



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO



Programa de Pós-Graduação em Administração
Grupo de Estudos em Sistemas de Informação e de Apoio à Decisão

**Alocação e movimentação de
contêineres vazios e cheios –
um modelo integrado e sua aplicação**

por
Denise Lindstrom Bandeira

TESE DE DOUTORADO

Orientadores:
Prof. João Luiz Becker, Ph.D.
Prof. Denis Borenstein, Ph.D.

Porto Alegre, julho de 2005.

*Para meus filhos, Eduardo e Felipe,
e para meu Pai (1931-2004).*

Agradecimentos

É difícil acreditar que aquele primeiro modelo, rabiscado em um pedaço de papel, tenha se transformado nesta tese. Hoje entendo que esse processo de criação é longo, e que o amadurecimento das idéias só acontece com o tempo e muito trabalho. Em alguns momentos, desejei que o mundo ficasse parado até que a tarefa fosse concluída. Entretanto, foi um período de muitos acontecimentos: se por um lado perdi a companhia de meu pai, grande incentivador, por outro ganhei a alegria de meu segundo filho. Mas não tenho dúvida de que foi uma experiência extremamente enriquecedora e gratificante.

Gostaria de agradecer e dividir os méritos com aqueles que colaboraram com este projeto:

- aos meus pais, Nilva e Antonio, por seu incentivo e exemplo de perseverança, e aos meus filhos, Eduardo e Felipe, por seu carinho e pelos momentos de felicidade que sempre me proporcionaram;
- ao meu marido, Luciano, que foi companheiro, revisor e, principalmente, analista e programador do sistema que possibilitou implementar o modelo. Tenho certeza que nenhum outro profissional o teria feito com tanta dedicação. Além disso, suas observações, de ordem prática, fortaleceram o modelo teórico;
- a todos os meus familiares, amigos e colegas, principalmente àqueles que me incentivaram durante todo o processo. Às minhas queridas colegas Edimara e Jackie por seu companheirismo desde o mestrado;
- ao CNPq pelo suporte financeiro;
- a todos os professores do PPGA, por terem contribuído com minha formação;
- aos professores Ronaldo Morabito, Eduardo Ribas Santos e Paulo Antônio Zawislak por terem composto a banca do meu exame de qualificação da área; e aos professores Eduardo Ribas Santos (sempre presente, desde o mestrado) e Luiz Afonso dos Santos Senna, por sua participação em minha defesa de projeto;
- ao meu orientador Denis Borenstein, por suas sugestões sempre muito práticas, e por ter vislumbrado essa grande oportunidade de pesquisa;
- ao meu orientador João Luiz Becker, por sua sabedoria, compreensão e disponibilidade, sabendo explorar o melhor de mim e nunca me deixando desanimar. Em especial, por seu exemplo de dedicação e profissionalismo, como professor e orientador. Sinto-me privilegiada pela oportunidade de trabalhar sob sua orientação.

Sumário

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	ii
Glossário	iii
Resumo	iv
Abstract	v
1. Introdução	1
2. Revisão da literatura	3
2.1. Contêineres e transporte naval	3
2.2. O problema de alocação e movimentação de contêineres vazios e cheios	4
2.3. Trabalhos anteriores	11
2.4. Considerações sobre métodos.....	28
2.5. Modelo de transbordo.....	30
2.6. Modelo de alocação de contêineres vazios	32
3. Metodologia de pesquisa	40
3.1. Justificativa	40
3.2. Questões de pesquisa.....	41
3.3. Objetivos	41
3.4. Método	41
4. Modelo de alocação e movimentação de contêineres	45
4.1. Modelos matemáticos.....	45
4.2. Elaboração do modelo integrado	51
4.3. Descrição do modelo integrado (estático).....	56
4.4. Utilização do modelo como base para implementação dinâmica	62
4.5. Procedimentos de resolução do modelo integrado	65
5. Implementação computacional do modelo	68
5.1. Características principais	68
5.2. Modelo de dados	70
5.3. Módulos.....	75
5.4. Gráficos.....	83
5.5. Customizações (flexibilidade do modelo).....	90
5.6. Execução do modelo (simulação).....	91

6. Resultados computacionais	93
6.1. Desempenho do modelo	93
6.2. Resultados adicionais – influência do <i>leasing</i>	96
6.3. Exemplo ilustrativo de utilização do sistema	97
7. Conclusões.....	106
7.1. Síntese das contribuições	108
7.2. Limitações.....	110
7.3. Sugestões de trabalhos futuros.....	111
Anexo 1 – Exemplo de arquivo para entrada no software Lindo® API.....	112
Anexo 2 – Exemplo de arquivo de entrada no software Lindo®	116
Anexo 3 – Exemplo de resultado gerado pelo software Lindo® API	118
Anexo 4 – Dados de entrada de uma instância do modelo	120
Referências bibliográficas.....	122

Lista de Figuras

Figura 4.1 – Fluxo de movimentação de contêineres vazios e cheios.....	53
Figura 4.2 – Esquema de execução dinâmica.....	54
Figura 5.1 – Fluxograma do modelo de alocação e movimentação de contêineres.....	76
Figura 5.2 – Opções de processamento.....	83
Figura 5.3 – Tela de solicitação de gráficos	84
Figura 5.4 – Roteiro de transporte para uma data.....	85
Figura 5.5 – Topologia da rede de transporte entre clientes e depósitos	87
Figura 5.6 – Gráfico de tempo dos roteiros	88
Figura 5.7 – Informações de trechos de transporte de contêineres vazios	89
Figura 6.1 – Tempo de execução em função da quantidade de clientes.....	95
Figura 6.2 – Custo em função da quantidade de clientes	95
Figura 6.3 – Ilustração com 5 clientes e 5 depósitos em terra ou em portos	98
Figura 6.4 – Quantidade média por UT de contêineres vazios em clientes.....	100
Figura 6.5 – Quantidade média por UT de contêineres vazios e cheios em depósitos.....	100
Figura 6.6 – Custo médio por UT de transporte, armazenagem e processamento.....	101
Figura 6.7 – Ociosidade do sistema.....	102
Figura 6.8 – Histograma dos tempos de entrega de contêineres cheios.....	102
Figura 6.9 – Histograma dos tempos de entrega de lotes de contêineres cheios.....	103
Figura 6.10 – Percentual médio de atendimento da quantidade solicitada – contêineres cheios	104
Figura 6.11 – Percentual médio de atendimento da quantidade solicitada – contêineres vazios	104

