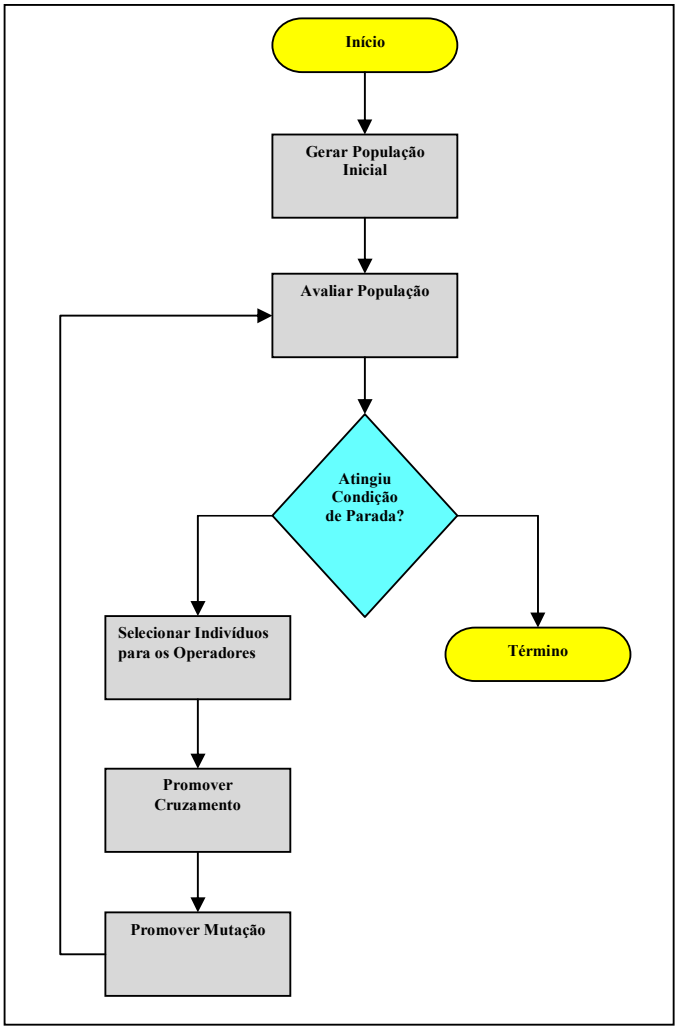


Figura 3.1: Fluxo básico do AG geracional

Em contraposto ao AG geracional descrito, o processo de evolução pode ser menos drástico, ou seja, não substituindo todos os elementos de uma população por outra recém criada. Esta segunda abordagem evolutiva dos AG's é chamada *steady-state*, onde grande parte dos indivíduos de uma população são mantidos, havendo apenas substituição por reprodução de alguns indivíduos (um ou dois por geração) (LINDEN, 2006). Normalmente os indivíduos menos adaptados (piores *fitness*) são substituídos (MITCHELL apud SOUZA, 2004).

3.2.4.1. Critérios de Seleção

Como retratado no item de conceitos gerais sobre AG, a seleção é um dos principais operadores usados nessa técnica. Serão ressaltados, a seguir, alguns dos mais usuais métodos de seleção (BACK, 2000a).

1. Seleção por torneio binário: nesse tipo de seleção, duas soluções são apanhadas da população e a melhor solução (melhor *fitness*) é escolhida para continuar no processo reprodutivo. Esse método tem como vantagem manusear tanto problemas de maximização quanto de minimização sem qualquer alteração estrutural na função de avaliação. Outra vantagem é que esse método facilita implementações paralelas, uma vez que somente são necessários elementos das duas soluções para que o operador seja processado;
2. Seleção por *ranking*: as soluções são *ranqueadas* por ordem ascendente ou descendente, de acordo com o objetivo a ser alcançado (maximização ou minimização). À cada solução é atribuído um valor de aptidão baseado em seu *ranking* dentro da população. Procede-se então com a seleção (por torneio, ou proporcional, explicado a seguir) utilizando o valor do *ranking* e não o valor do *fitness* do indivíduo;
3. Seleção proporcional: nesse método as soluções recebem probabilidades proporcionais ao seu valor de aptidão (*fitness*). Nessa

abordagem um indivíduo será selecionado um número de vezes próximo a proporção de sua avaliação em relação à soma das avaliações de todos os indivíduos;

Com o objetivo de manter vivos os melhores indivíduos de uma população, existe uma pequena modificação que pode ser feita no processo que antecede a sua reprodução. Esta modificação é chamada elitismo e consiste em garantir que os *n* melhores indivíduos de uma população permaneçam "vivos" para as gerações seguintes. O valor de *n* é um parâmetro do AG. Normalmente, a utilização do elitismo, colabora muito para a melhora da performance geral de execução de um AG (LINDEN, 2006).

3.2.4.2. Operadores de Cruzamento

O cruzamento (*crossover*) é o operador que faz a recombinação do material genético de dois indivíduos (pais) pré-selecionados pelo operador de seleção já discutido.

Segundo Mitchell (MITCHELL apud SOUZA, 2004), a forma mais simples de cruzamento é a baseada em um ponto (figura 3.2 (a)), que é sorteado aleatoriamente para promover posteriormente a troca dos materiais genéticos antes e após este ponto de corte.

Uma variação ainda simples deste operador consiste no sorteio de dois pontos de corte (figura 3.2 (b)), fazendo as trocas dos materiais dos dois pais entre os pontos escolhidos.

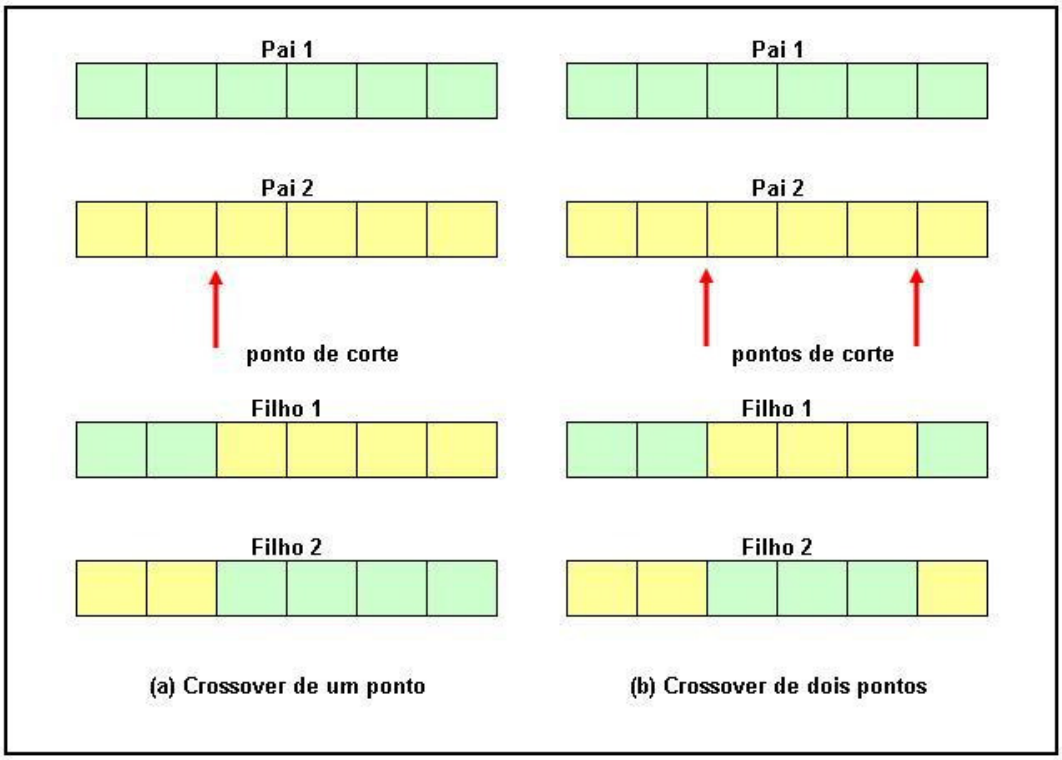


Figura 3.2: Cruzamento de um e dois pontos de corte

Como apontado no item sobre o funcionamento dos AG's, da representação do indivíduo dependem os operadores genéticos. Para codificações baseadas em ordem (problemas de otimização combinatória), os métodos de cruzamento comumente utilizados são (MICHALEWICZ, 1999):

- *Partially-Mapped Crossover* (PMX): esse operador promove o cruzamento escolhendo uma subseqüência do cromossomo de um pai, mantendo a ordem e a posição dos genes, tanto quanto possível, do outro pai. Esta subseqüência é obtida com dois pontos de corte escolhidos aleatoriamente. O PMX explora importantes similaridades simultaneamente nos valores e ordem quando usados com um apropriado plano de reprodução (figura 3.3).

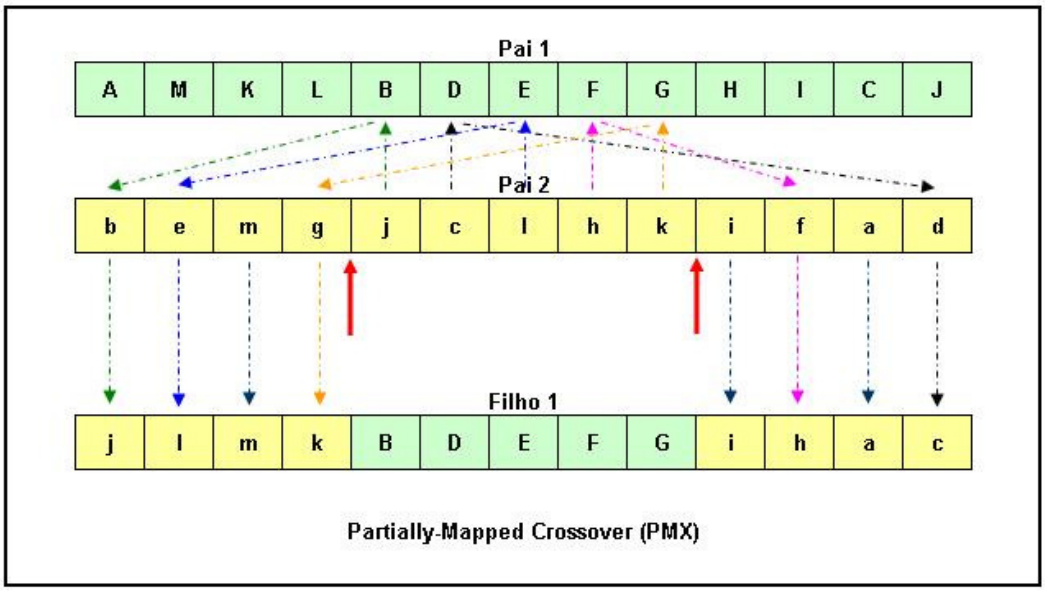


Figura 3.3: *Partially-Mapped Crossover* (PMX)

- *Order Crossover* (OX): esse esquema constrói a nova geração escolhendo uma subseqüência do cromossomo de um pai, mantendo a ordem relativa dos genes do outro pai. O OX explora a propriedade da representação do caminho, ou seja, a ordem em que os genes aparecem e não sua posição relativa (figura 3.4).

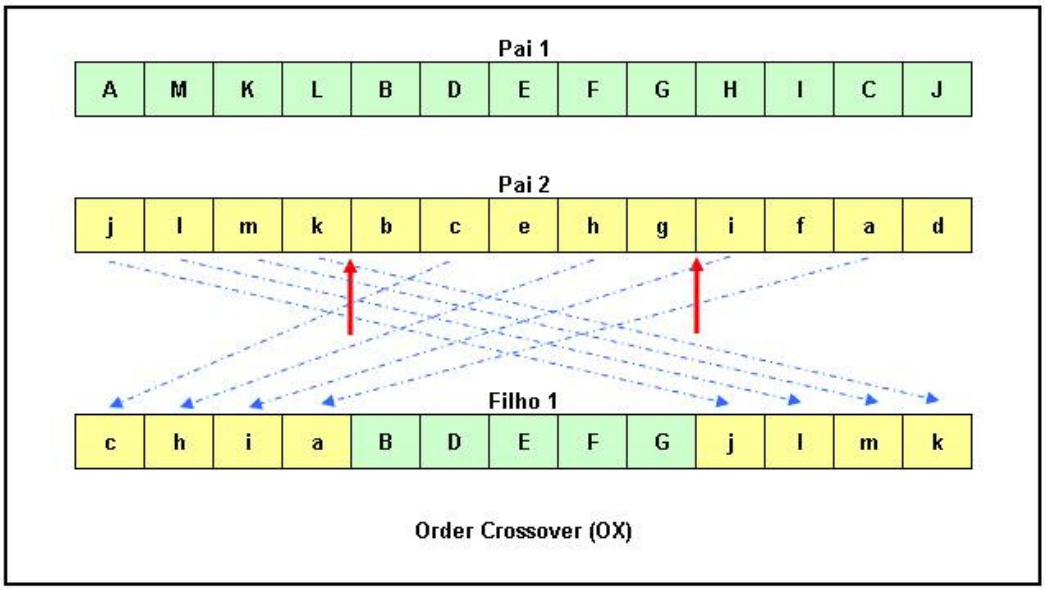


Figura 3.4: *Order Crossover* (OX)

- *Cycle Crossover* (CX): nesse método, a nova geração é construída do modo pelo qual (ordem e posição) aparecem nos pais. O CX preserva a posição absoluta dos elementos na seqüência encontrada nos pais (figura 3.5).

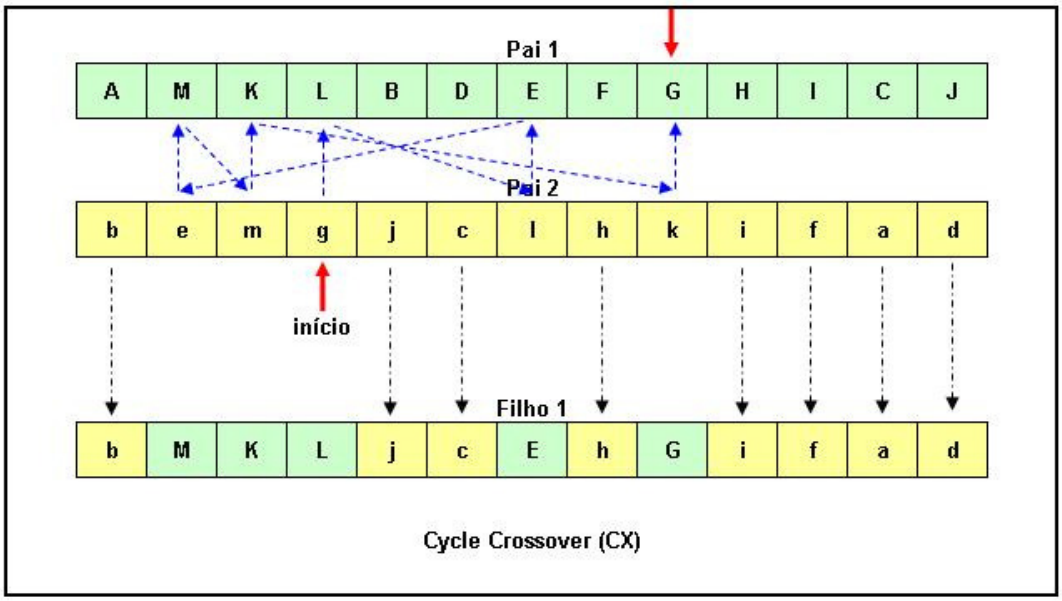


Figura 3.5: *Cycle Crossover* (CX)

3.2.4.3. Mutação

De acordo com sua definição, o operador de mutação (BACK, 2000a):

- determina a posição no cromossomo (gene) que deverá sofrer a mutação através de uma busca randômica uniforme, onde cada gene tem a mesma probabilidade de ser escolhido;
- gera um novo cromossomo com os novos valores dos genes substituídos (por valores admissíveis no espaço de busca).

Após o processo de cruzamento, o operador de mutação deverá ser aplicado em cada um dos novos indivíduos gerados (nova geração), como mencionado, de acordo com a probabilidade especificada. O conceito

fundamental quanto ao valor da probabilidade é que ele deve ser baixo, caso contrário, o AG se parecerá muito com um passeio aleatório, ou seja, busca de solução de forma aleatória (LINDEN, 2006).

Em codificações binárias, a mutação consiste apenas na troca de um valor por outro (MITCHELL apud SOUZA, 2004).

Nas representações baseadas em ordem, o operador de mutação consiste na permutação dos genes de um cromossomo. Algumas estratégias são (BACK, 2000a):

- Mutação *swap* ou *order-based mutation*: esse método consiste em escolher aleatoriamente dois genes de um cromossomo para sofrer a permutação (troca) (figura 3.6);

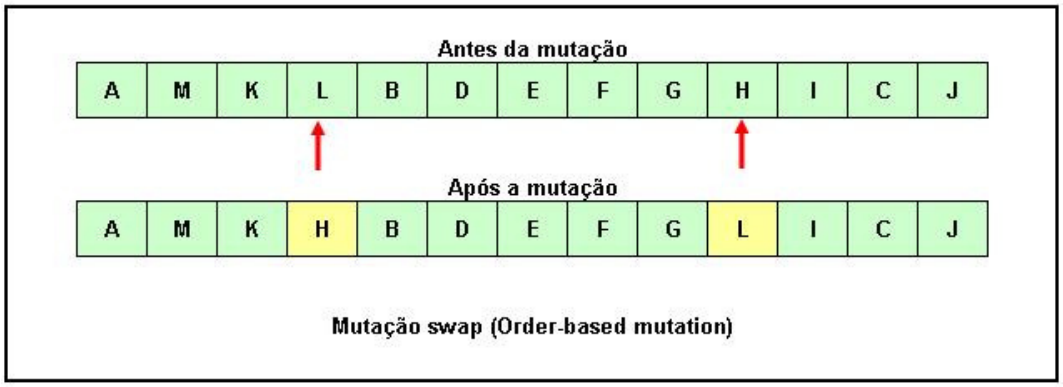


Figura 3.6: Mutação swap

- Mutação por inserção ou *position-based mutation*: nesse método um elemento é selecionado e inserido em uma outra posição definida aleatoriamente (figura 3.7);

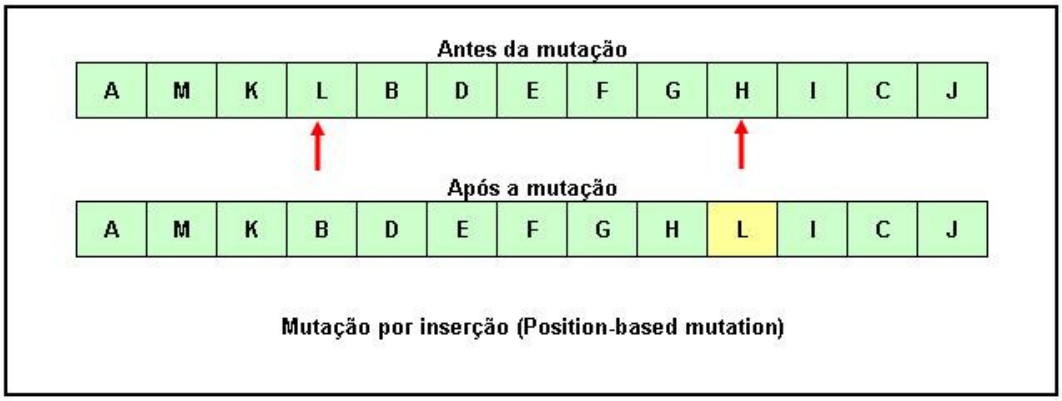


Figura 3.7: Mutação por inserção

- Mutação por embaralhamento (*scramble*): esse tipo de mutação consiste em selecionar uma sublista de genes do cromossomo (definida entre dois pontos) e reordená-la de forma aleatória, enquanto mantém os outros genes na mesma posição absoluta (figura 3.8).