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Dimensionamento de variáveis e restrições com acréscimo de depósitos	61
Tabela 4.2 – Dimensionamento de variáveis e restrições com acréscimo de clientes.....	61
Tabela 4.3 – Dimensionamento de variáveis e restrições com acréscimo de clientes e depósitos	62
Tabela 5.1 – Estatísticas dos depósitos por UT	73
Tabela 5.2 – Estatísticas dos clientes por UT.....	74
Tabela 5.3 – Estatísticas do modelo por UT	75
Tabela 5.4 – Exemplo de registro de uma execução do modelo	82
Tabela 6.1 – Execuções comparativas para 100 unidades de tempo	94
Tabela 6.2 – Registro de operações de <i>leasing</i>	97
Tabela 6.3 – Relacionamento entre clientes.....	99
Tabela 7.1 – Dados de clientes	120
Tabela 7.2 – Dados de depósitos.....	120
Tabela 7.3 – Demanda por contêineres cheios	120
Tabela 7.4 – Relacionamento entre depósitos	121
Tabela 7.5 – Relacionamento entre clientes e depósitos.....	121

Glossário

API	Application Programming Interface
DC	Demanda de contêineres cheios
DCA	Dynamic Container Allocation
DV	Demanda de contêineres vazios
DVA	Dynamic Vehicle Allocation
SC	Suprimento de contêineres cheios
SHAPE	Stochastic Hybrid Approximations Procedures
SPT	Shortest Processing Time
SQG	Stochastic Quasi-Gradient Methods
SV	Suprimento de contêineres vazios
TEU	Twenty-foot Equivalent Units
UT	Unidade de tempo

Resumo

O comércio baseado em contêineres é tipicamente desequilibrado com relação às quantidades de contêineres de exportação e de importação. Não é raro haver contêineres não utilizados em um local ao mesmo tempo em que contêineres vazios são necessários em outros. Esta tese apresenta um modelo de rede integrado combinando realocação de contêineres vazios e operações de transbordo de contêineres cheios e vazios. Na rede, os nós representam clientes (demandando contêineres vazios para ser carregados e enviados a outros clientes da rede), companhias de *leasing* assim como portos e depósitos em terra (pontos de transbordo), enquanto que os arcos representam rotas de transporte (por navio, trem ou caminhão) conectando os nós. O modelo matemático subjacente opera em estágios. Primeiro, a demanda de contêineres vazios é ajustada, considerando os suprimentos e demandas globais dos clientes. A seguir, um modelo de transbordo determina a solução de mínimo custo, considerando transporte, processamento e armazenagem de unidades de contêineres, utilizando programação linear. A partir desse resultado, os roteiros de transporte são registrados e controlados dinamicamente. O processamento continua repetindo os estágios ciclicamente, para um dado horizonte de tempo. O modelo é bastante flexível, permitindo a configuração de vários parâmetros, tais como demanda, tempo de processamento e tempo de armazenagem. Um sistema de simulação foi implementado utilizando parâmetros gerados aleatoriamente, dentro de limites preestabelecidos, a fim de avaliar a complexidade do modelo, testar diferentes soluções e verificar a formulação matemática.

Abstract

Container based trading is typically unbalanced regarding quantities of export and import containers. It is not uncommon to have containers left unused in one location while at the same time empty containers are demanded in others. This dissertation presents an integrated network model combining empty containers assignment, and empty and full containers transshipment operations. In the network, nodes represent customers (demanding empty containers to be filled and sent to others customers in the network), leasing companies as well as harbors and warehouses (transshipment points), while arcs represent transportation routes (by vessel, rail or truck) connecting nodes. The underlying mathematical model operates in stages. First, the demand for empty containers is adjusted, considering global customers' supplies and demands. Next, a transshipment model determines the minimal cost solution, considering transportation, manipulation and storage of container units, using linear programming. Based on these results, the transportation routes are registered and dynamically controlled. The processing continues cycling through the stages, for a given time horizon. The model is quite flexible, allowing several parameters to be configured, such as demand, manipulation time and storing time. A simulation system was implemented using randomly generated parameters, within specified ranges, to evaluate the model's complexity, to test different solutions, and to verify the mathematical formulation.

1. Introdução

O contêiner foi o instrumento que revolucionou o transporte de cargas. Desde sua introdução, nos anos 60, o volume de cargas transportadas em contêineres cresceu a ponto de se tornar a parcela mais significativa do tráfego de mercadorias (Taleb-Ibrahimi, Castilho e Daganzo, 1993). O uso de contêineres facilitou muito as operações de manipulação em portos e em outros pontos de transferência, aumentando a eficiência e a velocidade do transporte, e permitindo que múltiplas unidades de carga fossem manipuladas simultaneamente.

Os terminais portuários mudaram radicalmente após o surgimento dos contêineres, incluindo a introdução de equipamento especializado para sua manipulação, alterações na área de armazenamento e nos métodos de estocagem (técnicas de empilhamento). A padronização dos contêineres permitiu também a expansão de sistemas de transporte intermodal, ou seja, a carga acondicionada em contêineres pode ser transportada por múltiplas vias (rodoviária, ferroviária ou naval), com maior facilidade, devido a seu formato e dimensões padronizadas.

Desde a década de 70, o uso de contêineres no transporte de cargas tem sido a regra nos serviços marítimos em todo o mundo. Em função disso, as atividades de transporte de carga têm sofrido mudanças fundamentais em termos de tecnologia e organização. Em particular, no aumento do uso de rotas de transporte intermodal e em melhores práticas de transporte containerizado. Isso é mais evidente na área de navegação marítima internacional, onde os contêineres normalmente são de propriedade das companhias navais que garantem seu transporte intermodal desde a origem até seu consignante final (Crainic, Gendreau e Dejax, 1993).

A partir da década de 90, com a globalização da economia mundial, a containerização do comércio naval tem sido ainda mais intensificada (Cheung e Chen, 1998). Entretanto, o comércio internacional é tipicamente desequilibrado: algumas áreas são predominantemente de importação e outras, de exportação. Esse desequilíbrio cria certos desafios logísticos no gerenciamento de contêineres vazios (Lai, Lam e Chan, 1995).

Como, em um porto específico, o número de contêineres descarregados e carregados em um navio pode ser totalmente diferente, os operadores das linhas de navegação freqüentemente precisam redistribuir seus contêineres vazios ou arrendar contêineres de companhias de *leasing* a fim de atender à demanda dos clientes. Todavia, a disponibilidade de contêineres é sujeita a vários parâmetros de incerteza, incluindo a demanda nos portos, o tempo de retorno de contêineres dos clientes consignadores e a capacidade do navio para contêineres vazios. Em face dessas incertezas, os operadores

tendem a operar de modo conservador (Cheung e Chen, 1998), trazendo sérias conseqüências econômicas para as regiões envolvidas no comércio internacional. De fato, recentes publicações na mídia de massa atestam o problema que algumas regiões brasileiras vêm enfrentando recentemente pela falta de contêineres (Caus, 2004; Ertel, 2004; Melo, 2004; Patury, 2004; Torma, 2004; Torma e Melo, 2004; Veja, 2004).

As companhias navais competem no mundo inteiro pelo fornecimento de serviços de transporte em contêineres (Lai, Lam e Chan, 1995). Desta forma, as empresas precisam melhorar o atendimento ao cliente e ao mesmo tempo reduzir seus custos para se tornarem mais competitivas e lucrativas. A margem de lucro das companhias pode ser incrementada controlando e reduzindo suas despesas ou respondendo de forma ágil às demandas dos clientes. Um componente importante do custo operacional total de uma companhia de navegação é decorrente da realocação de contêineres vazios entre vários portos. Em função disso, é de vital importância haver uma política adequada para gerenciar a movimentação dos contêineres. Para ser mais eficiente, a companhia precisa também encontrar maneiras de evitar que negócios deixem de ser contratados devido à indisponibilidade de contêineres vazios quando requisitados pelos clientes (Lai, Lam e Chan, 1995).

Este estudo procurou mapear a situação problemática atual, apresentando alguns trabalhos anteriores com suas propostas de solução. Cabe salientar que não foram encontrados muitos trabalhos de pesquisa na área de gerenciamento de contêineres vazios, fato registrado por diversos autores (Dejax e Crainic, 1987; Crainic, Gendreau e Dejax, 1993; Lai, Lam e Chan, 1995; Choong, Cole e Kutanoglu, 2002; Fleischmann *et al.*, 1997).

O objetivo desta tese é apresentar um modelo que auxilie a resolução do problema da alocação de contêineres vazios integrado à distribuição de contêineres cheios, de forma eficiente, levando em consideração a minimização dos custos envolvidos bem como o pronto atendimento aos clientes, de forma a otimizar métodos atualmente utilizados. Para tanto, foram utilizadas técnicas de pesquisa operacional, mais especificamente um modelo de transbordo estático, com a inclusão de procedimentos heurísticos para escalonamento e integração dinâmica dos fluxos de contêineres cheios e vazios.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no CAPÍTULO 2 é apresentada uma revisão dos trabalhos anteriores pesquisados juntamente com a descrição do problema da alocação e da movimentação de contêineres; o CAPÍTULO 3 contempla a metodologia da pesquisa; o CAPÍTULO 4 traz a descrição do modelo elaborado neste estudo; o CAPÍTULO 5 apresenta a implementação computacional do modelo; no CAPÍTULO 6 são comentados alguns resultados experimentais e no CAPÍTULO 7 são apresentadas conclusões, contribuições esperadas, limitações do estudo e sugestões de pesquisas futuras.

2. Revisão da literatura

Neste capítulo, são detalhados os principais componentes envolvidos no problema de alocação e movimentação de contêineres, bem como trabalhos que foram pesquisados para observação de soluções e métodos aplicados por outros autores.

2.1. Contêineres e transporte naval

Segundo Preston e Kozan (2001), os contêineres apareceram pela primeira vez como método de transporte de cargas ao final dos anos 30. Eles foram introduzidos como vagões desmontáveis que podiam ser removidos de seus chassis e colocados em chassis de outros trens ou de algum transporte rodoviário. Este sistema foi utilizado principalmente para eliminar o recarregamento que ocorria quando era necessária a troca da carga entre trens ou de caminhão para trem. Isto levou a um aumento da segurança, uma redução dos custos de transporte, e facilitou a entrega de produtos de porta a porta. A indústria náutica rapidamente reconheceu o apelo econômico da utilização de contêineres e empregou-os como meio de carga.