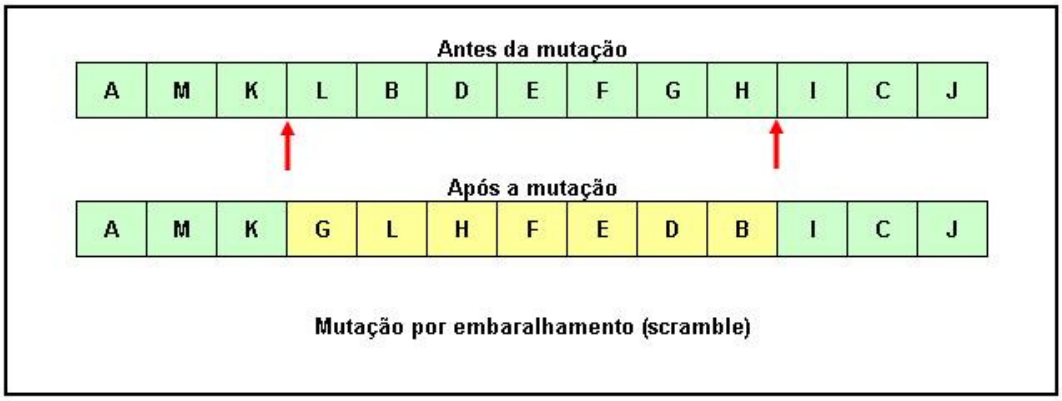


Figura 3.8: Mutação por embaralhamento de sublista

3.2.4.4. Avaliação do Indivíduo

A avaliação do indivíduo em um AG se inicia com a definição da função objetivo, expressa por (BACK, 2000a):

$$f : A_x \rightarrow \Re$$

onde A_x é o espaço de busca. A função objetivo tipicamente atribui um custo a ser minimizado ou algum valor a ser maximizado. Back (BACK, 2000a) ainda sugere alguns princípios a serem esclarecidos no uso de algoritmos evolutivos, como o AG:

- a função objetivo deve refletir valor que se mostre relevante (de fácil interpretação) a ser otimizado, devendo ser diretamente ligada às condições impostas pelo problema;
- a função objetivo deve possuir certa linearidade no espaço definido pela representação selecionada;
- a função objetivo deve prover informação suficiente para guiar a pressão de seleção do algoritmo evolutivo.

A função de avaliação, que também pode ser chamada de função de custo, deve retornar um valor numérico que refletirá o quanto os parâmetros representados no cromossomo resolvem o problema proposto. Deve, portanto, ser escolhida com cuidado; deve embutir todo o conhecimento que se possui sobre o problema a ser resolvido, tanto suas restrições quanto seus objetivos de qualidade (LINDEN, 2006).

3.2.4.5. Condições de Parada

A condição de interrupção da execução de um AG pode se dar de várias maneiras, podendo ser citadas:

- determinado número de gerações alcançado;
- condição de estabilidade encontrada (não há melhora na solução por *n* ciclos) – convergência;
- solução procurada encontrada (quando esta é conhecida);
- interação com usuário que avalia resultados satisfatórios e determina a interrupção (manual);

Em problemas de otimização com restrições (minimização ou maximização), normalmente, os critérios levam em conta o número de gerações ou ainda condição de estabilidade do modelo (convergência).

3.3. Aplicações dos Algoritmos Genéticos

Back (BACK, 2000a) enumera cinco grandes categorias de usos da computação evolutiva, da qual o AG é parte integrante:

1. Planejamento: nessa categoria encontram-se os problemas relacionados a *routing* (roteamento, ou a busca pelo melhor caminho, ou de melhor custo), *scheduling* (agendamento ou escalonamento, ou seja, planejamento de tarefas determinadas ao longo do tempo) e *packing* (empacotamento ou carregamento, ou a otimização do arranjo de objetos em espaço definido, por exemplo, mercadorias em caminhão para entrega – tridimensional);

2. *Design*: aplicações em projetos de engenharia, por exemplo, projeto, cálculo e desenvolvimento de estruturas e sistemas (aviões);

3. Simulação e Identificação: essa categoria engloba a simulação do comportamento de determinada estrutura projetada (por exemplo, projeto de um novo avião). A Identificação é o oposto da Simulação; envolve determinar o projeto estrutural de um sistema dado seu comportamento;

4. Controle: esse item envolve tanto o desenvolvimento *off-line* quanto o *on-line* de controladores, sendo que no *off-line* o AG é usado para projetar o controlador e no *on-line* o AG pode ser utilizado como parte integrante do controlador; e

5. Classificação: essa categoria envolve a possibilidade de classificar um sistema de acordo com as características presentes fornecidas. Um exemplo é a ajuda na construção das pesquisas usadas pelas novas ferramentas de busca que visam retornar documentos com determinadas palavras.

3.4. Problemas de Otimização

Para Goldberg (GOLDBERG, 1989), otimizar é procurar melhorar a performance na busca de um ponto ótimo ou pontos ótimos que compõem soluções para um problema. A otimização vai além da convergência para uma solução (boa ou ótima); a mais importante meta da otimização é a melhora contínua.

Como comentado por Back (BACK, 2000a), otimização não implica em perfeição, ainda que um AG possa encontrar altamente precisas e funcionais soluções para um problema particular.

AG's têm sido usados com certo sucesso para problemas de otimização, como os salientados na categoria de Planejamento do item anterior (MICHALEWICZ, 1999), destacando-se problemas de transporte, rotas e agendamento de tarefas.

3.4.1. Complexidade dos problemas

Braga (BRAGA, 2007) considera que estimar a complexidade de problemas e dos algoritmos para resolvê-los é uma tarefa crucial. Grande parte dos problemas reais tem tentativas expressas de resolução via algoritmos computacionais. Falkenauer (FALKENAUER, 1998) define a complexidade computacional de um problema pode ser considerado como o consumo de tempo do mais eficiente algoritmo possível para o problema; a teoria da complexidade trata como se comporta o tempo de resolução de algoritmos em geral, ou seja, do consumo de tempo no pior caso para a resolução total do modelo.

Dois conceitos importantes surgem ao se tratar da complexidade dos problemas (BRAGA, 2007):

a. Problemas polinomiais: um problema é dito polinomial se existe um algoritmo polinomial[13] para o problema, sendo considerados "fáceis" do ponto de vista computacional; e

b. Problemas não-polinomiais: um problema é dito não-polinomial se não existe algoritmo polinomial para o problema e são considerados computacionalmente intratáveis.

Segundo Ganhoto (GANHOTO, 2004), a maioria dos problemas de decisão associados a problemas de interesse prático, derivados ou não de problemas de otimização, pertence as seguintes classes:

- **Classe P** (tempo polinomial). Um problema pertence à classe P se ele pode ser resolvido por um algoritmo de tempo polinomial;

- **Classe NP**[14]. Um problema pertence à classe NP quando ele admite, ou apresenta um certificado. Um certificado deve ser polinomialmente sucinto, ou seja, seu comprimento deve ser dado, no máximo, pelo valor de um polinômio sobre o comprimento da cadeia de entrada; ele também deve ser verificável em tempo polinomial;

- **Classe NP-Completo**. Um problema *X* pertence à classe NP-Completo se ele for pertencente à classe NP e se qualquer outro problema *V* também pertencente à classe NP puder ser reduzido polinomialmente a *X*. Em outras palavras, *X* é NP-Completo quando está em NP, e para qualquer *V* em NP, um algoritmo para resolver *X* pode ser adaptado em tempo polinomial para resolver *V.*

[13] Algoritmo Polinomial: neste tipo de algoritmo, o consumo de tempo é limitado por uma função polinomial do tamanho da instância do problema.
[14] NP: *nondeterministic polynomial* ou polinomial não-determinístico.

- **Classe NP-Difícil (NP-Árduo ou NP-*Hard*)**. Um problema *X* pertence à classe NP-Difícil se qualquer outro problema *V* pertencente à classe NP puder ser reduzido polinomialmente a *X*. Note que aqui, *X* não necessariamente pertence à classe NP. Um problema NP-Difícil é pelo menos tão difícil quanto qualquer problema em NP.

AG's são alternativamente propostos como heurísticas para resolução de instâncias da classe de problemas NP-Completo e NP-Difícil, já que métodos determinísticos não apresentariam bons tempos computacionais ou não existiriam. Nessas classes de problemas encontram-se os problemas de otimização combinatória, como o foco deste trabalho de pesquisa.

3.4.2. Otimização multi-objetivos

Problemas do mundo real frequentemente envolvem múltiplas medidas de performance, ou objetivos, os quais devem ser otimizados simultaneamente. Na prática, entretanto, isso não é sempre possível, onde, por exemplo, os objetivos podem ser conflitantes. Objetivos também, muitas vezes, podem ser imensuráveis, isto é, podem medir diferentes aspectos da qualidade de uma solução candidata (BACK, 2000b).

Segundo Goldberg (GOLDBERG, 1989), em uma otimização de critério simples (um objetivo) a qualidade da solução dispensa explicações, ou seja, será tão melhor quanto o valor de seu resultado (menor, se minimizando, ou maior, se maximizando).

Back (BACK, 2000b) aponta que as estratégias para abordar otimização multi-objetivos podem ser divididas em três grupos:

1. Abordagem por agregação: os objetivos são numericamente combinados em uma única função objetivo a ser otimizada;

2. Abordagem baseada na população (não Pareto[15]): nessa abordagem, objetivos diferentes afetam a seleção de partes diferentes da população por vez;
3. Abordagem baseada em Pareto: a população é ranqueada usando diretamente a definição de Dominância de Pareto.

Haupt (HAUPT; HAUPT, 2004), enfatiza a abordagem por agregação como forma de tratar problemas de otimização multi-objetivos, utilizando um método baseado em pesos, obtendo uma função de avaliação com o formato:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{n} w_i f_i(x)$$

onde *w* representa o peso correspondente (aplicável) ou objetivo.

Linden (LINDEN, 2006) complementa que a simplicidade desse modelo é somente aparente, pois existe dificuldade relativa na determinação dos valores ótimos para os pesos, já que os objetivos interagem entre si.

3.4.3. Manuseio de restrições

Como apontado por Goldberg (GOLDBERG, 1989), muitos problemas práticos contém uma ou mais restrições que devem ser satisfeitas. Restrições são classificadas comumente como relação de igualdade ou desigualdade. Um AG gera uma seqüência de parâmetros a serem testados usando um modelo de sistema, uma função objetivo e as restrições. O modelo é simplesmente executado, avaliado segundo uma função de avaliação e conferido para ver se alguma restrição foi violada.

Linden (LINDEN, 2006) explica que problemas de otimização sujeitos à restrições são compostos por uma tripla < S, f, Φ >, onde S é o espaço de busca, f é a função objetivo do problema e Φ é um conjunto de uma ou mais

[15] Pareto introduziu o conceito do "Ótimo de Pareto" (ou "Eficiência de Pareto") que pode ser aplicado a problemas de otimização com múltiplos objetivos, considerando, principalmente, as possibilidades de melhora de um objetivo com os reflexos nos demais ("Fronteiras de Pareto"). (HASHIMOTO, 2004).

fórmulas lógicas que dividem o espaço de busca em uma região admissível[16] e outra não admissível. Nesse contexto, o conceito de solução como sendo um ponto que satisfaz as restrições impostas por Φ ainda é válido e o objetivo consiste em encontrar solução que minimiza (ou maximiza) a fórmula de custo dada pela função f.

Linden (LINDEN, 2006) ainda destaca os dois grupos das restrições:

- ✓ as restrições imprescindíveis (*hard constraints*): que devem ser atendidas obrigatoriamente; e
- ✓ as restrições desejáveis (*soft constraints*): que podem ser desobedecidas.

No capítulo 2, item 2.3.6. duas tabelas representam as principais restrições (*hard* e *soft*) inerentes à esta pesquisa.

Back (BACK, 2000b) elenca alguns métodos para manuseio de restrições, dentre os quais estão:

- ✓ as funções de penalização: são de dois tipos básicos: exteriores, que penalizam as soluções infactíveis (inválidas) e as interiores, que penalizam as soluções factíveis (válidas) utilizando-se de pesos, por exemplo. Podem, ainda, ser estáticas, com aplicação de valores de penalização constante, dinâmicas, onde os valores de penalização são dinamicamente alterados de acordo com critérios pré-definidos (normalmente, de forma decrescente) e as adaptativas, onde os valores de penalização podem ser alterados baseados no quão factível é a melhor solução gerada; e

- ✓ os algoritmos de reparação: nesse tipo de tratamento de restrições uma solução infactível pode ser reparada, tornando-a factível, similarmente aos métodos de busca local. Um ponto fraco desse método é a sua

[16] Região admissível e não admissível: dentro de um espaço de busca total, são os pontos que representam as áreas de soluções aceitáveis e não aceitáveis, respectivamente, para o problema considerado

dependência do problema que está sendo tratado, ou seja, é direcionado somente ao algoritmo a que foi projetado (heurística própria).

3.4.4. Problemas clássicos relacionados

Dentre os principais problemas clássicos de otimização relatados na literatura, aponta-se:

- Problema do Caixeiro Viajante – PCV (MICHALEWICZ, 1999): é um problema de otimização combinatória e pode ser considerado em várias aplicações práticas. Nesse problema um caixeiro viajante deve visitar cada cidade em sua região exatamente uma vez e retornar à cidade de origem. Cada um dos trechos tem um custo relativo e a problemática está em fazer o percurso todo com o menor custo possível;

- Problema das oito rainhas em um tabuleiro de Xadrez – *Queen Problem* (BOZILOVIC, 2003): é um problema combinatorial clássico que consiste em distribuir oito rainhas em um tabuleiro de xadrez de modo que não possam se atacar, ou seja, não ocupem posições com possibilidade de ataque, dado à sua capacidade de movimentação herdadas das regras de xadrez. Esse problema pode ser generalizado para *n* rainhas em um tabuleiro *nxn*; e

- Problema da Mochila (BACK, 2000b): o problema básico da mochila (*0-1 knapsack problem*) pode ser assim formulado: dado um conjunto de mercadorias com pesos e valores diferentes e uma mochila com capacidade de peso finita e determinada, o objetivo é encontrar um arranjo que maximize o valor total dos itens carregados.

Os problemas clássicos apresentados, dado à suas características (otimização combinatorial) são freqüentemente abordados na literatura com soluções baseadas em métodos heurísticos, como os AG's.

3.5. Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas as principais características dos AG's, principalmente àquelas que mais remetem ao problema abordado na presente pesquisa. É bastante clara a potencialidade dos AG's ante à problemas de otimização, sobretudo problemas de otimização combinatória. Abordagens heurísticas como os AG's são freqüentemente empregadas em problemas de alta complexidade, principalmente nos que possuem muitas restrições e múltiplos objetivos a serem alcançados, por vezes conflitantes entre si.

CAPÍTULO IV

4. IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO

4.1. Introdução

Neste capítulo será apresentada a abordagem para a solução do Planejamento de Embarque de Contêineres, discutido no item 2.3 deste trabalho. Serão mostradas as tecnologias adotadas e suas formas de utilização, bem como a representação formal do AG construído, e suas adequações na busca da solução.

Como exposto no item 3.4, problemas de otimização têm frequentemente sido abordados com AG's. O Planejamento de Embarque é um problema de otimização combinatória com múltiplos objetivos, pertencente à classe de problemas NP-Difícil, como será facilmente observado no item 4.6 do presente capítulo, onde serão consideradas todas as restrições inerentes ao problema.

Obter um Planejamento de Embarque satisfatório significa satisfazer múltiplos objetivos e estes devem ser avaliados de forma conjunta. Para o problema proposto empregou-se a técnica de agregação de objetivos citada no capítulo 3, item 3.4.2, pelas suas características indissociáveis.

A implementação proposta considerou somente um recurso trabalhando no pátio (*ReachStacker* – Capítulo 2, item 2.3.2) e um recurso trabalhando no navio (Portêiner – Capítulo 2, item 2.3.4). Apesar da realidade dos Terminais de Contêineres ser diferente (mais que um recurso de pátio e de costado), não foi almejado obtenção de agendamento de recursos e tarefas (*scheduling*), pois

tornaria o problema ainda mais complexo de modelar e com tempos computacionais para a solução ainda maiores.

4.2. Tecnologias empregadas

O software de computador construído para abordar o problema do Planejamento de Embarque foi chamado de STC, ou Sistema Terminal de Contêineres.

O aplicativo STC foi codificado em linguagem Java™ (Java 2 *Platform*, *Standard Edition* – *J2SE*, versão 1.6.0_02*)*, que é uma linguagem totalmente orientada a objetos (DEITEL; DEITEL, 2005) o que possibilita o desenvolvimento modular e com objetos reutilizáveis.

Para a criação da aplicativo em Java foi utilizado o ambiente de desenvolvimento NetBeans IDE™ versão 5.5.1 (figura 4.1).