A capacidade dos contêineres é medida em TEUs (do inglês, *Twenty-foot Equivalent Units*). A maioria dos contêineres segue as especificações determinadas pelos padrões ISO (do inglês, *International Standards Organization*): oito pés de largura, oito a 9,5 pés de altura, e 20 ou 40 pés de comprimento. Existem outros sistemas, de 24, 27, 30 e 35 pés de comprimento. A unidade TEU é utilizada para facilitar comparações entre diferentes sistemas de contêineres. Um TEU possui oito pés de largura, oito pés de altura e 20 pés de comprimento. Por exemplo, um contêiner com oito pés de largura e 40 pés de comprimento é equivalente a dois TEUs (Manalytics Inc., 1976 *apud* Taleb-Ibrahimi, Castilho & Daganzo, 1993).

As companhias de navegação competem em todo o mundo para fornecer serviços de transporte lucrativos. Para promover a economia de escala, o tamanho dos navios tem aumentado (Wilson & Roach, 2000). Navios porta-contêineres são grandes embarcações que possuem uma estrutura que facilita a manipulação de carga armazenada em contêineres. Esses navios normalmente viajam em rotas “*round robin*”, descarregando cargas em seu porto de destino e carregando novas cargas destinadas a outros portos (Wilson & Roach, 2000).

Pode-se ter uma noção da evolução do transporte de contêineres através da ampliação do porte dos navios. A primeira geração de navios porta-contêineres, no final da década de 60, tinha capacidade de cerca de 400 TEUs. No final dos anos 70, navios porta-

contêineres tinham capacidade de 2000 TEUs, chegando na década de 90 a mais de 4000 (Taleb-Ibrahimi, Castilho & Daganzo, 1993).

2.2. O problema de alocação e movimentação de contêineres vazios e cheios

Conforme relatado na introdução deste trabalho, a padronização das cargas em contêineres trouxe inúmeras vantagens sob o ponto de vista econômico e de segurança. Entretanto, essa evolução elevou, de forma considerável, o volume de cargas em trânsito em todas as modalidades de transporte. Por sua vez, esse excesso de volume acarretou a necessidade de obter formas eficientes de integração dos diversos tipos de transporte, e de otimizar a distribuição dos contêineres, tanto cheios como vazios, nas redes de transporte. Embora contêineres cheios tenham prioridade de alocação, contêineres vazios não podem ficar parados, pois são necessários para novos carregamentos.

O problema da alocação dinâmica de contêineres vazios consiste em realocar contêineres disponíveis e em determinar a quantidade que deve ser arrendada, a fim de atender a demanda de clientes, dentro de um determinado período de tempo (Cheung e Chen, 1998).

No caso das companhias navais marítimas internacionais, esse problema ocorre no contexto do gerenciamento da distribuição em terra e das operações de transporte. Envolve despachar contêineres vazios de vários tipos em resposta a requisições de clientes de exportação e reposicionar outros contêineres em depósitos ou portos para armazenagem, em antecipação a demandas futuras (Crainic, Gendreau e Dejax, 1993).

Na medida em que o faturamento do transporte é realizado nos contêineres cheios, é natural que estes contêineres sejam tratados com prioridade em relação aos vazios. Diferentemente dos contêineres vazios, os cheios possuem origem e destino fixos, e é raro que um operador rejeite contêineres cheios. Choong, Cole e Kutanoglu (2002) comentam que o interesse dos administradores logísticos é tão concentrado no transporte de contêineres cheios, que eles prefeririam ignorar os contêineres vazios completamente, o que não é possível porque as redes do mundo real requerem contêineres vazios para balanceamento dos fluxos. Se os fluxos de contêineres vazios não forem gerenciados cuidadosamente, toda a rede operará de forma ineficiente.

O problema de movimentação de contêineres cheios pode ser tratado como um simples modelo de transbordo. Isto é, definidos a origem e o destino, o problema é encontrar a rota mais conveniente (a de menor custo ou a de menor tempo) ligando esses dois pontos. Já o problema de movimentação de contêineres vazios é bem mais complexo, pois envolve,

além da movimentação propriamente dita (que pode ser tratada como um problema de transbordo), a alocação dinâmica dos contêineres vazios para pontos de exportação de mercadorias.

A fim de obter uma maior compreensão do problema, é interessante detalhar o itinerário típico de um contêiner. A descrição a seguir foi extraída de Cheung e Chen (1998).

Um cliente retira um contêiner vazio de um depósito, que normalmente está localizado próximo a um porto. Após carregá-lo, o cliente retorna o contêiner ao porto poucos dias antes da data prevista para a partida. O contêiner será então colocado no navio, que irá para o porto de destino. Após chegar ao porto de destino, o contêiner será direcionado ao destinatário. Este irá descarregar o contêiner e devolvê-lo vazio a um pátio de contêineres, a um depósito ou diretamente ao porto. Esse contêiner vazio poderá então ser utilizado para satisfazer a demanda deste porto, ou armazenado como estoque.

Além disso, em um porto, quando os contêineres vazios disponíveis não são suficientes para atender à demanda, o operador da companhia naval pode necessitar arrendar contêineres de fornecedores ou realocar contêineres vazios de outros portos. Entretanto, a realocação de contêineres vazios está sujeita à existência de espaço disponível no navio, onde geralmente contêineres cheios têm prioridade mais alta.

Com o objetivo de atender à demanda dos clientes, Lai, Lam e Chan (1995) colocam que as companhias têm como alternativas:

- Carregar no navio contêineres vazios extras;
- Arrendar contêineres vazios, se disponíveis, no porto de demanda;
- Repassar seus clientes a um competidor quando não houver contêineres vazios disponíveis.