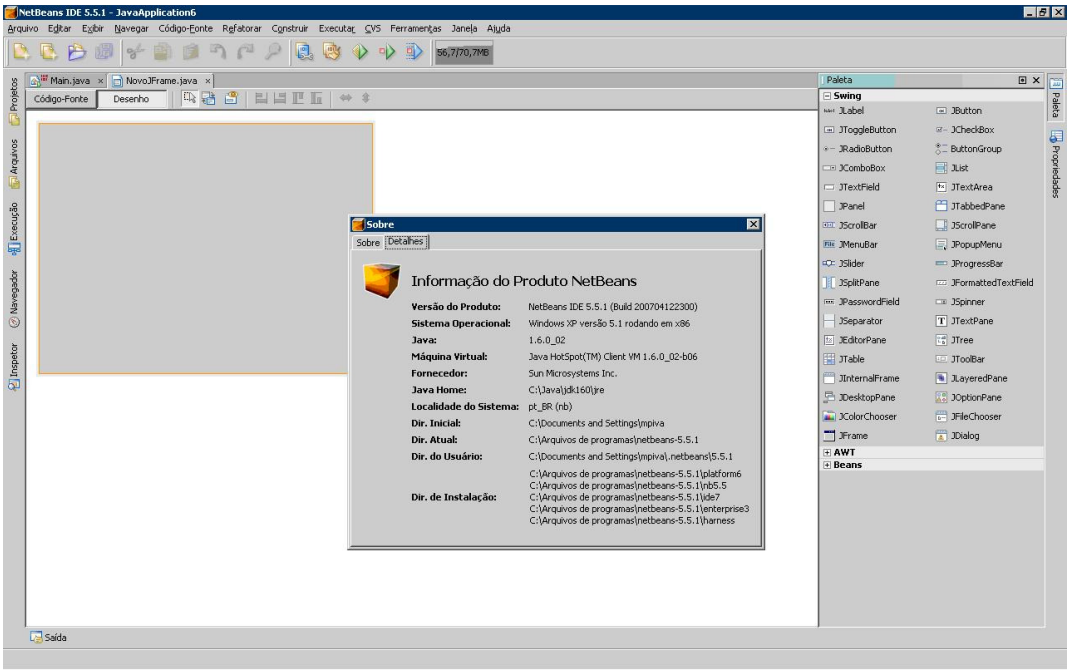


Figura 4.1: Netbeans IDE™

Devido à exigência do problema em manusear muitos dados, sobretudo as estruturas de pátio e navio, as listas de contêineres para embarque e os

planos de carga, foi necessário a construção de uma pequena base de dados para prover a persistência dos dados para simulação. Optou-se pela criação de uma base de dados no SGDB (Sistema Gerenciador de Bando de Dados) MySQL™ versão 5.0.41, aplicativo da empresa MySQL AB.

Para manipulação direta dos dados em banco e para administração do banco de dados utilizou-se as ferramentas, respectivamente, MySQL Query Browser™ (figura 4.2) e MySQL Administrator™ (figura 4.3), ambos versão 1.2.12, da empresa MySQL AB.

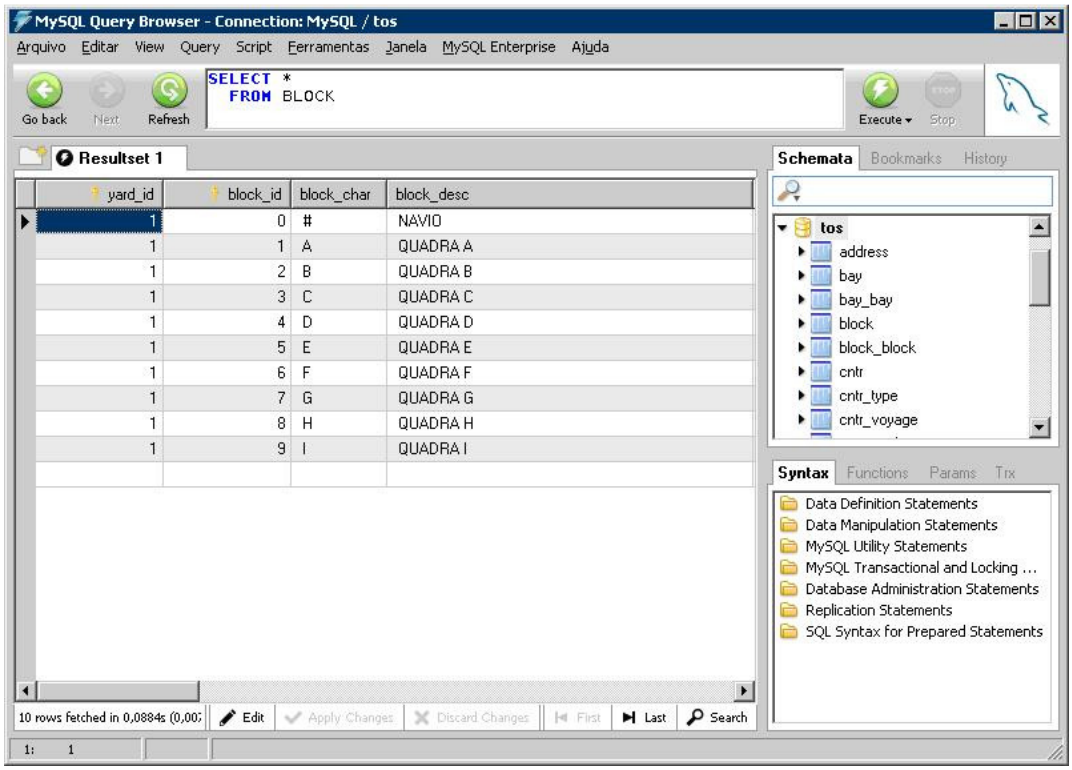


Figura 4.2: MySQL Query Browser™

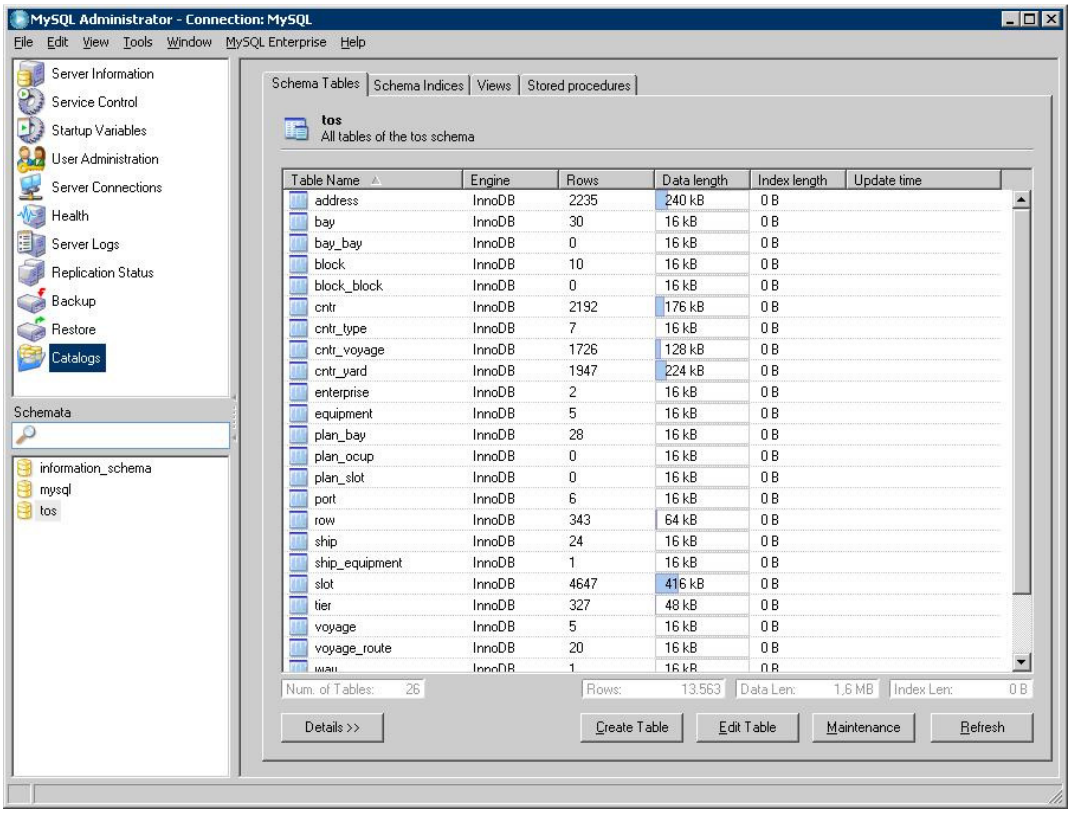


Figura 4.3: MySQL Administrator™

4.3. Estrutura do Cromossomo, codificação e decodificação

Para a abordagem do problema propôs-se uma representação numérica, baseada em números inteiros, cada gene do cromossomo correspondendo a um elemento a ser trabalhado (neste caso, um inteiro que indica um contêiner ou um *slot* a bordo do navio).

A estrutura do cromossomo foi composta por duas dimensões, a primeira responsável pela lista de contêineres que devem ser embarcados e a segunda dimensão pelos *slots* que cada um dos contêineres deve ocupar a bordo. A figura 4.4 mostra um exemplo de cromossomo construído para embarque de 14 contêineres. Como pode ser visto, a estrutura é uma matriz, com duas linhas e *n* colunas, sendo *n* o número total de contêineres a embarcar.

Cromossomo														
Índice	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
x	9	8	7	10	2	1	3	0	4	5	13	6	12	11
y	45	18	25	812	33	44	12	9	17	230	123	780	5	625

Figura 4.4: Cromossomo exemplo

A dimensão *x*, observada na figura 4.4, contém os contêineres numerados de *0..n-1.* Esta dimensão é, portanto, dimensão baseada em ordem, onde necessariamente todos os contêineres estarão representados, sem repetição e ausência de nenhum deles.

A dimensão *y*, como mostrado, contém os *slots* sugeridos pelo AG para cada um dos contêineres na coluna correspondente da matriz. Também possui representação baseada em ordem, porém pode haver ausência de algum número na seqüência, mas não repetição; é numerada de *0..m-1*, onde *m* é o número total de *slots* disponíveis no navio. Pode haver ausência de número na seqüência já que o número de *slots* disponíveis é sempre maior que o número de contêineres a embarcar.

Para a codificação do cromossomo (ambas as dimensões) utilizou-se um mapeamento direto do identificador do contêiner e do *slot* para um número na seqüência, ou seja, foi gerado um vetor com todas as possibilidades de *0..n-1* para os contêineres e de *0..m-1* para os *slots* de modo que as referências aos identificadores levam aos índices correspondentes (usado no cromossomo). Para a decodificação o processo é inverso à codificação, utilizando o mesmo vetor partindo do índice. O processo está demonstrado na figura 4.5.

Vetor (de)codificação para Contêineres									
0	1	2	3	4	5	6	7	...	n-1
62	63	77	65	66	67	79	76	...	...

Vetor (de)codificação para Slots									
0	1	2	3	4	5	6	7	...	m-1
62	71	72	74	75	97	59	98	...	...

CONTÊINERES	
Id	Contêiner
62	BHCU3116600
63	BSIU2007336
64	BSIU2102225
65	BSIU2146820
66	BSIU2189816
67	BSIU2200915
72	CADU2007306
73	CADU2009295
74	CADU2009675
75	CADU2010038
76	CADU2012895
77	CADU2013000
78	CADU2013989
79	CADU2014748
...	...

SLOTS	
Id	Slot
59	010314
61	010382
62	010384
71	010112
72	010114
74	010182
75	010184
97	010212
98	010214
100	010282
101	010284
111	010414
113	010482
114	010484
...	...

Figura 4.5: Vetores de codificação e decodificação de Contêineres e *Slots*

4.4. Considerações sobre a População

Para a construção da população inicial de cromossomos, segundo a estrutura citada no item 4.3, empregou-se o seguinte fluxo básico:

- Dimensão *x* (contêineres): de posse do vetor de codificação foi realizado um sorteio dos índices e, em seguida atribuindo-os às posições seqüenciais do cromossomo (figura 4.6 (a)).

- Dimensão *y* (*slots*): a mesma sistemática da dimensão *x* é seguida para a dimensão *y* com exceção de que, sendo o espaço de busca de *y* (*slots*) maior que a necessidade, procede-se controle da geração para não exceder o tamanho do cromossomo (figura 4.6 (b)).

PASSOS PARA A DIMENSÃO X 1 - CONSTRUIR UM VETOR (VETORX) COM TODOS OS POSSÍVEIS VALORES DO ESPAÇO DE BUSCA DA DIMENSÃO X - (CONTÊINERES A EMBARCAR) 2 - GERAR UM NÚMERO ALEATÓRIO LIMITADO AO TAMANHO DO CROMOSSOMO 3 - LOCALIZAR O VALOR CORRESPONDENTE AO NÚMERO OBTIDO NO VETORX 4 - ARMAZENAR O VALOR LOCALIZADO NA DIMENSÃO X DO CROMOSSOMO 5 - REMOVER CORRESPONDÊNCIA DO VETORX 6 - REPETIR OS PASSOS 2 A 5 ATÉ O FIM DO VETORX	**(a)**
PASSOS PARA A DIMENSÃO Y 1 - CONSTRUIR UM VETOR (VETORY) COM TODOS OS POSSÍVEIS VALORES DO ESPAÇO DE BUSCA DA DIMENSÃO Y - (SLOTS DO NAVIO) 2 - GERAR UM NÚMERO ALEATÓRIO LIMITADO AO TAMANHO DO CROMOSSOMO 3 - LOCALIZAR O VALOR CORRESPONDENTE AO NÚMERO OBTIDO NO VETORY 4 - ARMAZENAR O VALOR LOCALIZADO NA DIMENSÃO Y DO CROMOSSOMO 5 - REMOVER CORRESPONDÊNCIA DO VETORY 6 - REPETIR OS PASSOS 2 A 5 ATÉ O FIM DO VETORY OU ATÉ ATINGIR O TAMANHO DO CROMOSSOMO	**(b)**

Figura 4.6: Geração dos genes (população inicial)

Nenhuma heurística específica foi considerada para a geração da população inicial.

A abordagem utilizada para a manutenção da população foi a geracional, ou seja, os operadores genéticos substituem grande parte dos cromossomos no decorrer das novas gerações. Para o problema em questão foi adotado elitismo, preservando os cromossomos mais aptos na nova geração.

4.5. Operadores Genéticos (Seleção, Cruzamento e Mutação)

Os Operadores Genéticos na implementação do STC foram assim considerados:

- Operador de Seleção: para a seleção dos pais, base para o operador de cruzamento (*crossover*), foram construídos três métodos de seleção: torneio simples (dois cromossomos), roleta e *ranking*. Adotou-se, para

as simulações, o método da roleta por ter apresentado melhor resultado com relação à seleção por torneio e custo computacional menor em relação à seleção por *ranking*;

- Operador de Cruzamento: três métodos de *crossover* foram desenvolvidos: PMX com um ponto de corte, PMX com dois pontos de corte e OX com um ponto de corte. O método adotado foi o PMX com um ponto de corte para cromossomos pequenos (lista pequena de embarque) e dois pontos de corte, para cromossomos maiores (lista com pelo menos 100 contêineres para embarque);

- Operador de Mutação: o operador de mutação foi utilizado com dois percentuais diferentes, um aplicado à dimensão *x* (contêineres) e outro, maior, à dimensão *y* (*slots)*. A estratégia de mutação para a dimensão *x* foi a permuta simples (*swap*), onde são sorteados dois pontos no cromossomo e invertidos os genes correspondentes. Como a dimensão *y* tem espaço de busca maior que o tamanho total do cromossomo, promoveu-se mutação escolhendo aleatoriamente outro valor ainda não presente; o percentual de mutação maior foi utilizado para aumentar a diversidade e as chances de obtenção de melhores resultados, já que a população inicial pode não ter gerado solução satisfatória e o método de mutação por *swap* não insere novos alelos no cromossomo, o que é imprescindível para a dimensão *y*.

4.6. Avaliação da Solução (*Fitness*) e as Restrições

Planejamento de Embarque deve satisfazer múltiplos objetivos e estes devem ser avaliados de forma conjunta remetendo à técnica de agregação de objetivos, dada as características indissociáveis do problema, fato este exposto na introdução do presente capítulo.

Como mostrado no capítulo 2, itens 2.3.5 e 2.3.6, o Planejamento de Embarque também está sujeito à diversas restrições intrínsecas ao problema e

outras que surgem nesta abordagem com AG's. Todas tem seu grau de importância no modelo e devem ser obedecidas, sobretudo quando se configuram em restrições imprescindíveis ou *hard constraints*.

Como objetivos principais pretendidos com esta implementação, podem ser citados:

1. Minimização das remoções no pátio (BL);
2. Minimização da distância percorrida pelos recursos de pátio (DP);
3. Minimização das remoções nos portos de escala do navio (BP);
4. Minimização da distância percorrida pelos recursos de costado – navio (DN).
5. Minimização do mix de contêineres nas pilhas (20' – 40') (VQ);
6. Minimização de contêineres fora de ordem de peso em pilhas (OP);

A função objetivo está apresentada a seguir:

$$Fo = \min \sum_{c=1}^{CE} BL_c + DP_c + BP_c + DN_c + VQ_c + OP_c \qquad (1)$$

Onde:

c: contêiner considerado na iteração corrente;

CE: número total de contêineres a embarcar;

BL, DP, DN, VQ e OP: custos associados a um determinado contêiner (descritos acima).

Para atingir os objetivos descritos, o problema está sujeito à diversas restrições. As restrições consideradas neste trabalho foram divididas em dois grupos, quais sejam: restrições imprescindíveis (*hard constraints*) e restrições desejáveis (*soft constraints*).

As variáveis consideradas para modelagem das restrições estão nas tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4:

Variáveis relacionadas ao Pátio
PA: conjunto de endereços de pátio; a1, a2: índices que representam endereços no pátio; E_c: endereço do contêiner no pátio indicado pelo índice c; x: índice que representa uma rua no pátio; y: índice que representa uma altura no pátio; z: índice que representa uma profundidade no pátio; q: índice que representa uma quadra no pátio; E_{qxyz}: indica um endereço no pátio, pelos índices q, x, y, z; EO_{qxyz}: assume valor 0 se o endereço está vazio, ou 1, caso contrário; C_{qxyz}: contêiner que ocupa o endereço de pátio nos índices q, x, y, z; BL_c: assume o valor 1 se o contêiner estiver bloqueado no pátio; DP_{a1a2}: distância entre dois endereços do pátio (a1 e a2);

Tabela 4.1: Variáveis relacionadas ao Pátio

Variáveis relacionadas aos Portos de escala
PR: conjunto de portos na escala do navio; P_c: porto do contêiner de índice c; p: índice que representa a ordem dos portos de escala; BP_c: assume o valor 1 se o contêiner estiver bloqueado para o porto; C_p: assume o valor 1 se planejado para o porto p, ou 0, caso contrário;

Tabela 4.2: Variáveis relacionadas aos Portos de escala

Variáveis relacionadas aos Contêineres a Embarcar
CE: conjunto de contêineres definidos para embarque; c: índice que representa um contêiner do conjunto CE; C_c: contêiner no índice c; C4: conjunto de contêineres de 40' para embarque, sendo $C4 \subset CE$; C2: conjunto de contêineres de 20' para embarque, sendo $C2 \subset CE$;

Tabela 4.3: Variáveis relacionadas aos Contêineres a Embarcar

Variáveis relacionadas ao Navio
SD: conjunto de *slots* disponíveis no navio; BA: conjunto de *bays* disponíveis no navio; b: índice que representa uma *bay* do conjunto BA; RO: conjunto de *rows* disponíveis no navio; r: índice que representa uma *row* do conjunto RO; TI: conjunto de *tiers* disponíveis no navio; t: índice que representa uma *tier* do conjunto TI; S_c: *slot* indicado para o contêiner de índice c; S_{brt}: indica um *slot*, pelos índices b, r, t; C_{brt}: contêiner que ocupa o *slot* nos índices b, r, t; CT_{brt}: assume o valor 1 caso o contêiner seja de 40' no *slot* nos índices b, r, t, ou 0, caso contrário; SI_{brt}: assume o valor 0 caso o *slot* seja válido, ou 1, caso contrário; SI_c: assume o valor 0 caso o *slot* seja válido para o contêiner c, ou 1, caso contrário; SO_{brt}: assume o valor 0 caso o *slot* esteja vazio, ou 1, caso contrário; SR_{brt}: assume o valor 1 caso o *slot* esteja planejado para *reefer*, ou 0, caso contrário; SM_{brt}: assume o valor 1 caso o *slot* esteja planejado para cargas perigosas, ou 0, caso contrário; SG_{brt}: assume o valor 1 caso o *slot* esteja planejado para contêineres fora de padrão (OOG),

ou 0, caso contrário;
SV_{brt}: assume o valor 1 caso o *slot* esteja planejado para contêineres vazios, ou 0, caso contrário;
SE_{brt}: assume o valor 1 caso o *slot* esteja planejado para contêineres específico, ou 0, caso contrário;
SB_{brt}: assume o valor 1 caso o *slot* esteja dentro de plano para *bay* de porto específico, ou 0, caso contrário;
SD_{brt}: assume o valor 1 caso o *slot* esteja localizado *on-deck*, ou 0, caso contrário;
CD_{brt}: assume o valor 1 caso o contêiner esteja planejado para somente *on-deck*, ou 0, caso contrário;
ED_c: assume o valor 1 caso exista erro na alocação de contêiner *in-hold,* ou 0, caso contrário;
CR_{brt}: assume o valor 1 caso o contêiner seja *reefer*, ou 0, caso contrário;
ER_c: assume o valor 1 caso exista erro na alocação de contêiner *reefer,* ou 0, caso contrário;
CM_{brt}: assume o valor 1 caso o contêiner contenha cargas perigosas, ou 0, caso contrário;
EM_c: assume o valor 1 caso exista erro na alocação de contêiner com carga perigosa, ou 0, caso contrário;
CG_{brt}: assume o valor 1 caso o contêiner seja fora de padrão (OOG), ou 0, caso contrário;
EG_c: assume o valor 1 caso exista erro na alocação de contêiner fora de padrão (OOG), ou 0, caso contrário;
CV_{brt}: assume o valor 1 caso o contêiner esteja vazio, ou 0, caso contrário;
EV_c: assume o valor 1 caso exista erro na alocação de contêiner vazio, ou 0, caso contrário;
CE_{brt}: assume o valor 1 caso o contêiner seja específico (plano de carga), ou 0, caso contrário;
EE_c: assume o valor 1 caso exista erro na alocação de contêiner específico (plano de carga), ou 0, caso contrário;
CB_{brt}: assume o valor 1 caso o contêiner seja para porto com *bay* específica (plano de carga), ou 0, caso contrário;
EB_c: assume o valor 1 caso exista erro na alocação de contêiner para porto com *bay* específica, ou 0, caso contrário;
CP_{brt}: peso do contêiner nos índices b, r, t;
CA_{brt}: altura do contêiner nos índices b, r, t;
$MAXP_r$: peso máximo na *row* r, assumindo o valor *in-hold*, caso a *tier* esteja *in-hold*, ou *on-deck*, caso contrário;
$MAXA_r$: altura máxima na *row* r, assumindo o valor *in-hold*, caso a *tier* esteja *in-hold*, ou *on-deck*, caso contrário;
DN_{s1s2}: distância entre dois *slots* no navio (s1 e s2);

Tabela 4.4: Variáveis relacionadas ao Navio

As restrições, divididas nos dois grupos comentados, foram assim modeladas:

Restrições Imprescindíveis ou *Hard Constraints*

1 – Contêiner "flutuando" no navio: não é possível sugerir *slots* que não estejam devidamente sustentados por outros contêineres, ou que não sejam os primeiros das pilhas. Esta restrição surge no modelo com AG, já que em soluções manuais ou assistidas tal situação não seria encontrada;

$$\sum_{c=1}^{CE} SI_c = 0 \rightarrow SI_c = SI_{brt} \therefore SI_c = 0 \Leftrightarrow (SI_{br(t-1)} = 0) \wedge (SO_{br(t-1)} = 1) \quad (2)$$

2 – *Slot* inválido para contêiner de 40': cada contêiner de 40' necessita de dois *slots*; a solução sugere somente o primeiro deles, podendo ser um *slot* inválido quando agregado ao segundo *slot*. Esta também é uma restrição que surge no modelo totalmente automatizado;

$$\sum_{c=1}^{C4} SI_c = 0 \rightarrow SI_c = SI_{brt} \therefore$$
$$SI_c = 0 \Leftrightarrow ((SI_{(b-1)rt} = 1) \wedge (SI_{(b+1)rt} = 1)) \vee ((SO_{(b-1)rt} = 1) \wedge (SO_{(b+1)rt} = 1)) \quad (3)$$

3 – *Stacking height*: a altura máxima da pilha é uma das medidas de estabilidade e das características estruturais da embarcação;

$$\sum_{t=1}^{TI} CA_{brt} \leq MAXA_r \quad (4)$$

4 – *Stacking weight*: o peso máximo da pilha é uma medida de estabilidade imposta pelo plano de carga do navio;

$$\sum_{t=1}^{TI} CP_{brt} \leq MAXP_r \quad (5)$$

5 – Contêiner *in-hold*: alguns contêineres podem estar impedidos de serem acondicionados no porão (*under deck* ou *in-hold*) do navio;

$$\sum_{c=1}^{CE} ED_c = 0,,, ED_c = 1 \Leftrightarrow (CD_{brt} = 1 \wedge SD_{brt} = 0) \quad (6)$$

6 – Contêiner *reefer*: existem *slots* específicos (segregados) para este tipo de carga;

$$\sum_{c=1}^{CE} ER_c = 0,,, ER_c = 1 \Leftrightarrow (CR_{brt} = 1 \wedge SR_{brt} = 1) \tag{7}$$

7 – Contêiner com cargas perigosas: existem *slots* específicos (segregados) para este tipo de carga;

$$\sum_{c=1}^{CE} EM_c = 0,,, E_c = 1 \Leftrightarrow (CM_{brt} = 1 \wedge SM_{brt} = 1) \tag{8}$$

8 – Contêiner OOG: existem *slots* específicos (segregados) para este tipo de carga;

$$\sum_{c=1}^{CE} EG_c = 0,,, EG_c = 1 \Leftrightarrow (CG_{brt} = 1 \wedge SG_{brt} = 1) \tag{9}$$

9 – Contêiner vazio: existem *slots* específicos (segregados) para este tipo de carga;

$$\sum_{c=1}^{CE} EV_c = 0,,, EV_c = 1 \Leftrightarrow (CV_{brt} = 1 \wedge SV_{brt} = 1) \tag{10}$$

10 – Contêiner planejado para *slot* específico: existem *slots* específicos (segregados) para determinado contêiner;

$$\sum_{c=1}^{CE} EE_c = 0,,, EE_c = 1 \Leftrightarrow (CE_{brt} = 1 \wedge SE_{brt} = 1) \tag{11}$$

11 – *Bay* planejada para porto: podem existir *bays* específicas para determinado porto;

$$\sum_{c=1}^{CE} EB_c = 0,,,EB_c = 1 \Leftrightarrow (CB_{brt} = 1 \wedge SB_{brt} = 1) \tag{12}$$

Restrições desejáveis ou *Soft Constraints*

1 – Remoções de pátio: é desejável o menor número possível de remoções, ou seja, sugerir as melhores posições evitando remoções desnecessárias;

$$\min \sum_{c=1}^{CE} BL_c, \cdots c = C_{qxyz} \therefore BL_c = 1 \Leftrightarrow EO_{qx(y+1)z} = 1 \tag{13}$$

2 – Distância percorrida pelo recurso de pátio: o desejável é a menor distância possível, ou seja, iniciar e finalizar a remoção em uma quadra para depois mover-se à outras quadras;

$$\min \sum_{c=1}^{CE} DP_{\underset{c}{E}\,\underset{c+1}{E}} \tag{14}$$

3 – Contêiner bloqueando movimentação em portos seguintes (Portos de Escala);

$$\min \sum_{c=1}^{CE} BP_c, \ldots c = S_{brt} \therefore BP_c = 1 \Leftrightarrow SO_{br(t+1)} = 1 \tag{15}$$

4 – Distância percorrida pelo recurso de costado: o desejável é a menor distância possível, ou seja, utilizar ao máximo as *bays* iniciadas evitando deslocamento de recursos. Como comentado, o modelo proposto trabalha somente com um recurso de costado (navio). Esta condição passa a ser conflitante com os critérios de estabilidade do navio, já que carregar totalmente uma *bay* para depois seguir para outra pode causar perda da estabilidade estática. Os critérios inerentes à estabilidade somente foram tratados considerando duas restrições macro mencionadas: *stacking height* e *stacking*

weight, as quais são fornecidas como dados de entrada presentes no plano de carga;

$$\min \sum_{c=1}^{CE} DN_{S_c S_{c+1}} \tag{16}$$

5 – Contêiner de 40' sobre 20' (ou inverso): o desejável é manter as pilhas uniformes quanto aos tamanhos dos contêineres;

$$\min \sum_{t=1}^{TI} (| CT_{br(t+1)} - CT_{brt} |) \tag{17}$$

6 – Contêiner fora de ordem de peso: de modo geral, pede-se para que os contêineres sejam alocados no navio ordenados por peso, com o mais pesado embaixo;

$$\min \sum_{t=1}^{TI} (CP_{br(t+1)} - CP_{brt}) \tag{18}$$

Como destacado, o modelo de avaliação das restrições adotado foi a estratégia de agregação de objetivos. Neste modelo, para segregar e priorizar restrições mais importantes, adotou-se uma tabela de pesos estáticos (tabela 4.5) definido por restrição. Soluções não factíveis neste modelo de pesos implementado ainda sofrem uma extra penalização, forçando uma convergência mais rápida para o espaço de soluções factíveis. A penalização extra é proporcional ao número total de contêineres no embarque considerado. Esta estratégia impede também que cromossomos inválidos tenham valores de *fitness* relativamente melhores que soluções válidas que sejam ruins na avaliação das *soft constraints*.

PESOS E VALORES APLICADOS				
Restrição			**Peso**	**Valor aplicado***
Hard Constraints	1	Contêineres "flutuando" no navio	19	1000
	2	*Slot* inválido para contêiner de 40'	18	900
	3	*Stacking height*	14	500
	4	*Stacking weight*	14	500
	5	Contêiner *in-hold*	13	400
	6	Contêiner *reefer*	13	400
	7	Contêiner com carga perigosa	13	400
	8	Contêiner OOG	13	400
	9	Contêiner Vazio	13	400
	10	Contêiner planejado para *slot* específico	11	200
	11	*Bay* planejada para porto	10	100
Soft Constraints	1	Remoções de pátio	2	10
	2	Distância percorrida no recurso de pátio	2	10
	3	Contêiner bloqueando movimentação em portos	5	25
	4	Distância percorrida pelo recurso de costado	2	10
	5	Contêiner de 40' sobre 20' (ou inverso)	2	10
	6	Contêiner fora de ordem de peso	3	15

Tabela 4.5: Tabela de Pesos e Valores Aplicados

* ***Valor aplicado*** *é um valor empírico adotado com base na relevância da variável considerada.*

De forma geral, a aplicação dos pesos e obtenção da avaliação total segue o seguinte modelo:

$$F = \sum_{i=1}^{n} \omega_i f_i$$

Onde:

i: índice que representa a restrição que está sendo avaliada;

n: número total de restrições;

ω_i : peso correspondente à restrição;

f_i : função que avalia presença da restrição.

A figura 4.7 ((a) e (b)) mostra o procedimento em linguagem de programação para aplicação dos pesos por restrição avaliada, incluindo a

penalização extra em caso de solução não válida (soma das *hard constraints* maior que zero).

ATRIBUIÇÃO DE PESOS 1 – CONSTRUIR UM VETOR (VETORA) COM VALORES EMPÍRICOS A SEREM APLICADOS ÀS RESTRIÇÕES ADMISSÍVEIS – UM VALOR PARA CADA RESTRIÇÃO 2 – CONSTRUIR UM VETOR (VETORB) COM VALORES EMPÍRICOS A SEREM APLICADOS ÀS RESTRIÇÕES NÃO ADMISSÍVEIS – UM VALOR PARA CADA RESTRIÇÃO 3 – OBTER QUANTIDADE OBTIDA EM DETERMINADA RESTRIÇÃO APÓS PROCESSO EVOLUTIVO 4 – MULTIPLICAR QUANTIDADE OBTIDA PELO VALOR CORRESPONDENTE À RESTRIÇÃO OBTIDO NOS VETORES A E B 5 – ACUMULAR VALORES PARA DETERMINAR AVALIAÇÃO GERAL (VTOTAL) 6 – REPETIR PASSOS 3 A 5 PARA TODAS AS RESTRIÇÕES	**(a)**
ATRIBUIÇÃO DE PESOS – PENALIZAÇÃO EXTRA 1 – DETERMINAR VALOR EMPÍRICO PARA PENALIZAÇÃO EXTRA (VEXTRA) 2 – SE EXISTIR ALGUMA RESTRIÇÃO NÃO ADMISSÍVEL APÓS PROCESSO EVOLUTIVO, MULTIPLICAR VALOR TOTAL DOS PESOS (VTOTAL) PELA PENALIZAÇÃO EXTRA (VEXTRA)	**(b)**

Figura 4.7: Aplicação de pesos (*Fitness*)

4.7. Rotina de reparação

De acordo com o capítulo 3, item 3.4.3, rotinas de reparação de cromossomo trabalham em soluções infactíveis (cromossomos inválidos devido à *hard constraints*) promovendo ajustes para trazê-lo ao espaço de soluções factíveis. Neste trabalho foi proposta uma rotina de reparação agindo somente sobre na restrição 1 do grupo de restrições imprescindíveis destacadas no item anterior (sugestão de *slots* que originam contêiner “flutuando” a bordo). Como esta restrição é somente inerente a modelos automatizados, não sendo gerado em planejamentos manuais ou assistido, objetivou-se forçar a eliminação desta característica indesejável das soluções apresentadas.

Dois critérios foram adotados para aplicação da rotina de reparação:

1. Reparação somente na primeira geração: neste caso, somente na primeira geração obtida é utilizada rotina de reparação. Nas gerações seguintes segue-se com a abordagem convencional (capítulo 3, item 3.4.3), penalizando-se as restrições de acordo com os pesos explicitados no item anterior;

2. Reparação em todas as gerações: nesta abordagem, todas as soluções geradas são reparadas, caso seja detectada a restrição;

A figura 4.8 ilustra o funcionamento da rotina reparadora. O início da seta em vermelho indica o *slot* que foi sugerido pelo AG (0214) e o *slot* final (0204) após a ação da rotina reparadora, ou seja, uma vez detectado que o contêiner estaria "flutuando" se acondicionado no *slot* sugerido pelo AG, é iniciado a busca por um *slot* mais indicado na mesma pilha *(row)*, testando os *slots* imediatamente abaixo. A detecção da condição "flutuando" se dá pela checagem de não presença de contêiner no *slot* abaixo ao sugerido e se o *slot* não é o primeiro da pilha.

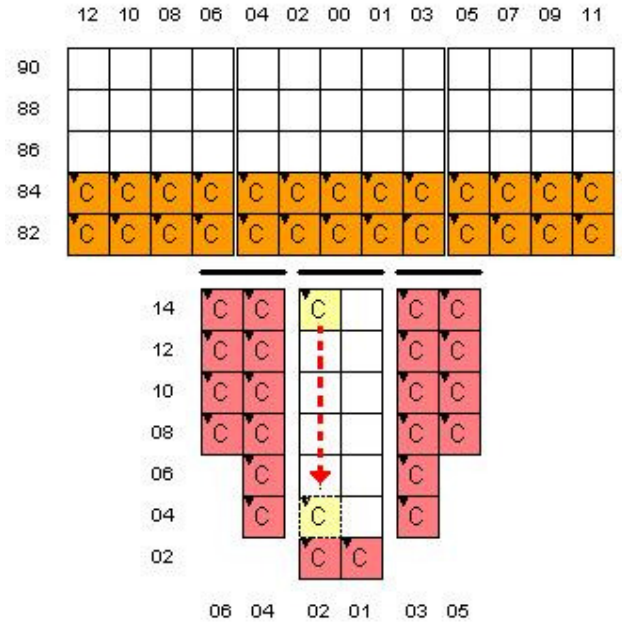


Figura 4.8: Ação da rotina reparadora de cromossomo

4.8. Funcionamento básico

Este item é dedicado à descrição geral do funcionamento da implementação proposta.

4.8.1. Dados utilizados

Para tratamento do problema do Planejamento de Embarque é necessário manuseio de uma série de dados de apoio, como já observado (dados de pátio e dados de navio/viagem).

Estes dados podem ser divididos em três grandes grupos:

1. Dados de Pátio: os dados do pátio são referentes à disposição dos contêineres no pátio (endereçamento) no momento da execução do AG para Planejamento de Embarque. Também faz parte deste grupo todas características dos contêineres alocados no pátio;

2. Dados da Viagem: os dados da viagem são os referentes aos contêineres que serão embarcados em determinado navio em viagem específica. Neste grupo encontram-se os Portos de escala atendidos pelo navio;

3. Dados do Navio: os dados do navio são referentes à estrutura física do navio, com os parâmetros de estabilidade (pesos e alturas máximos de pilhas) bem como a ocupação atual do navio;

O pátio considerado nesta implementação possui 9 quadras (A, B, C, D, E, F, G, H e I). As quadras possuem as mesmas dimensões e capacidades, sendo 10 ruas (dimensão *x*), 5 alturas (dimensão *y*) e 5 filas (dimensão *z*) perfazendo um total de 250 endereços alocáveis (capacidade de armazenamento para 250 TEU's) por quadra.