Todas essas alternativas acarretam perda de eficiência, sendo que a última opção resulta em prejuízo para as companhias navais e em atendimento ineficiente ao cliente. Na prática, a companhia tentará persuadir o cliente a aguardar até que alguns contêineres estejam disponíveis no próximo ciclo do navio.

Se os contêineres vazios não forem suficientes para atender à demanda, é necessário definir parâmetros para determinar a alocação de contêineres entre os vários portos. Neste caso, em alguns portos poderá haver quantidade insuficiente, que deverá ou não ser suprida com arrendamento (de curto prazo) de contêineres vazios (Lai, Lam e Chan, 1995).

2.2.1. Principais características

No comércio naval, geralmente a escala de chegadas e partidas é fixa, e os serviços são oferecidos com certa regularidade. O cronograma de viagem de um navio é disponibilizado aos clientes com alguma antecedência. Segundo Cheung e Chen (1998), existem três fontes principais de aleatoriedade no problema de alocação dinâmica de contêineres: a demanda em cada porto, o suprimento em cada porto e a capacidade que o navio possui para carregar contêineres vazios.

Vários dias antes da data prevista para a partida de um navio, deve haver disponibilidade de contêineres vazios, para que os clientes possam buscá-los. Em geral, uma companhia atende um grande número de clientes em vários locais. Entretanto, o número exato de contêineres vazios necessários em um determinado período de tempo é altamente incerto. Por outro lado, o suprimento de contêineres vazios depende do tempo de retorno destes contêineres vindos dos consignadores, sobre os quais a companhia não tem controle. A situação é complicada ainda mais pela prática comum de acumulação de contêineres em algum pátio (em terra), para então enviá-los em lotes por trem, reduzindo custos (Cheung e Chen, 1998). No entanto, armazenar contêineres vazios em portos envolve custo de armazenagem.

O ciclo de viagem de um contêiner é feito por um conjunto de eventos de importação e exportação. O ciclo origina-se e termina no depósito, com o contêiner sendo esvaziado. As taxas de partida de contêineres vazios desde o depósito até o cliente, e as taxas de chegada de contêineres vazios desde os clientes até o depósito são aleatórias (Lai, Lam e Chan, 1995).

O número real de contêineres que podem ser carregados em um determinado navio não é conhecido com certeza. Como exemplo, o peso de contêineres individuais pode variar bastante. Desta forma, um grande número de contêineres pesados pode reduzir a capacidade de uma embarcação (Cheung e Chen, 1998).

A maioria dos contêineres possui dois tamanhos (20 ou 40 pés de comprimento). Podem existir situações em que um cliente aceite um contêiner maior (40 pés) em vez de dois pequenos (20 pés) ou vice-versa. Entretanto, essas situações são raras. A fim de simplificar a modelagem, vários autores (ex.: Lai, Lam e Chan, 1995; Shen e Khoong, 1995) assumiram que os dois tamanhos não são intercambiáveis. Nesta tese optou-se por utilizar apenas um tipo de contêiner, o de 20 pés.

2.2.2. Entidades

A seguir, são apresentadas as principais entidades envolvidas no problema de alocação de contêineres vazios, de acordo com Lai, Lam e Chan (1995):

- *Terminal* – área onde contêineres cheios ou vazios são carregados ou descarregados da embarcação. Os contêineres não podem ocupar o terminal por um longo período de tempo: eles devem ser carregados em navios ou transportados por caminhão para depósitos de armazenagem.
- *Depósitos* – existem dois tipos de depósitos: depósitos de *leasing*, aonde as companhias navais vão buscar contêineres para arrendamento de curto prazo, e depósitos de armazenagem, onde as companhias de navegação armazenam seu estoque de contêineres vazios. Na prática, os dois tipos de depósito podem estar no mesmo local.
- *Portos* – local da visita do navio. Existe uma demanda total por contêineres vazios do porto, que é a soma da demanda de vários clientes em um dado local. Lai, Lam e Chan simplificaram a modelagem, não considerando a demanda individual de cada cliente. Nesta tese, optou-se por tratar as demandas individualmente.
- *Clientes* – aqueles para os quais são carregados produtos em contêineres em cada porto. A companhia naval é responsável pelo transporte, por caminhão ou trem, de contêineres vazios ou cheios até as dependências dos clientes. Para Lai, Lam e Chan, a demanda de um dado porto é a soma da demanda de todos os clientes naquele porto, sendo modelada como variável aleatória. Neste trabalho, são consideradas as demandas individuais de cada cliente pertencente ao modelo.

2.2.3. Contêineres

Segundo Lai, Lam e Chan (1995), existem basicamente três tipos de contêineres:

- *Pertencentes à companhia* – quando não estão em uso, são armazenados em depósitos terceirizados. Os depósitos costumam cobrar por armazenagem diária.
- *Arrendamento de curto prazo* – quando não estão em uso, os contêineres podem retornar para a companhia de *leasing*, observando um limite de retorno mensal, que depende do porto, ou deverão ficar armazenados em depósitos terceirizados aguardando demanda de clientes para eles.
- *Arrendamento de longo prazo* – similar aos contêineres pertencentes à companhia, uma vez que não são permitidos retornos dentro de um período específico de tempo (usualmente 3 a 5 anos, determinados pelo arrendatário).

Para fins de modelagem, os contêineres próprios e os arrendados a longo prazo podem ser tratados da mesma forma, pois a empresa não pode retorná-los à companhia arrendatária.

Quando um navio chega em um porto, os contêineres podem ser descarregados ou permanecer no navio para atender à demanda em outros portos na continuação da viagem. Os contêineres disponíveis em um determinado porto incluem aqueles descarregados de um navio, os que estão armazenados no porto, os que devem retornar de clientes, além dos que podem ser arrendados de uma companhia de *leasing*. Esses contêineres serão utilizados para satisfazer a demanda ou armazenados como estoque (Cheung e Chen, 1998).

2.2.4. Decisões

Uma companhia de navegação trata seus contêineres próprios, não utilizados, como espaço de armazenagem. Se forem contêineres arrendados por curto prazo, o operador possui a opção de devolvê-los para a companhia de *leasing*. Entretanto, quando forem requisitados pelos clientes da companhia de navegação, eles poderão não estar mais disponíveis, se tiverem sido arrendados a outra companhia. O operador precisa considerar a relação da carga arrendada com a carga armazenada, simultaneamente com o risco de não oferecer contêineres quando necessário durante o próximo período de demanda. Em resumo, segundo Lai, Lam e Chan (1995), seriam três as principais decisões:

- *Realocar contêineres vazios* – o operador utiliza informações de relatórios de projeção de demanda com certa periodicidade (semanais, por exemplo), juntamente com o cronograma e a capacidade de cada embarcação, mais o status de contêineres excedentes, para produzir um plano de realocação que especifique o número de contêineres que devem ser carregados em cada navio em cada porto.
- *Retornar contêineres para a companhia de leasing* – se o relatório de projeção indicar que haverá um excesso de contêineres vazios em um dado porto, o operador pode tentar retornar todos os contêineres excedentes arrendados em curto prazo para os depósitos de *leasing*, de maneira a minimizar o custo de cargas armazenadas e arrendadas.
- *Arrendar contêineres da companhia de leasing* – se o número de contêineres realocados não satisfizer a demanda, o operador irá primeiro otimizar a alocação, e depois providenciar *leasing* de curto prazo, se disponível.

2.2.5. Restrições operacionais

Existem algumas restrições operacionais relatadas por Lai, Lam e Chan (1995) que devem ser observadas:

1. *Limitação de espaço* – quando o espaço do navio não puder contemplar todos os contêineres vazios necessários para atender a demanda nos próximos portos, o operador precisará arrendá-los. Os contêineres vazios que os navios puderem transportar devem ser alocados utilizando procedimentos de eliminação ou redução.
2. *Limitação de devolução* – o número total de contêineres retornado por mês pode ser limitado pelo contrato de *leasing*. Locações diferentes podem ter limites de retorno diferentes.
3. *Incerteza de obtenção* – apesar de a companhia ter opção de arrendar contêineres por curto prazo a qualquer hora, existe a possibilidade de os contêineres não estarem disponíveis ou não serem suficientes.
4. *Desvio na demanda projetada* – os relatórios de projeção são fornecidos com antecedência, antes da data real de partida do navio em cada porto, e existe uma discrepância entre a demanda projetada e a necessidade real. Algumas causas possíveis são: flutuação de cargas exportadas entre portos e alterações inesperadas de demandas de clientes.

Os autores chamaram atenção ainda para alguns parâmetros críticos que devem ser observados: estoques de segurança (ou reserva), fator de correção de segurança para alocação (pois os relatórios de previsão de demanda de um determinado período de tempo são originados antecipadamente), ponto crítico de alocação (valor mínimo a partir do qual há necessidade de suprir determinado porto), prioridade para alocação de portos dependendo de seu custo de manipulação e de descarga de contêineres.

2.2.6. Custos

Crainic, Gendreau e Dejax (1993) salientam a importância da movimentação de contêineres vazios. Em primeiro lugar, porque todo movimento comercial (rentável) de um contêiner cheio automaticamente gera um movimento de um contêiner vazio (não rentável). Uma vez que contêineres cheios são entregues nas dependências do cliente, e são descarregados, eles normalmente têm de ser transportados de volta vazios. Por sua vez, os contêineres vazios têm de ser entregues aos clientes que deles necessitam.

Os navios de carga transportam contêineres carregados com produtos, assim como contêineres vazios de retorno. Os contêineres cheios têm de ser transportados para sua

destinação final, seja uma empresa ou um centro de distribuição em algum local em terra. O transporte terrestre pode ser feito por trem, caminhão ou combinações destes. Os contêineres vazios que são descarregados podem permanecer no porto por um tempo, ou ser imediatamente despachados para onde eles forem necessários para usos subseqüentes (Crainic, Gendreau e Dejax, 1993).

Uma vez descarregados, os contêineres vazios têm de ser recolhidos nas dependências dos clientes. Eles podem retornar ao porto de origem ou ser transportados para qualquer outro depósito, porto ou terminal terrestre. Este retorno pode ou não ser feito pelo mesmo veículo (caminhão, trem) que foi usado para o transporte do porto até o cliente. Similarmente, empresas de exportação necessitam de contêineres vazios, seja advindos do porto ou de outro local qualquer. Devido a considerações organizacionais, pouca movimentação de contêineres vazios é feita diretamente entre clientes (Dejax, Crainic e Delorme, 1988 *apud* Crainic, Gendreau e Dejax, 1993). Depois de carregados, os contêineres são transportados para o porto de exportação e acomodados em navios, juntamente com contêineres vazios levados para outros destinos, causando o desequilíbrio natural no suprimento de contêineres (Crainic, Gendreau e Dejax, 1993).

Além disso, existem desequilíbrios regionais significativos entre importação e exportação dentro da área servida pelas companhias. Por outro lado, são oferecidas oportunidades para redução de custo devido ao transporte de massa de contêineres em longas distâncias (trem, por exemplo), resultando em movimentação em terra de contêineres vazios diretamente entre depósitos, chamados de fluxos balanceados (Crainic, Gendreau e Dejax, 1993).

Desta forma, seja pelo impacto na necessidade do recurso “contêiner”, seja pela qualidade do serviço oferecido aos clientes da companhia, a movimentação de contêineres vazios tem um papel central no gerenciamento da distribuição e transporte de contêineres (Crainic, Gendreau e Dejax, 1993).