Os dados do grupo 1 (Dados de Pátio) foram assim distribuídos e considerados:

a. Ocupação 1: nesta ocupação foi utilizada uma única quadra (quadra A) com armazenamento de 14 contêineres (figura 4.9);

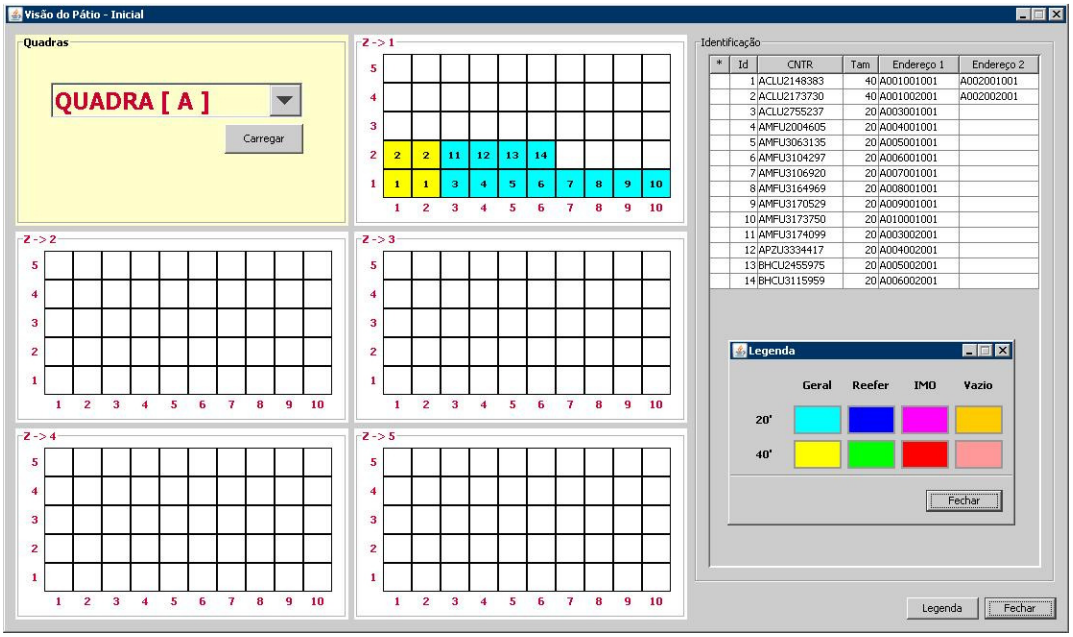


Figura 4.9: Ocupação de pátio 1, quadra A

b. Ocupação 2: para a ocupação 2 foram utilizadas duas quadras (A e B) sendo armazenados 300 contêineres (figura 4.10);

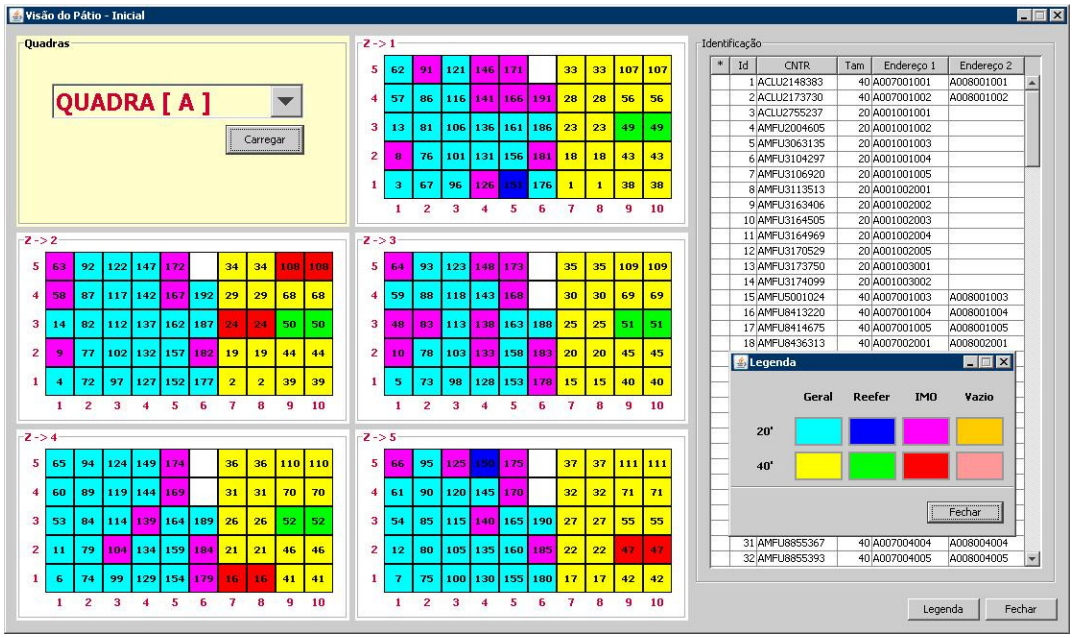


Figura 4.10: Ocupação de pátio 2, quadra A

c. Ocupação 3: foram armazenados 1500 contêineres nesta ocupação utilizando, para tanto, 9 quadras (A, B, C, D, E, F, G, H e I) (figura 4.11).

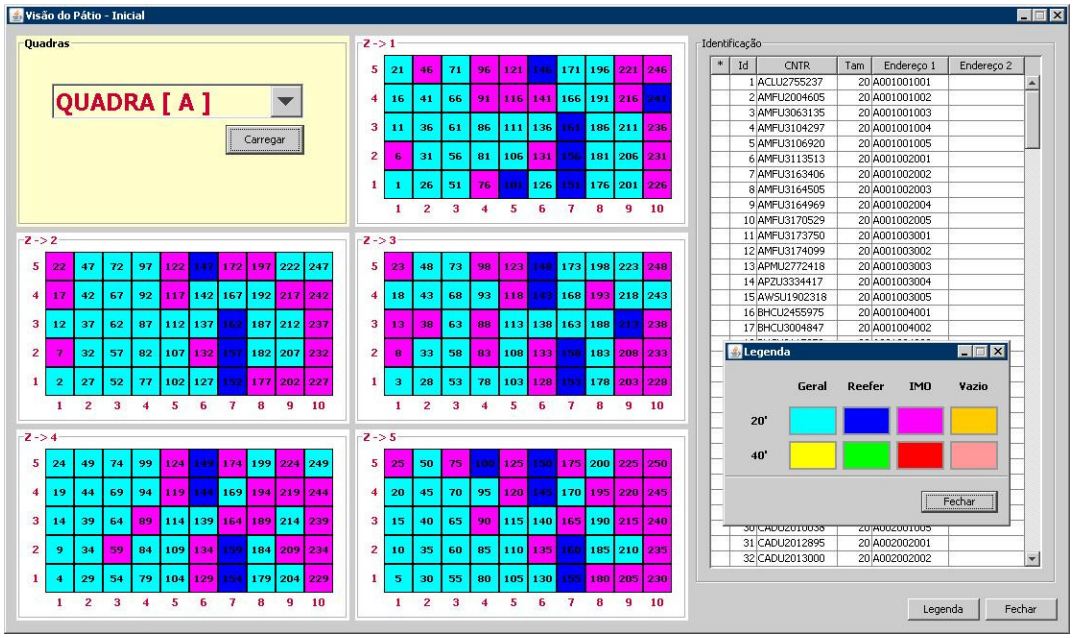


Figura 4.11: Ocupação de pátio 3, quadra A

Os dados do grupo 2 (Dados da Viagem) foram assim dispostos:

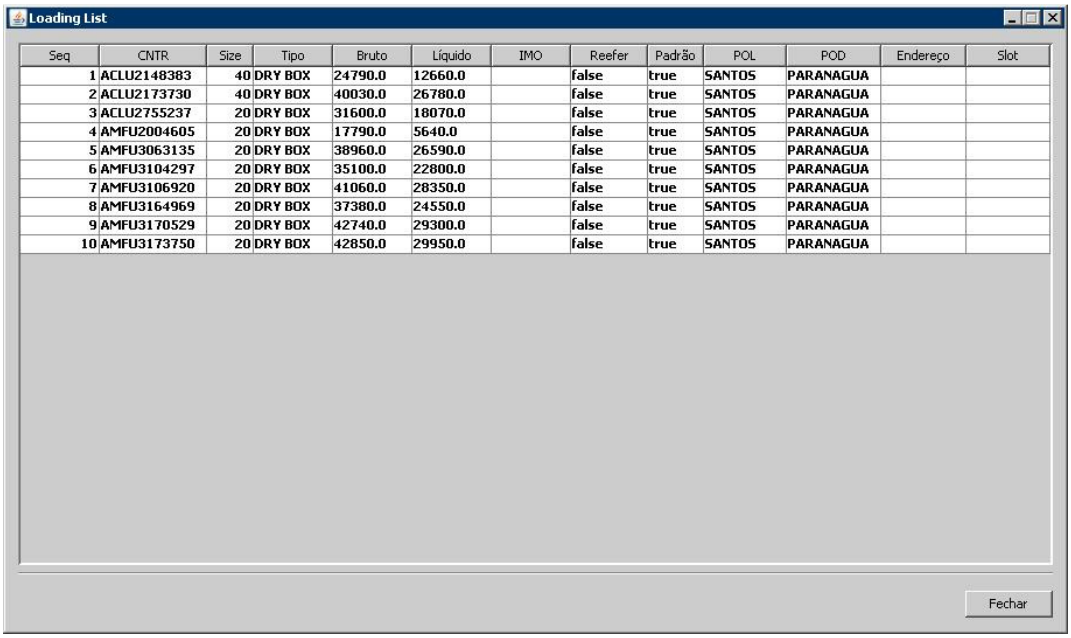
a. Viagem 1: a viagem foi composta por 10 contêineres para embarque, com as características das tabelas 4.6 e 4.7. A lista de contêineres (*Loading List*) está disposta na figura 4.12.

Tamanhos de Contêineres	
Contêineres de 20’	08
Contêineres de 40’	02
TOTAL	10

Tabela 4.6: Contêineres viagem 1

Portos	
Paranaguá	10
TOTAL	10

Tabela 4.7: Portos viagem 1



Loading List

Seq	CNTR	Size	Tipo	Bruto	Líquido	IMO	Reefer	Padrão	POL	POD	Endereço	Slot
1	ACLU2148383	40	DRY BOX	24790.0	12660.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
2	ACLU2173730	40	DRY BOX	40030.0	26780.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
3	ACLU2755237	20	DRY BOX	31600.0	18070.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
4	AMFU2004605	20	DRY BOX	17790.0	5640.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
5	AMFU3063135	20	DRY BOX	38960.0	26590.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
6	AMFU3104297	20	DRY BOX	35100.0	22800.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
7	AMFU3106920	20	DRY BOX	41060.0	28350.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
8	AMFU3164969	20	DRY BOX	37380.0	24550.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
9	AMFU3170529	20	DRY BOX	42740.0	29300.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
10	AMFU3173750	20	DRY BOX	42850.0	29950.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		

Fechar

Figura 4.12: *Loading List* viagem 1

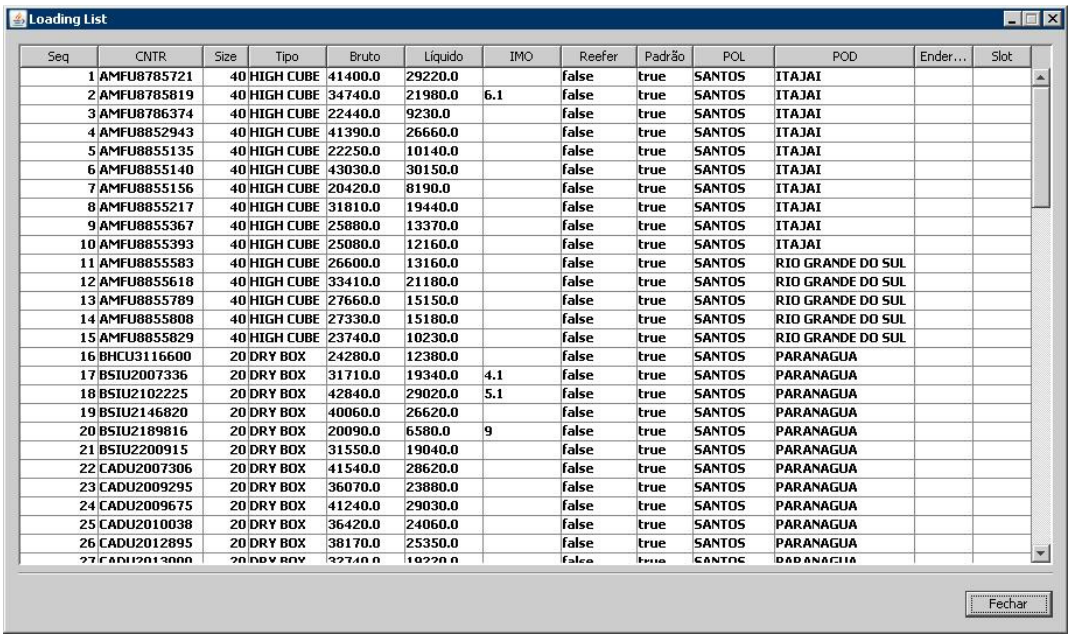
b. Viagem 2: nesta viagem foram separados 100 contêineres para embarque, com as características das tabelas 4.8 e 4.9. A lista de contêineres (*Loading List*) está disposta na figura 4.13.

Tamanhos de Contêineres	
Contêineres de 20’	56
Contêineres de 40’	44
TOTAL	100

Tabela 4.8: Contêineres viagem 2

Portos	
Itajaí	33
Paranaguá	34
Rio Grande do Sul	33
TOTAL	100

Tabela 4.9: Portos viagem 2



Loading List

Seq	CNTR	Size	Tipo	Bruto	Líquido	IMO	Reefer	Padrão	POL	POD	Ender...	Slot
1	AMFU8785721	40	HIGH CUBE	41400.0	29220.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
2	AMFU8785819	40	HIGH CUBE	34740.0	21980.0	6.1	false	true	SANTOS	ITAJAI		
3	AMFU8786374	40	HIGH CUBE	22440.0	9230.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
4	AMFU8852943	40	HIGH CUBE	41390.0	26660.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
5	AMFU8855135	40	HIGH CUBE	22250.0	10140.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
6	AMFU8855140	40	HIGH CUBE	43030.0	30150.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
7	AMFU8855156	40	HIGH CUBE	20420.0	8190.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
8	AMFU8855217	40	HIGH CUBE	31810.0	19440.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
9	AMFU8855367	40	HIGH CUBE	25880.0	13370.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
10	AMFU8855393	40	HIGH CUBE	25080.0	12160.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
11	AMFU8855583	40	HIGH CUBE	26600.0	13160.0		false	true	SANTOS	RIO GRANDE DO SUL		
12	AMFU8855618	40	HIGH CUBE	33410.0	21180.0		false	true	SANTOS	RIO GRANDE DO SUL		
13	AMFU8855789	40	HIGH CUBE	27660.0	15150.0		false	true	SANTOS	RIO GRANDE DO SUL		
14	AMFU8855808	40	HIGH CUBE	27330.0	15180.0		false	true	SANTOS	RIO GRANDE DO SUL		
15	AMFU8855829	40	HIGH CUBE	23740.0	10230.0		false	true	SANTOS	RIO GRANDE DO SUL		
16	BHCU3116600	20	DRY BOX	24280.0	12380.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
17	BSIU2007336	20	DRY BOX	31710.0	19340.0	4.1	false	true	SANTOS	PARANAGUA		
18	BSIU2102225	20	DRY BOX	42840.0	29020.0	5.1	false	true	SANTOS	PARANAGUA		
19	BSIU2146820	20	DRY BOX	40060.0	26620.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
20	BSIU2189816	20	DRY BOX	20090.0	6580.0	9	false	true	SANTOS	PARANAGUA		
21	BSIU2200915	20	DRY BOX	31550.0	19040.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
22	CADU2007306	20	DRY BOX	41540.0	28620.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
23	CADU2009295	20	DRY BOX	36070.0	23880.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
24	CADU2009675	20	DRY BOX	41240.0	29030.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
25	CADU2010038	20	DRY BOX	36420.0	24060.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
26	CADU2012895	20	DRY BOX	38170.0	25350.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
27	CADU2013000	20	DRY BOX	32740.0	18220.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		

Fechar

Figura 4.13: *Loading List* viagem 2

c. Viagem 3: na viagem 3 foram alocados 300 contêineres para embarque, com as características das tabelas 4.10 e 4.11. A lista de contêineres (*Loading List*) está disposta na figura 4.14.

Tamanhos de Contêineres	
Contêineres de 20’	165
Contêineres de 40’	135
TOTAL	300

Tabela 4.10: Contêineres viagem 3

Portos	
Itajaí	137
Paranaguá	80
Rio Grande do Sul	83
TOTAL	300

Tabela 4.11: Portos viagem 3

Loading List

Seq	CNTR	Size	Tipo	Bruto	Líquido	IMO	Reefer	Padrão	POL	POD	Ender...	Slot
1	ACLU2148383	40	DRY BOX	24790.0	12660.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
2	ACLU2173730	40	DRY BOX	40030.0	26780.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
3	ACLU2755237	20	DRY BOX	31600.0	18070.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
4	AMFU2004605	20	DRY BOX	17790.0	5640.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
5	AMFU3063135	20	DRY BOX	38960.0	26590.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
6	AMFU3104297	20	DRY BOX	35100.0	22800.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
7	AMFU3106920	20	DRY BOX	41060.0	28350.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
8	AMFU3113513	20	DRY BOX	45820.0	33580.0	5.1	false	true	SANTOS	PARANAGUA		
9	AMFU3163406	20	DRY BOX	42880.0	30730.0	5.1	false	true	SANTOS	PARANAGUA		
10	AMFU3164505	20	DRY BOX	41440.0	29170.0	5.1	false	true	SANTOS	PARANAGUA		
11	AMFU3164969	20	DRY BOX	37380.0	24550.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
12	AMFU3170529	20	DRY BOX	42740.0	29300.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
13	AMFU3173750	20	DRY BOX	42850.0	29950.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
14	AMFU3174099	20	DRY BOX	35740.0	23590.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		
15	AMFU5001024	40	DRY BOX	40220.0	28410.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
16	AMFU8413220	40	HIGH CUBE	32460.0	20290.0	2.3	false	true	SANTOS	ITAJAI		
17	AMFU8414675	40	HIGH CUBE	44180.0	32060.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
18	AMFU8436313	40	HIGH CUBE	41760.0	29720.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
19	AMFU8473981	40	HIGH CUBE	42340.0	30590.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
20	AMFU8499414	40	HIGH CUBE	43760.0	30870.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
21	AMFU8527692	40	HIGH CUBE	24570.0	12570.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
22	AMFU8663220	40	HIGH CUBE	28550.0	15200.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
23	AMFU8785721	40	HIGH CUBE	41400.0	29220.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
24	AMFU8785819	40	HIGH CUBE	34740.0	21980.0	6.1	false	true	SANTOS	ITAJAI		
25	AMFU8786374	40	HIGH CUBE	22440.0	9230.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
26	AMFU8852943	40	HIGH CUBE	41390.0	26660.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		
27	AMFU8855135	40	HIGH CUBE	22250.0	10140.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		

Fechar

Figura 4.14: *Loading List* viagem 3

O roteiro de viagem (Portos de Escala) para todas as configurações utilizadas foi o mesmo, conforme ilustrado na figura 4.15.

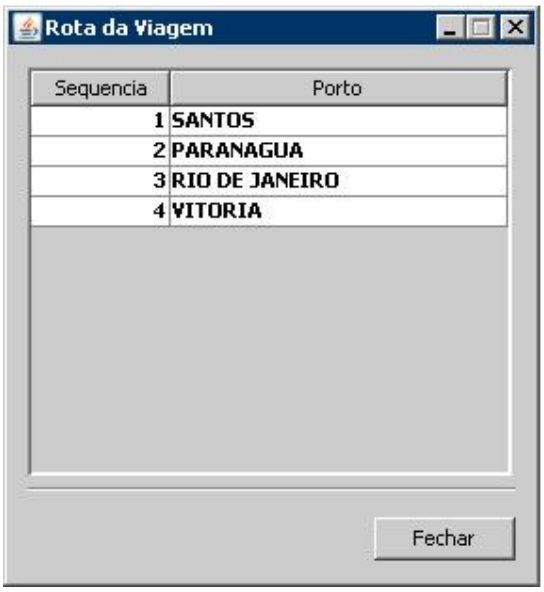


Figura 4.15: Portos de Escala

Para o grupo 3 (Dados da Navio) foi considerado somente o desenho de uma estrutura de navio composta por 29 *bays*, sendo que para cada *bay* foi desenhada estrutura específica (*rows x tiers*). A figura 4.16 ilustra a estrutura da *bay* 3.

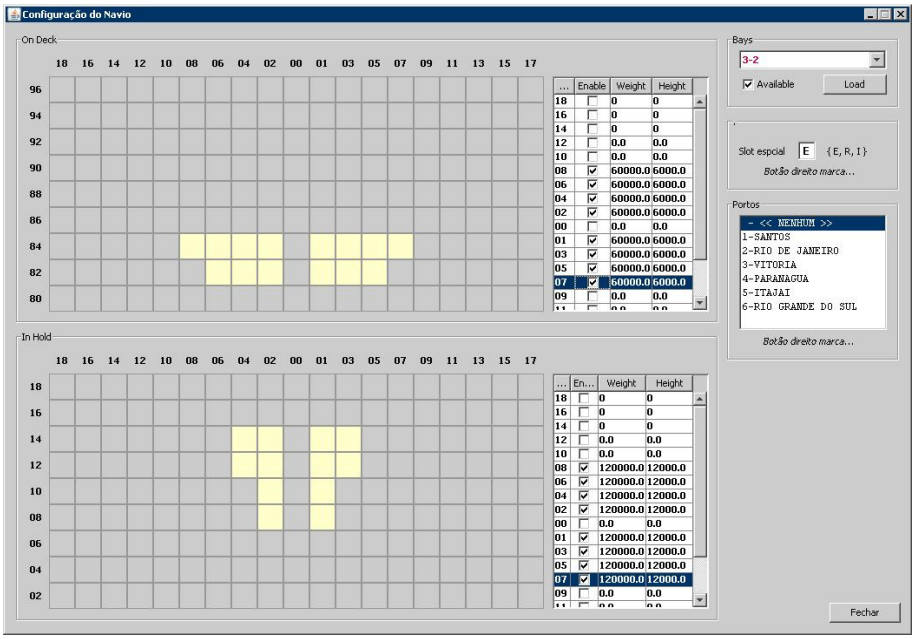
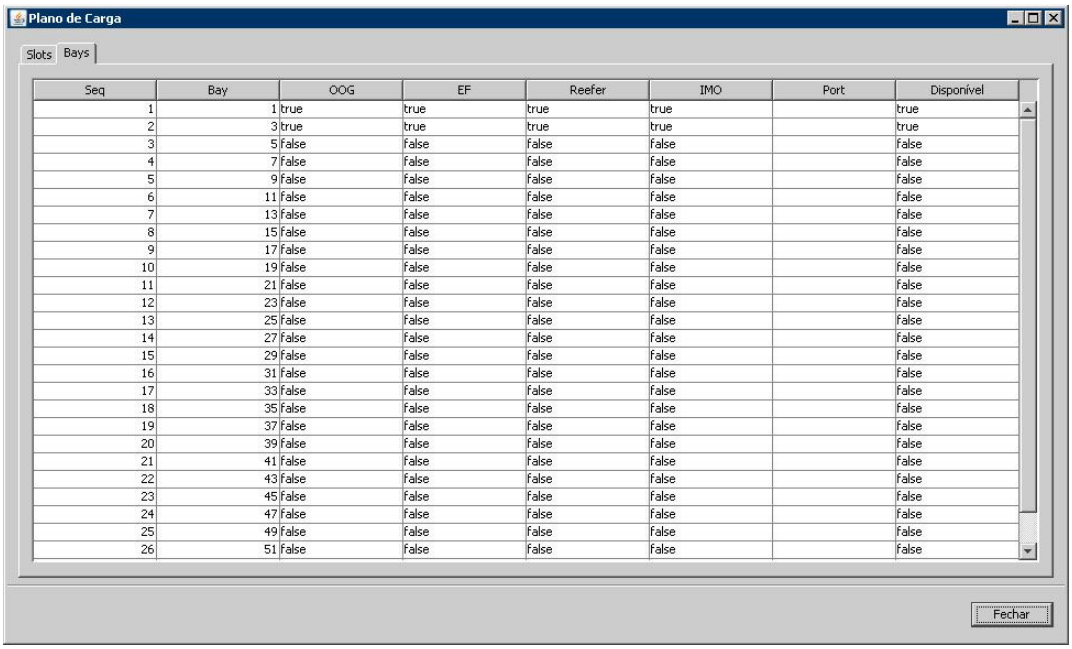


Figura 4.16: *Bay* 3-2

A capacidade total da embarcação utilizada é de 2612 *slots* (2612 TEU's). De acordo com os planos de carga, os *slots* podem estar indisponíveis para determinado Terminal de Contêineres; algumas *bays*, por exemplo, devem ser desconsideradas para carregamento e não podem fazer parte do espaço de busca das soluções factíveis. Na proposição desta pesquisa, *slots* não disponíveis no plano de carga não foram considerados no espaço de busca (figura 4.17).



Seq	Bay	OOG	EF	Reefer	IMO	Port	Disponível
1	1	true	true	true	true		true
2	3	true	true	true	true		true
3	5	false	false	false	false		false
4	7	false	false	false	false		false
5	9	false	false	false	false		false
6	11	false	false	false	false		false
7	13	false	false	false	false		false
8	15	false	false	false	false		false
9	17	false	false	false	false		false
10	19	false	false	false	false		false
11	21	false	false	false	false		false
12	23	false	false	false	false		false
13	25	false	false	false	false		false
14	27	false	false	false	false		false
15	29	false	false	false	false		false
16	31	false	false	false	false		false
17	33	false	false	false	false		false
18	35	false	false	false	false		false
19	37	false	false	false	false		false
20	39	false	false	false	false		false
21	41	false	false	false	false		false
22	43	false	false	false	false		false
23	45	false	false	false	false		false
24	47	false	false	false	false		false
25	49	false	false	false	false		false
26	51	false	false	false	false		false

Figura 4.17: *Bays* disponíveis (plano de carga)

4.8.2. Parâmetros e processamento

Os parâmetros que devem ser configurados para início do processamento da solução foram divididos em dois grupos:

1. Parâmetros do AG: os parâmetros utilizados para o AG estão disponíveis na tabela 4.12. A interface para configuração pode ser vista na figura 4.18.

AG	
População (cromossomos)	20 ~ 120
Elitismo (cromossomos)	2 ~ 12
Seleção	Torneio; Roleta; Ranking
Método *Crossover*	PMX (1 e 2 pontos); OX
Crossover (%)	60 ~ 80
Mutação em *x* (contêineres) (%)	1 ~ 2
Mutação em *y* (*slots*) (%)	1 ~ 5
Reparação	1ª. Geração; Todas Gerações

Tabela 4.12: Parâmetros AG

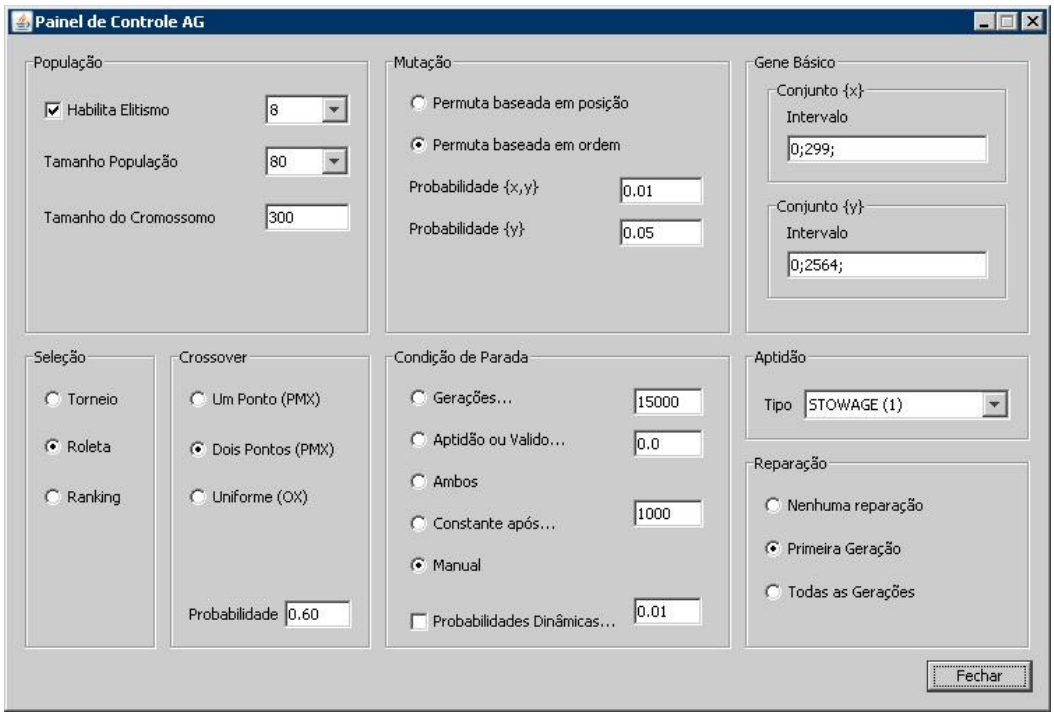


Figura 4.18: Configuração do AG

2. Parâmetros do ambiente: os parâmetros do ambiente constituem-se na escolha da alocação de pátio e a viagem a ser utilizada na simulação. A figura 4.19 (a) mostra a interface para esta configuração.

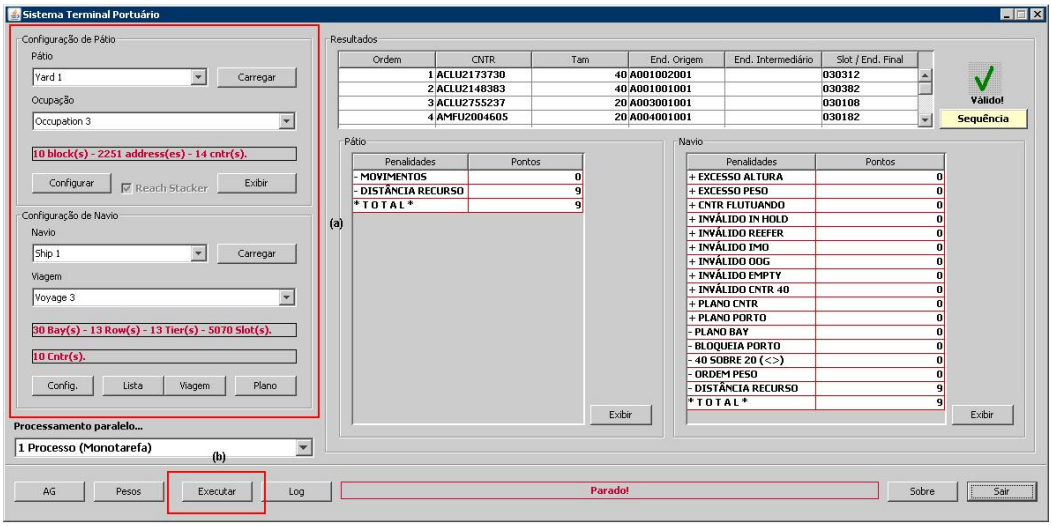


Figura 4.19: Parâmetros gerais

Posteriormente às configurações citadas, o início do processamento se dá pelo acionamento do botão “Executar”, exibido na figura 4.19 (b).

4.8.3. Saídas

A principal saída desta implementação é a Lista de Embarque, com as seqüências das remoções dos contêineres do pátio e a seqüência de alocação dos contêineres no navio, com as indicações dos *slots* relativos. A figura 4.20 mostra a interface mais importante da implementação.

Loading List

Seq	CNTR	Size	Tipo	Bruto	Líquido	IMO	Reefer	Padrão	POL	POD	...	Slot
1	CADU2032356	20	DRY BOX	36840.0	23310.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		210102
2	CCRU1070475	20	DRY BOX	15830.0	3760.0	5.1	false	true	SANTOS	ITAJAI		090202
3	CLHU8449469	40	HIGH CUBE	44680.0	31200.0		false	true	SANTOS	RIO GRANDE DO SUL		110302
4	CLHU8291440	40	HIGH CUBE	32230.0	19940.0		false	true	SANTOS	RIO GRANDE DO SUL		150402
5	CADU2028715	20	DRY BOX	39650.0	27780.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		150502
6	CCRU1072349	20	DRY BOX	17190.0	3980.0	5.1	false	true	SANTOS	ITAJAI		210302
7	CADU2029624	20	DRY BOX	35710.0	23490.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		190482
8	AMFU8852943	40	HIGH CUBE	41390.0	26660.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		191182
9	CADU2025830	20	DRY BOX	34430.0	21590.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		190906
10	CGMU4925573	40	HIGH CUBE	20210.0	6620.0		true	true	SANTOS	RIO GRANDE DO SUL		210502
11	CADU2023797	20	DRY BOX	23200.0	9990.0	8	false	true	SANTOS	PARANAGUA		210282
12	AMFU8855217	40	HIGH CUBE	31810.0	19440.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		290102
13	CADU2030266	20	DRY BOX	30750.0	18720.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		291004
14	CADU2009675	20	DRY BOX	41240.0	29030.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		310202
15	AMFU8855156	40	HIGH CUBE	20420.0	8190.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		290302
16	CPSU5126653	40	HIGH CUBE	39260.0	26120.0		true	true	SANTOS	RIO GRANDE DO SUL		250182
17	AMFU8785819	40	HIGH CUBE	34740.0	21980.0	6.1	false	true	SANTOS	ITAJAI		190602
18	CADU2018851	20	DRY BOX	15800.0	3660.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		230602
19	CADU2009295	20	DRY BOX	36070.0	23880.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		310204
20	CCRU1072420	20	DRY BOX	17000.0	3710.0	5.1	false	true	SANTOS	ITAJAI		310206
21	CLHU8195554	40	HIGH CUBE	43500.0	31070.0		false	true	SANTOS	RIO GRANDE DO SUL		290482
22	CLHU8601993	40	HIGH CUBE	43620.0	31770.0		false	true	SANTOS	RIO GRANDE DO SUL		190604
23	CLHU4149015	40	DRY BOX	42590.0	29410.0		false	true	SANTOS	RIO GRANDE DO SUL		170982
24	CADU2032171	20	DRY BOX	42990.0	30400.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		190582
25	CADU2032417	20	DRY BOX	36250.0	23880.0		false	true	SANTOS	PARANAGUA		190502
26	AMFU8855140	40	HIGH CUBE	43030.0	30150.0		false	true	SANTOS	ITAJAI		191082
27	CCRU1071996	20	DRY BOX	17220.0	5250.0	5.1	false	true	SANTOS	ITAJAI		190682

Fechar

Figura 4.20: Lista de Embarque

A figura 44 exibe uma segunda interface de saída da implementação, que dá o estado corrente do processamento, indicando como está o processo de otimização (figura 4.21 (a)) do AG e se já foi obtido alguma solução factível (figura 4.21 (b)).

Sistema Terminal Portuário

Configuração de Pátio
Pátio: Yard 1 — Carregar
Ocupação: Occupation 2
10 block(s) - 2251 address(es) - 300 cntr(s).
Configurar — Reach Stacker — Exibir

Configuração de Navio
Navio: Ship 1 — Carregar
Viagem: Voyage 2
30 Bay(s) - 13 Row(s) - 13 Tier(s) - 5070 Slot(s).
99 Cntr(s).
Config. — Lista — Viagem — Plano

Processamento paralelo...
1 Processo (Monotarefa)

(a)

Resultados

Ordem	CNTR	Tam	End. Origem	End. Intermediário	Slot / End. Final
1	CADU2032356	20	A002005004		210102
2	CCRU1070475	20	A005004002		090202
3	CLHU8449469	40	B007002002		110302
4	CLHU8291440	40	B007002001		150402

(b)
Válido!
Sequência

Pátio

Penalidades	Pontos
- MOVIMENTOS	876
- DISTÂNCIA RECURSO	428
* T O T A L *	1304

Exibir

Navio

Penalidades	Pontos
+ EXCESSO ALTURA	0
+ EXCESSO PESO	0
+ CNTR FLUTUANDO	0
+ INVÁLIDO IN HOLD	0
+ INVÁLIDO REEFER	0
+ INVÁLIDO IMO	0
+ INVÁLIDO OOG	0
+ INVÁLIDO EMPTY	0
+ INVÁLIDO CNTR 40	0
+ PLANO CNTR	0
+ PLANO PORTO	0
- PLANO BAY	7
- BLOQUEIA PORTO	5
- 40 SOBRE 20 (<>)	9
- ORDEM PESO	0
- DISTÂNCIA RECURSO	1242
* T O T A L *	1256

Exibir

AG — Pesos — Executar — Log — Parado! — Sobre — Sair

Figura 4.21: Console de acompanhamento do processamento

4.9. Considerações Finais

Este capítulo abordou todos os aspectos concernentes ao processo de implementação do programa de computador para a resolução da problemática proposta. Como foi discutido ao longo do capítulo, a implementação segue o formato clássico de resolução de problemas utilizando AG. A obtenção da melhor solução é um processo que pode ser observado por quem está manuseando a aplicação, ou seja, é possível acompanhar, no decorrer do tempo computacional, como estão as restrições gerais (minimizações em geral) e até mesmo interromper o processamento quando uma solução já possuir níveis satisfatórios.

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas com dados (pátio, navio e viagem) cedidos pelo Terminal de Contêineres da RODRIMAR TERMINAIS, empresa situada no Porto de Santos, estado de São Paulo. As simulações foram executadas com um grupo de 100 (cem) contêineres para embarque.

5.2. Simulações

As simulações foram realizadas em *Notebook* padrão Intel™, com processador Intel™ Pentium™ Mobile 2.0 GHz, com 1GB de Memória RAM, sob a plataforma Microsoft™ Windows XP™.

Os resultados foram obtidos com simulações de Planejamento de Embarque de 100 contêineres e separados segundo os tempos computacionais e as evoluções (gerações). Também se separou as simulações com e sem utilização de rotina reparadora, para comparação dos tempos.