O fato de mover um contêiner vazio próprio de um porto para outro envolve custo de carga, custo de descarga e custo de transporte. Como os contêineres vazios podem ser colocados em um navio sempre que haja espaço disponível, para Cheung e Chen (1998) o custo de transporte é desprezível quando comparado com os custos de carga e descarga.

Armazenar contêineres vazios em portos envolve o custo de armazenagem. Por outro lado, ao arrendar um contêiner de uma companhia de *leasing*, o custo total inclui também o custo de retirá-lo e de devolvê-lo. Arrendar é geralmente mais caro do que utilizar os próprios contêineres. Entretanto, as companhias de *leasing* de contêineres podem oferecer incentivos aos operadores de companhias navais, propondo-se a retirar os

contêineres arrendados de um porto assim que um grande número seja acumulado (Cheung e Chen, 1998).

Lai, Lam e Chan (1995) colocam cinco componentes de custo para o problema de alocação de contêineres vazios:

1. *Custo de realocação de contêiner vazio* – associado com a carga e descarga do contêiner. Esse custo é diferente em cada porto. Além disso, há o custo de transporte de contêineres vazios de um porto a outro, que pode ser desprezado, se houver espaço disponível.
2. *Despesa de devolução* – quando os contêineres são retornados às companhias de navegação em um dado porto;
3. *Despesa de busca* – quando as companhias necessitam contêineres para *leasing* de curto prazo;
4. *Custos diários de armazenagem* – custo de cada contêiner vazio colocado em um depósito de armazenagem;
5. *Custos diários de ociosidade ou aluguel* – custo que ocorre sendo os contêineres utilizados ou não.

Cheung e Chen (1998) consideraram os seguintes itens na apuração do custo total: custo de descarga do navio, custo de carregamento no navio, custo de propriedade, transporte e arrendamento dos contêineres.

2.3. Trabalhos anteriores

Um dos primeiros trabalhos a utilizar modelos de rede para movimentação de contêineres vazios foi elaborado por White (1972). Ele apresenta a alocação e distribuição de contêineres vazios como um problema de transbordo dinâmico. A rota das unidades carregadas é representada por movimentos associados a uma rede, cada unidade com seu destino específico. As unidades vazias são consideradas intercambiáveis. Seu objetivo é determinar de onde podem ser obtidas unidades extras, quando não há contêineres vazios suficientes em um determinado local. White pressupõe ser conhecido quando, onde e quantos contêineres vazios estão disponíveis no sistema. Pelo fato de não ser possível prever exatamente o tempo de chegada dos contêineres, utilizou um sistema de priorização, desenvolvido utilizando dados de custos. Por exemplo, se um contêiner chega com bastante antecedência com relação ao tempo ideal, seu custo é maior, devido à necessidade de estocagem. Da mesma forma, se um contêiner chega com atraso, seu custo é mais alto, devido à necessidade de aumentar a velocidade de manipulação. Utilizando essas características, otimizou o fluxo de contêineres vazios através de uma função linear de

custo, de maneira indutiva, com o objetivo de redistribuir as unidades disponíveis para o local onde elas estão sendo requisitadas.

Dejax e Crainic (1987) elaboraram um amplo trabalho de revisão de modelos que abordam problemas relacionados a transporte de cargas. Com relação especificamente ao transporte de contêineres vazios, salientam a relevância dos contêineres, por sua facilidade de transferência entre diferentes modos de transporte.

Dejax e Crainic comentam que vários autores têm tratado o problema da distribuição de contêineres vazios como a realocação de contêineres disponíveis em um terminal, após descarregamento de sua carga, para onde são necessários (cliente, terminal ferroviário ou porto), aguardando transportes subseqüentes. Todos os autores pesquisados empregaram abordagem determinística para o problema, o qual é essencialmente dinâmico com relação ao tempo, utilizando formulações de programação linear clássica.

Mencionam o trabalho de Potts (1970 *apud* Dejax e Crainic, 1987), apresentado em um congresso em Melbourne (Austrália), que resolveu o problema de movimento de contêineres vazios utilizando algoritmo padrão *out-of-kilter*.

Dejax e Crainic citam White (1972), por ter discutido vários aspectos do problema da distribuição de contêineres vazios. Assumindo que os locais onde os contêineres podem ser posicionados, a demanda e o horizonte de tempo são conhecidos, White construiu uma rede no espaço-tempo conhecida como rede de transbordo dinâmica. O problema de distribuição também foi resolvido utilizando algoritmo *out-of-kilter*.

Ermol'ev, Krivets e Petukhov (1976 *apud* Dejax e Crainic, 1987) apresentaram o problema de suprir portos, em tempo adequado, com contêineres vazios para subseqüentes carregamentos. Eles construíram um modelo de rede dinâmica onde os contêineres vazios são transportados pelas mesmas rotas de contêineres carregados. Eles propuseram resolver o problema por um algoritmo de otimização de rede.

A tese de doutorado de Florez (1986 *apud* Dejax e Crainic, 1987) pesquisou extensivamente o problema de reposicionamento e *leasing* de contêineres vazios no transporte marítimo. Baseado no trabalho de White (1972), Florez construiu uma rede de transbordo dinâmica resolvida por dois algoritmos de programação linear alternativos. Este modelo operacional foi desenvolvido para ser usado pela administração de uma companhia marítima antes da saída de cada veículo (navio, caminhão, trem ou barco) de qualquer local da rede (portos e terminais terrestres). A metodologia sugere uma estratégia para cada partida, incluindo o número de contêineres vazios a ser carregados no veículo que está partindo e o número de unidades que devem ser arrendadas, com tempo e local recomendados. O modelo cobre um horizonte de planejamento definido pelo usuário. Esta

metodologia foi aplicada em uma situação real no transporte comercial entre a costa oeste dos EUA e o Brasil.