A composição de parâmetros que trouxe os melhores resultados nas simulações estão destacados na tabela 5.1. O parâmetro que especifica a utilização de rotina reparadora de cromossomo fez parte dos quadros de simulações, sendo considerado nas tabelas posteriores.

PARÂMETROS GERAIS (CONSTANTES)	
Quantidade de contêineres	100 unidades
Tamanho da População	20 cromossomos
Elitismo	2 cromossomos (10%)
Método de Seleção	Roleta
Tipo de Crossover	PMX (dois pontos)
Percentual de Crossover	60%
Tipo de Mutação	Permuta baseada em ordem para o cromossomo total (*swap*) e sorteio para a segunda dimensão
Percentual de Mutação	1ª. Dimensão: 1% 2ª. Dimensão: 1%

Tabela 5.1: Parâmetros Gerais das Simulações

Os resultados das simulações apresentados são as médias obtidas em três rodadas de execução para cada uma das situações que serão demonstradas. O intuito das médias é tentar eliminar os benefícios (ou malefícios) que a geração de boas (ou más) populações iniciais possam trazer às soluções e números obtidos, já que estas populações são geradas aleatoriamente.

Para uniformizar as pontuações foi adotada uma unidade comum, baseada na medida relativa a um contêiner. Esta unidade foi batizada de Unidade Relativa (UR) e é equivalente ao comprimento ou deslocamento de um contêiner de 20' (ou um TEU).

A "Avaliação geral da solução" (indicada na última linha das tabelas com as simulações) é o resultado da multiplicação das UR's pelos respectivos pesos atribuídos à cada uma das restrições (tabela 4.5). Configura-se, portanto, no valor da aptidão (*fitness*) da solução. Quanto menor é este valor, melhor é a solução encontrada. São encontrados, por vezes, valores altos em decorrência da quantidade de contêineres utilizada nas simulações. Tais valores refletem o custo total da solução e não devem ser analisados de maneira isolada, mas considerando todo o contexto de aplicação do AG.

As simulações foram divididas em quatro grupos de execuções que foram assim caracterizados:

⇒ No primeiro grupo encontram-se as simulações para o método aqui chamado de "clássico", onde o ciclo de execução obedece ao funcionamento básico do AG, sem nenhuma rotina reparadora de cromossomo. Os resultados foram obtidos com parâmetros constantes, apenas variando o número de gerações, sendo utilizados valores arbitrários (ligados principalmente à efetividade das soluções) de 50000, 100000 e 200000, para a primeira execução, segunda e terceira, respectivamente. Resultados encontram-se nas tabelas 5.2, 5.3 e 5.4;

⇒ O segundo grupo visa demonstrar a efetividade e performance com uso da rotina reparadora, estabelecendo o critério de parada no o encontro da primeira solução válida, ou seja, todos os parâmetros foram mantidos inalterados, utilizando-se somente o critério de parada o encontro da primeira solução que elimine todas as restrições imprescindíveis. Os resultados das simulações deste grupo estão nas tabelas 5.5, 5.6 e 5.7;

⇒ No terceiro grupo estão exibidos os resultados utilizando a rotina reparadora de cromossomo somente na primeira geração obtida (tabelas 5.8, 5.9 e 5.10), pretendendo-se diminuir o esforço computacional na busca da primeira solução que eliminasse a primeira restrição imprescindível (contêiner "flutuando"). Após este trabalho da rotina reparadora na primeira geração, o AG voltou ao seu ciclo normal ("clássico"). Neste grupo voltou-se a utilizar os critérios do primeiro grupo, mantendo todos os parâmetros do AG constantes, somente ampliando-se o tempo de evolução representado pelo número de gerações (50000, 100000 e 200000 gerações).

⇒ O quarto e último grupo de simulações é voltado aos resultados com utilização constante da rotina reparadora de cromossomo (em todas as gerações). O foco deste grupo esta na diminuição do esforço computacional e aceleração da convergência das soluções para o

espaço de busca das soluções factíveis. Os resultados deste grupo estão nas tabelas 5.11, 5.12 e 5.13.

Primeiro Grupo – "Clássico"

PRIMEIRA SIMULAÇÃO		
Parâmetros & Condições Gerais	Rotina reparadora	Não utilizada
	Condição de Parada	Gerações
	Número de Gerações	50000
	Tempo Computacional	**154,9s**
Restrições ***Hard & Soft Constraints***	Movimentos de Pátio	700 UR
	Distância Recurso de Pátio	313 UR
	Portos Bloqueados	4 UR
	40' sobre 20' (ou inverso)	4 UR
	Fora de Ordem de Peso	5 UR
	Distância Recurso de Cais	607 UR
	Contêiner "Flutuando"	**1 UR**
	Outras *Hard Constraints*	**0 UR**
	Outras *Soft Constraints*	0 UR
Soma das unidades relativas (UR*)		**1634 UR**
Avaliação geral da solução		**35790**

Tabela 5.2: Primeira Simulação – Primeiro Grupo

SEGUNDA SIMULAÇÃO		
Parâmetros & Condições Gerais	Rotina reparadora	Não utilizada
	Condição de Parada	Gerações
	Número de Gerações	100000
	Tempo Computacional	**309,1s**
Restrições ***Hard & Soft Constraints***	Movimentos de Pátio	638 UR
	Distância Recurso de Pátio	262 UR
	Portos Bloqueados	7 UR
	40' sobre 20' (ou inverso)	6 UR
	Fora de Ordem de Peso	7 UR
	Distância Recurso de Cais	626 UR
	Contêiner "Flutuando"	**0 UR**
	Outras *Hard Constraints*	**0 UR**
	Outras *Soft Constraints*	0 UR
Soma das unidades relativas (UR*)		**1546 UR**
Avaliação geral da solução		**33325**

Tabela 5.3: Segunda Simulação – Primeiro Grupo

TERCEIRA SIMULAÇÃO		
Parâmetros & Condições Gerais	Rotina reparadora	Não utilizada
	Condição de Parada	Gerações
	Número de Gerações	200000
	Tempo Computacional	**616,2s**
Restrições ***Hard & Soft Constraints***	Movimentos de Pátio	532 UR
	Distância Recurso de Pátio	266 UR
	Portos Bloqueados	7 UR
	40' sobre 20' (ou inverso)	1 UR
	Fora de Ordem de Peso	3 UR
	Distância Recurso de Cais	630 UR
	Contêiner "Flutuando"	**0 UR**
	Outras *Hard Constraints*	**0 UR**
	Outras *Soft Constraints*	0 UR
Soma das unidades relativas (UR*)		**1439 UR**
Avaliação geral da solução		**32415**

Tabela 5.4: Terceira Simulação – Primeiro Grupo

Segundo Grupo – Inserção de rotina reparadora

PRIMEIRA SIMULAÇÃO		
Parâmetros & Condições Gerais	Rotina reparadora	Não utilizada
	Condição de Parada	Até solução válida
	Número de Gerações	20297
	Tempo Computacional	**62,8s**
Restrições ***Hard & Soft Constraints***	Movimentos de Pátio	848 UR
	Distância Recurso de Pátio	302 UR
	Portos Bloqueados	6 UR
	40' sobre 20' (ou inverso)	6 UR
	Fora de Ordem de Peso	4 UR
	Distância Recurso de Cais	790 UR
	Contêiner "Flutuando"	**0 UR**
	Outras *Hard Constraints*	**0 UR**
	Outras *Soft Constraints*	0 UR
Soma das unidades relativas (UR*)		**1956 UR**
Avaliação geral da solução		**41490**

Tabela 5.5: Primeira Simulação – Segundo Grupo

SEGUNDA SIMULAÇÃO		
Parâmetros & Condições Gerais	Rotina reparadora	1ª. Geração
	Condição de Parada	Até Solução Válida
	Número de Gerações	5939
	Tempo Computacional	**18,1s**
Restrições ***Hard & Soft Constraints***	Movimentos de Pátio	800 UR
	Distância Recurso de Pátio	385 UR
	Portos Bloqueados	3 UR
	40' sobre 20' (ou inverso)	3 UR
	Fora de Ordem de Peso	3 UR
	Distância Recurso de Cais	1234 UR
	Contêiner "Flutuando"	**0 UR**
	Outras *Hard Constraints*	**0 UR**
	Outras *Soft Constraints*	0 UR
Soma das unidades relativas (UR*)		**2429 UR**
Avaliação geral da solução		**56735**

Tabela 5.6: Segunda Simulação – Segundo Grupo

TERCEIRA SIMULAÇÃO		
Parâmetros & Condições Gerais	Rotina reparadora	Todas as Gerações
	Condição de Parada	Até Solução Válida
	Número de Gerações	64
	Tempo Computacional	**0,2s**
Restrições ***Hard & Soft Constraints***	Movimentos de Pátio	734 UR
	Distância Recurso de Pátio	415 UR
	Portos Bloqueados	2 UR
	40' sobre 20' (ou inverso)	1 UR
	Fora de Ordem de Peso	0 UR
	Distância Recurso de Cais	3055 UR
	Contêiner "Flutuando"	**0 UR**
	Outras *Hard Constraints*	**0 UR**
	Outras *Soft Constraints*	0 UR
Soma das unidades relativas (UR*)		**4207 UR**
Avaliação geral da solução		**111500**

Tabela 5.7: Terceira Simulação – Segundo Grupo

Terceiro Grupo – Rotina reparadora na 1ª. Geração

PRIMEIRA SIMULAÇÃO		
Parâmetros & Condições Gerais	Rotina reparadora	1ª. Geração
	Condição de Parada	Gerações
	Número de Gerações	50000
	Tempo Computacional	**156,4s**
Restrições ***Hard & Soft Constraints***	Movimentos de Pátio	654 UR
	Distância Recurso de Pátio	336 UR
	Portos Bloqueados	8 UR
	40' sobre 20' (ou inverso)	6 UR
	Fora de Ordem de Peso	7 UR
	Distância Recurso de Cais	733 UR
	Contêiner "Flutuando"	**0 UR**
	Outras *Hard Constraints*	**0 UR**
	Outras *Soft Constraints*	0 UR
Soma das unidades relativas (UR*)		**1744 UR**
Avaliação geral da solução		**38940**

Tabela 5.8: Primeira Simulação – Terceiro Grupo

SEGUNDA SIMULAÇÃO		
Parâmetros & Condições Gerais	Rotina reparadora	1ª. Geração
	Condição de Parada	Gerações
	Número de Gerações	100000
	Tempo Computacional	**312,2s**
Restrições ***Hard & Soft Constraints***	Movimentos de Pátio	640 UR
	Distância Recurso de Pátio	311 UR
	Portos Bloqueados	6 UR
	40' sobre 20' (ou inverso)	4 UR
	Fora de Ordem de Peso	6 UR
	Distância Recurso de Cais	690 UR
	Contêiner "Flutuando"	**UR**
	Outras *Hard Constraints*	**UR**
	Outras *Soft Constraints*	UR
Soma das unidades relativas (UR*)		**1657 UR**
Avaliação geral da solução		**36680**

Tabela 5.9: Segunda Simulação – Terceiro Grupo

TERCEIRA SIMULAÇÃO		
Parâmetros & Condições Gerais	Rotina reparadora	1ª. Geração
	Condição de Parada	Gerações
	Número de Gerações	200000
	Tempo Computacional	**628,5s**
Restrições *Hard & Soft Constraints*	Movimentos de Pátio	618 UR
	Distância Recurso de Pátio	316 UR
	Portos Bloqueados	8 UR
	40' sobre 20' (ou inverso)	4 UR
	Fora de Ordem de Peso	5 UR
	Distância Recurso de Cais	552 UR
	Contêiner "Flutuando"	**0 UR**
	Outras *Hard Constraints*	**0 UR**
	Outras *Soft Constraints*	0 UR
Soma das unidades relativas (UR*)		**1503 UR**
Avaliação geral da solução		**32510**

Tabela 5.10: Terceira Simulação – Terceiro Grupo

Quarto Grupo – Rotina reparadora constante

PRIMEIRA SIMULAÇÃO		
Parâmetros & Condições Gerais	Rotina reparadora	Todas as Gerações
	Condição de Parada	Gerações
	Número de Gerações	50000
	Tempo Computacional	**161,5s**
Restrições *Hard & Soft Constraints*	Movimentos de Pátio	678 UR
	Distância Recurso de Pátio	326 UR
	Portos Bloqueados	1 UR
	40' sobre 20' (ou inverso)	1 UR
	Fora de Ordem de Peso	2 UR
	Distância Recurso de Cais	482 UR
	Contêiner "Flutuando"	**0 UR**
	Outras *Hard Constraints*	**0 UR**
	Outras *Soft Constraints*	0 UR
Soma das unidades relativas (UR*)		**1490 UR**
Avaliação geral da solução		**31075**

Tabela 5.11: Primeira Simulação – Quarto Grupo

SEGUNDA SIMULAÇÃO		
Parâmetros & Condições Gerais	Rotina reparadora	Todas as Gerações
	Condição de Parada	Gerações
	Número de Gerações	100000
	Tempo Computacional	**335,4s**
Restrições ***Hard & Soft Constraints***	Movimentos de Pátio	726 UR
	Distância Recurso de Pátio	264 UR
	Portos Bloqueados	4 UR
	40' sobre 20' (ou inverso)	1 UR
	Fora de Ordem de Peso	1 UR
	Distância Recurso de Cais	456 UR
	Contêiner "Flutuando"	**0 UR**
	Outras *Hard Constraints*	**0 UR**
	Outras *Soft Constraints*	0 UR
Soma das unidades relativas (UR*)		**1452 UR**
Avaliação geral da solução		**28980**

Tabela 5.12: Segunda Simulação – Quarto Grupo

TERCEIRA SIMULAÇÃO		
Parâmetros & Condições Gerais	Rotina reparadora	Todas as Gerações
	Condição de Parada	Gerações
	Número de Gerações	200000
	Tempo Computacional	**664,2s**
Restrições ***Hard & Soft Constraints***	Movimentos de Pátio	622 UR
	Distância Recurso de Pátio	264 UR
	Portos Bloqueados	2 UR
	40' sobre 20' (ou inverso)	0 UR
	Fora de Ordem de Peso	2 UR
	Distância Recurso de Cais	413 UR
	Contêiner "Flutuando"	**0 UR**
	Outras *Hard Constraints*	**0 UR**
	Outras *Soft Constraints*	0 UR
Soma das unidades relativas (UR*)		**1303 UR**
Avaliação geral da solução		**26600**

Tabela 5.13: Terceira Simulação – Quarto Grupo

Como referências para análise dos dados exibidos nas simulações acima apresentadas devem ser considerados os dados do primeiro, terceiro e quarto grupos. O segundo grupo, como já relatado, visou somente demonstrar a melhora de performance na convergência da solução. Isto posto, comparando-se as terceiras simulações de cada um destes grupos (200000 gerações), é bastante claro a força da rotina reparadora com utilização constante. O valor de aptidão encontrado no primeiro (clássico) e terceiro grupo (rotina reparadora na primeira geração) são praticamente os mesmos, com

mínima variação. Já em comparação com o quarto grupo (rotina reparadora constante – em todas as gerações) percebe-se uma melhora de aptidão de quase 20% (vinte por cento), o que representa ganhos significativos em relação aos custos operacionais.

Para ilustrar a convergência proporcionada pela rotina reparadora, bem como demonstrar a caminho evolucionário do AG proposto, a seguir, são exibidos os gráficos de execução do modelo com a utilização do AG "Clássico" e a versão do AG modificada utilizando a rotina de reparo de cromossomo (gráficos 5.1, 5.2 e 5.3).

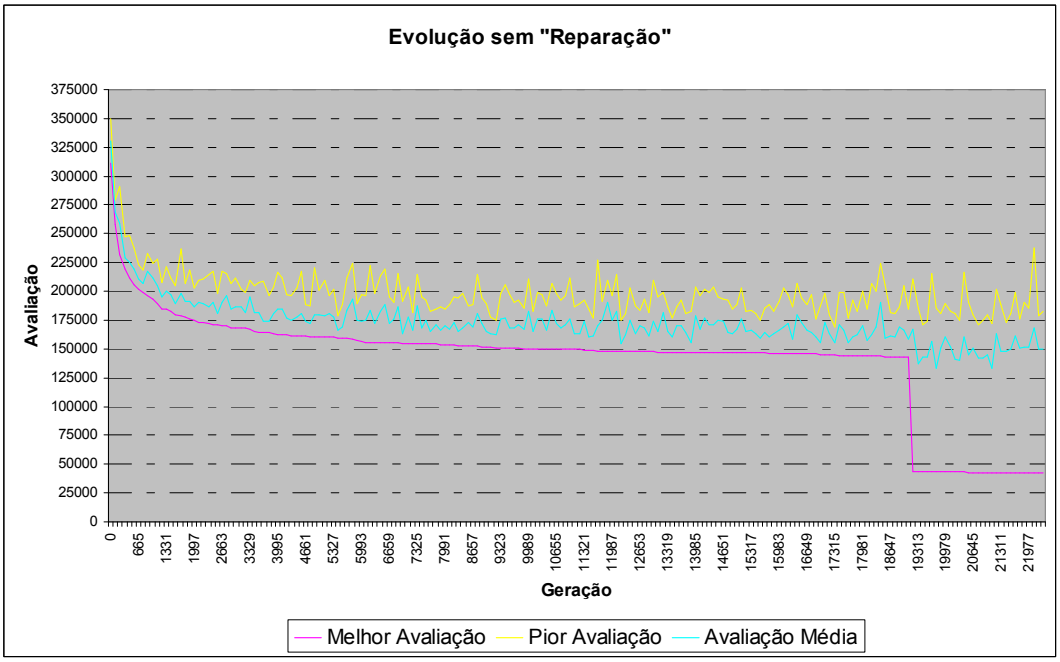


Gráfico 5.1: Evolução AG sem rotina reparadora

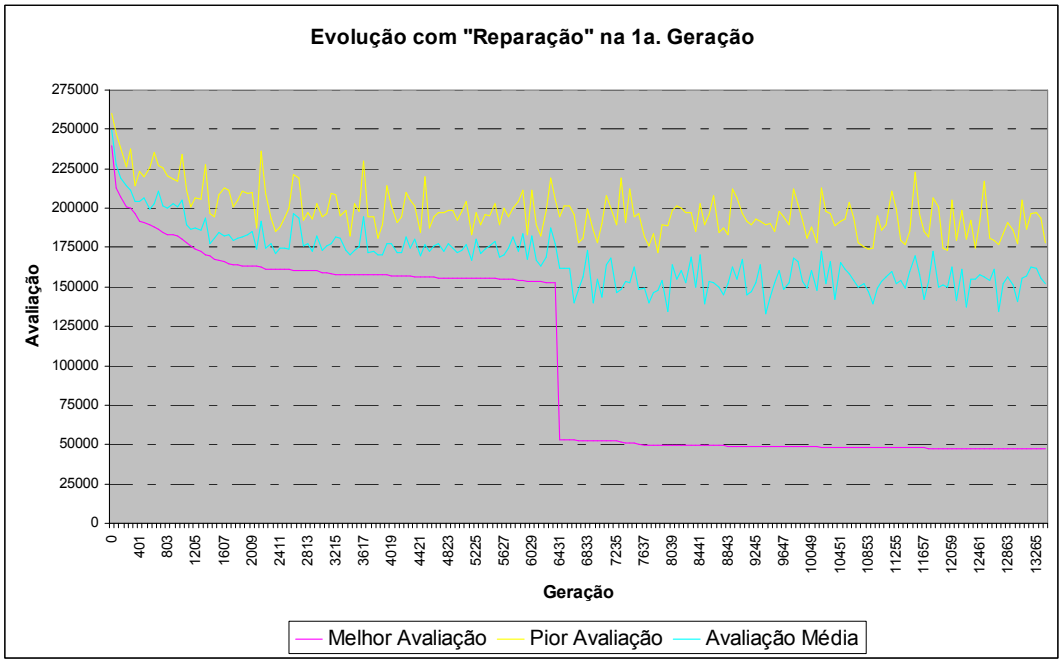


Gráfico 5.2: Evolução AG com rotina reparadora (1ª. Geração)

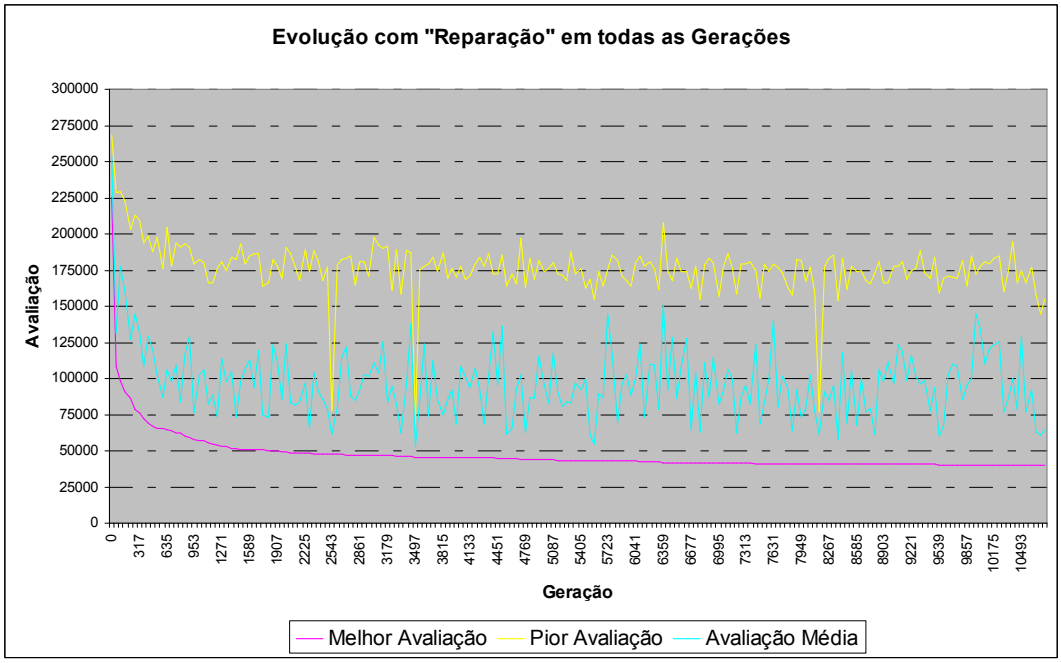


Gráfico 5.3: Evolução AG com rotina reparadora (Todas as Gerações)

É possível constatar com base nos gráficos apresentados a similaridade da rotina reparadora com métodos de busca local. Quando utilizado na primeira

geração apenas, proporcionou convergência da solução após, aproximadamente, 6400 gerações, enquanto que com o uso constante da reparação tal convergência foi obtida já após a geração 50, aproximadamente.

É preciso salientar, mais uma vez, que a rotina reparadora de cromossomo somente foi aplicada à uma das restrições do problema: Restrição 1 (Contêineres "Flutuando"). A escolha desta restrição para a sua utilização, como já comentado, foi em decorrência do fato de que ela é gerada apenas pelo modelo totalmente automatizado, não acontecendo em ferramentas híbridas (auxiliares como coadjuvantes ao processo).

5.3. Breve análise dos resultados encontrados

Face às simulações elencadas no item anterior, pôde-se analisar:

- ✓ Soluções factíveis foram encontradas com tempos computacionais aceitáveis. Mesmo com evolução por 200000 gerações, foram obtidos tempos de aproximadamente 10 minutos;

- ✓ A rotina reparadora de cromossomo foi um importante fator de melhora de desempenho (principalmente quando utilizada de forma constante);

- ✓ A rotina reparadora de cromossomo, mesmo agindo diretamente sobre as soluções retornadas, não causou convergência prematura, mas sim mais direcionadas ao espaço das soluções factíveis;

- ✓ Com o uso da rotina reparadora não houve perda de diversidade da população, havendo incremento constante da qualidade das soluções em gerações posteriores;

- ✓ O uso da rotina reparadora em todas as gerações trouxe soluções mais adaptadas quando comparadas às soluções utilizando a evolução clássica;

- ✓ Não houve incremento significativo nos tempos computacionais com o uso da rotina reparadora;

5.4. Trabalhos relacionados

Dubrovsky, Levitin e Penn (DUBROVSKY; LEVITIN; PENN, 2002) propuseram o desenvolvimento de uma solução com AG para o problema do embarque de contêineres. Entretanto, suas abordagens são focadas no navio, mais precisamente na restrição de bloqueio de portos na escala do navio. Apenas uma restrição foi incorporada à solução, a manutenção da estabilidade da embarcação. Nesse trabalho foi proposto também uma solução compacta em contraposto à solução completa, onde nesta última, segundo os autores, geraria condições de manuseio complicadas com vetores extensos.

Giemsch e Jellinghaus (GIEMSCH; JELLINGHAUS, 2003) sugeriram uma mistura de modelos de programação inteira para resolver o problema do planejamento de embarque. Esse trabalho voltou-se ao atendimento das restrições do navio, focando, principalmente, minimizar as variações que levam a perda da estabilidade do navio. A formulação proposta foi feita considerando apenas uma *bay* com *rows* e *tiers* fixas, sendo destacado pelos autores que a complexidade do problema com 2 ou 3 *rows*, com capacidade não definida para as pilhas, era ainda desconhecida.

Hino, Brinati e Augusto (HINO; BRINATI; AUGUSTO, 2000) pesquisaram o uso de AG para o problema em questão tendo como objetivo principal o embarque de contêineres mantendo a estabilidade estática do navio, o que foi chamado por eles de “minimização da variação do momento de lastro da embarcação”. Foi proposto por eles a divisão de ordens de carregamento entre os recursos utilizados para embarque no navio, seqüenciado a operação entre os recursos disponíveis. Conforme indicado pelos autores, com um grupo de 100 contêineres, foi possível obter tempos satisfatórios que permitiriam ampliação do problema para grupos maiores. Ainda nesse trabalho considerado, os contêineres não foram tratados individualmente, mas sim em lotes, e as células do navio foram agregadas em *bays*. Os autores

consideraram que a abordagem individual tornaria o problema muito grande e de difícil implementação computacional.

Steenken, Winter e Zimmermann (STEENKEN; WINTER; ZIMMERMANN, 2001) propuseram uma abordagem do problema do embarque de contêineres como a combinação de seqüências ideais de carga e transporte dos contêineres do pátio para o navio. Para tanto, eles se basearam no plano de carga previamente fornecido com as posições definidas a bordo. A proposta desses autores foi de resolver o problema do sequenciamento com janelas de tempo utilizando programação inteira e submetendo-a para resolução com um pacote de software empregado em tais formulações (CPLEX versão 6.6). O principal objetivo dos autores foi a minimização do tempo de operação do navio, considerando como restrições, a manutenção da estabilidade e a programação de recursos finitos.

No trabalho de Kang e Kim (KANG; KIM, 2002) foi proposta a resolução do problema do embarque de contêineres em navios empregando-se somente heurísticas próprias. O objetivo almejado pelos autores nesse trabalho era de minimizar o tempo necessário para as remoções, os movimentos dos recursos do navio no trabalho de embarque e o tempo total de operação do navio. Foram consideradas por eles, as restrições de estabilidade estática e os critérios de remoções em portos de escala. Essa proposta também considerou os contêineres sugeridos em grupos, não individualmente.

SÍNTESE DOS TRABALHOS			
TRABALHO	**TÉCNICAS**	**OBJETIVOS**	**RESTRIÇÕES CONSIDERADAS**
DUBROVSKY; LEVITIN; PENN, 2002	AG + Busca Local	- Minimizar remoções a bordo;	- Estabilidade do navio;
GIEMSCH; JELLINGHAUS, 2003	Programação Inteira	- Minimizar uso de água de lastro; - Maximizar o uso dos equipamentos do terminal; - Minimizar torção e força de cisalhamento; - Minimizar balanço do navio (equilíbrio); - Uso efetivo do convés;	- Estabilidade do navio; - *Slots* para contêineres IMO's; - Limites de peso por pilha; - *Slots* para contêineres Reefers; - Limite de mistura 20'/40';
HINO; BRINATI; AUGUSTO, 2000	AG	- Minimizar o momento de lastro;	- Estabilidade do navio;
STEENKEN; WINTER; ZIMMERMANN, 2001	Programação Linear + Heurística	- Minimizar tempo de operação (transporte e embarque);	- Estabilidade do navio; - Recursos finitos (disponíveis) no pátio e navio;
KANG; KIM, 2002	Heurística	- Minimizar o tempo de operação do navio; - Minimizar as remoções a bordo; - Minimizar distância percorrida pelo recurso de costado;	- Estabilidade do navio;
PRESENTE ESTUDO	AG com Reparação	- Minimizar contêineres fora de ordem de peso; - Minimizar remoções a bordo; - Minimizar contêiner de 40' sobre 20' (ou inverso); - Minimizar distância percorrida pelo recurso de costado; - Minimizar distância percorrida no recurso de pátio; - Minimizar remoções no pátio;	- Contêineres "flutuando" no navio; - Slot inválido para contêiner de 40'; - Limite de altura nas pilhas; - Limite de peso nas pilhas; - Contêiner não permitido *in-hold* (*under deck*); - Slots para contêineres Reefers; - Slots para contêineres IMO's; - Slots para contêineres OOG's; - Slots para contêineres Vazios; - Slots para contêineres específicos; - Bays específicas para portos;

Tabela 5.14: Síntese dos trabalhos relacionados

5.5. Considerações Finais

Este capítulo apresentou as reflexões sobre as simulações realizadas com a solução proposta, bem como a configuração de parâmetros nelas utilizadas. Os dados oriundos destas simulações puderam ser analisados e, duas importantes conclusões principais podem ser destacadas: para o volume de contêineres considerado, soluções factíveis puderam ser encontradas dentro de tempos computacionais aceitáveis; a rotina reparadora de cromossomo mostrou-se eficiente para a melhora dos resultados e da performance geral. Também se fez, neste capítulo, revisões de alguns trabalhos relacionados ao tema em questão, focando principalmente os objetivos buscados e as restrições contempladas por cada um deles.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1. Introdução

Este capítulo apresenta os principais tópicos discutidos no decorrer desta pesquisa, relaciona os possíveis trabalhos futuros e avalia a suas principais contribuições.

6.2. Conclusões

Este trabalho abordou o problema do Planejamento de Embarque em Terminais de Contêineres. Terminais de Contêineres são importantes interfaces multimodais com papel crucial na cadeia logística internacional (comércio exterior). A operação destas interfaces influencia sobremaneira os custos logísticos totais das importações e exportações. O Planejamento de Embarque é parcela interessante do montante das tarefas ligadas à operação.

Após contextualizar o problema, revisando a atividade do Terminal de Contêineres, seus componentes principais e os equipamentos envolvidos, foram descritos os fundamentos dos AG's e como eles podem ser aplicados a problemas de otimização combinatória de grande complexidade (NP-Completo e NP-Difícil), onde se enquadra o Planejamento de Embarque.

Uma proposta computadorizada (programa de computador) foi elaborada para a sistemática, sendo posteriormente detalhada quanto à sua implementação e funcionamento. Várias simulações com volume de contêineres específico foram elencadas utilizando esta ferramenta, levando à

conclusão de que a abordagem é apropriada, sobretudo quando se soma estratégia de rotina reparadora de cromossomo, agindo sobre as soluções não factíveis. Além de promover melhores resultados, os tempos computacionais são reduzidos.

Este trabalho contribui para maior popularização da atividade dos Terminais de Contêineres, que, apesar de sua importância para o país, são pouco abordados em trabalhos de pesquisa. Contribui, ainda, com a apresentação de uma técnica de otimização heurística (AG) que tem bons resultados em problemas complexos (muitas variáveis). Os AG's podem fazer parte dos pacotes comerciais de software para este tipo de mercado, pacotes estes que não são nada comuns no mercado de software do país. Grande parte das soluções para este ramo de negócio ainda vem do exterior.

Nos trabalhos relacionados ao tema não são contempladas a mesma quantidade de restrições abordada pela presente pesquisa, fazendo deste fato também uma contribuição que é a maior aproximação dos problemas do mundo real. Várias sugestões de trabalhos futuros e ampliações desta pesquisa são propostas. Tais sugestões tornariam a solução apresentada ainda mais aderente ao dia-a-dia dos Terminais de Contêineres, com grande probabilidade de implementação prática.

6.3. Trabalhos Futuros

Como pesquisas relacionadas ao tema e em continuação a este, recomenda-se:

a) Em relação ao AG:

- ✓ Ampliar o número de contêineres nas simulações e comparar os tempos computacionais;

- ✓ Avaliar o uso de AG paralelo (processamento paralelo e/ou distribuído);

- ✓ Criar rotinas reparadoras para outras restrições importantes, tais como, sugestão de *slot* inválido para contêiner de 40';

- ✓ Considerar o uso de estratégias de busca local em complemento ao AG proposto (Algoritmo Memético);

b) Em relação ao Problema do Planejamento de Embarque:

- ✓ Considerar a inclusão das restrições dos números de recursos (equipamentos) de pátio e navio;

- ✓ Considerar a possibilidade de segmentação do pátio e navio para recursos determinados;

- ✓ Considerar os tempos de trânsito do transporte do contêiner entre o pátio e o navio;

- ✓ Considerar divisões do pátio por portos e faixas de pesos de contêineres;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÓS, F.E.; **Multi-purpose port terminals. Recommendations for planning and management.** A series of monographs prepared for UNCTAD in collaboration with the International Association of Ports and Harbors (IAPH). New York, 1991.

BRASIL; **Lei No. 8630 de 25 de Fevereiro de 1993**.

BACK, T.; FOGEL, D.B.; MICHALEWICZ, T.; **Evolutionary Computation 1. Basic Algorithms and Operators.** New York, Taylor & Francis Group, 2000a.

_____; **Evolutionary Computation 2. Advanced Algorithms and Operators.** New York, Taylor & Francis Group, 2000b.

BRAGA, E. A. S.; **Modelagem e Otimização do Problema do Caixeiro Viajante com Restrições de Tempo, Distância e Confiabilidade via Algoritimos Genéticos.** Dissertação Submetida à Universidade Federal de Pernambuco. Pernambuco, 2007.

CASTRO, H. P.; **Utilização de Algorítimos Genéticos para Solução de Problema de Programação de Produção de uma Refinaria de Petróleo.** Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2001.

CHOPRA, S.; MEINDL, P.; **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos. Estratégia, Planejamento e Operação**. São Paulo, Prentice Hall, 2003.

DEITEL, H.M.; DEITEL, P.J.; **Java: como Programar. 6ª. Edição.** São Paulo, Pearson, 2005.

DUBROVSKY, O.; LEVITIN, G.; PENN M.; **A Genetic Algorithm with a compact solution enconding for the container ship stowage problem**. Journal of Heuristics, 8(6):585–599. November, 2002.

FALKENAUER, E.; **Genetic Algorithms and Grouping Problems.** England, John Wiley & Sons Ltd, 1998.

FERNANDES, M. G.; **Modelo Econômico-Operacional para Análise e Dimensionamento de Terminais de Contêineres e Veículos.** Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Pualo, 2001.

GANHOTO, M. A.; **Abordagens Para Problemas De Roteamento.** Dissertação submetida à Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

GIEMSCH, P.; JELLINGHAUS, A.; **Optimization Models for the Containership Stowage Problem.** International Conference on Operations Research, 2.-5.Setembro. Berlin, 2003.

GOLDBERG, D.E.; **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.** New York, Addison-Wesley, 1989.

HASHIMOTO, K. **Técnicas de Otimização Combinatória Multiobjetivo Aplicadas na Estimação do Desempenho Elétrico de Redes de Distribuição**. Tese de Doutoradao Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2004.

HAUPT, R. L.; HAUPT, S. E.; **Practical Genetic Algorithms, Second Edition.** Wiley-Interscience. New Jersey, 2004.

HINO, C. M.; BRINATI, M. A.; AUGUSTO, O. B.; **Aplicação de Algoritmo Genético e Simulação para o Problema de Sequenciamento de Embarque e Desembarque de Contêineres.** Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore. Rio de Janeiro, 2000.

KANG, J-G.; KIM, Y-D.; **Stowage planning in maritime container transportation.** Journal of the Operational Research Society. England, 2002.

KEEDI, S.; **Transportes, Unitização e Seguros Internacionais de Carga.** São Paulo, Aduaneiras, 2002.

LANARI, F.V.; **Direito Marítimo: Contratos & Responsabilidade.** Belo Horizonte, Del Rey, 1999.

LINDEN, R.; **Algoritmos Genéticos. Uma importante ferramenta da inteligência computacional.** Rio de Janeiro, Brasport, 2006.

MACEDO, R.; **O PNB é pior que o PIB.** O Estado de São Paulo, 18 de março de 2004, Espaço Aberto, p. A2. São Paulo, 2004.

MICHALEWICZ, Z.; **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Third, Revised and Extended Edition.** New York, Springer, 1999.

PAIVA, R. T.; **Zonas de Influência Portuárias (Hinterlands) e um Estudo de Caso em um Terminal de Contêineres com a Utilização de Sistemas de Informação Geográficas.** Dissertação Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio. Rio de Janeiro, 2006.

RASHIDI, H.; TSANG, E.P.K.; **Container Terminals: Scheduling Decisions, their Formulation and Solutions.** Journal of Scheduling. Hoboken, USA, 2004.

SOUZA, D. O.; **Algoritmos Genéticos Aplicados ao Planejamento do Transporte Principal de Madeira.** Dissertação apresentada à Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.

STEENKEN, D.; WINTER, T.; ZIMMERMANN, U.T.; **Stowage and Transport Optimization in Ship Planning.** Berlin Konrad Zuse center for information technology. Berlin, 2001.