O pioneirismo do trabalho de White (1972) na utilização de modelos de rede para movimento de contêineres vazios também é mencionado por Cheung e Chen (1998), que citam também o trabalho de Florez (1986 *apud* Cheung e Chen, 1998). Choong, Cole e Kutanoglu (2002) também mencionam a tese de Florez pelo aspecto da análise de sensibilidade do modelo com relação à duração do horizonte de planejamento. Nesse estudo de caso, o resultado foi pouco alterado pelas mudanças no horizonte de planejamento, embora tenha sido salientado que isso depende da concentração das atividades da rede em questão.

Dejax e Crainic (1987) concluem declarando estar surpresos que, apesar de ser problemas muito interessantes, com importante aplicação prática, trabalhos com alocação de contêineres vazios ainda não estavam integrados com as últimas metodologias criadas para outras modalidades de transporte (ex. trem e caminhão) e não haviam gerado, até aquele momento, nenhuma abordagem realmente inovadora.

Com relação a modelos que tratam a alocação de veículos vazios e carregados de forma integrada, Dejax e Crainic encontraram trabalhos referentes a transporte de carga ferroviário (o mais freqüente), rodoviário e intermodal. Esses modelos estão relacionados ao gerenciamento de fluxos vazios.

Na área de projeto do sistema logístico, Dejax e Crainic citam os trabalhos de Dejax, Durant e Servant (1986 *apud* Dejax e Crainic, 1987) e Dejax e Servant (1986 *apud* Dejax e Crainic, 1987), tratando o transporte terrestre de contêineres carregados a partir do porto até a dependência dos clientes, e desde os clientes até o porto; e o transporte, estocagem e alocação de contêineres vazios a clientes. Eles projetaram três submodelos e aplicaram-nos em um projeto de larga escala na Europa. O primeiro modelo otimiza o transporte de contêineres carregados para importação e exportação. O segundo é um modelo de localização de depósitos para coleta e distribuição de contêineres vazios em zonas logísticas. O terceiro é um modelo de transporte de múltiplos produtos entre depósitos, projetado para tratar desequilíbrios regionais, causados pela movimentação de contêineres vazios entre regiões essencialmente importadoras ou exportadoras. A principal conclusão é que se pode obter ganho limitando os depósitos utilizados especificamente para armazenagem e distribuição de contêineres vazios a um certo número de terminais terrestres, além dos portos.

Crainic, Dejax e Delorme (1986 *apud* Dejax e Crainic, 1987) estenderam seu trabalho propondo um modelo geral de localização de depósitos multimodais e multiproduto, com

restrições de equilíbrio. Seu modelo combina essencialmente os dois submodelos de distribuição e reequilíbrio regional de contêineres vazios descritos anteriormente em uma formulação geral de alocação e distribuição. O grupo genérico de modelos para este problema e suas propriedades são apresentados e analisados em Crainic, Dejax e Delorme (1987 *apud* Dejax e Crainic, 1987). A integração do transporte de contêineres carregados dentro do modelo também foi contemplada. A formulação pode ser aplicada no planejamento de carga bem como em sistemas de localização e distribuição de depósitos para veículos vazios, e a outros modos de transporte.

Dentro do campo de reutilização de contêineres, Kelle e Silver (1989) desenvolveram um modelo tratando a política de aquisição de novos contêineres. Consideraram como variáveis apenas a demanda existente, sem levar em conta os contêineres retornados. Assim a demanda na rede, em determinado período, é randômica com distribuição variável no tempo, mesmo para o caso de demanda constante e conhecida. Citam poucos trabalhos anteriores nesta área, principalmente abordando os danos causados a contêineres pela utilização. Mencionam seu próprio artigo anterior (Kelle e Silver, 1989 *apud* Kelle e Silver, 1989) onde desenvolveram quatro procedimentos diferentes para prever retorno e demanda, baseados no comportamento da demanda, produções recentes período por período, e retornos recentes. Seu modelo minimiza os custos de compra e propriedade esperados, visando um alto nível de serviço e satisfação da demanda dos clientes. O modelo estocástico foi reduzido a um problema determinístico dinâmico, com possível ocorrência de demanda negativa, transformada em não-negativa sempre que necessário, utilizando procedimentos determinísticos conhecidos.

Kroon e Vrijens (1995) desenvolveram um modelo para gerenciamento de contêineres retornáveis, incorporando o conceito de logística reversa. Este trabalho foi citado na revisão bibliográfica de Fleischmann *et al.* (1997), com a ressalva de que o fluxo reverso foi modelado separadamente. Kroon e Vrijens descreveram um estudo de caso em uma organização de serviços logísticos da Holanda. Elaboram um modelo quantitativo visando responder às seguintes questões: quantidade de contêineres disponíveis no sistema; quantidade e localização de depósitos; organização da distribuição, coleta e realocação dos contêineres; e custos apropriados para serviço, distribuição e coleta. Utilizaram como dado de entrada o número esperado de movimentos desde o possível remetente até o destinatário e a velocidade de circulação dos contêineres (média histórica). O primeiro objetivo foi calcular o número de depósitos e sua localização de forma a minimizar o custo logístico total. O segundo objetivo foi determinar valores para serviços, distribuição e coleta, com determinada margem de lucro, dado o custo logístico total. Para minimizar o custo logístico total foi desenvolvido um modelo de programação inteira misto.

Del Castillo e Cochran (1996) observam que o trabalho de Kelle e Silver (1989) limitou-se a distribuir contêineres com base em sua demanda, diferindo de sua abordagem, que abrange a otimização do planejamento da produção e do transporte dos contêineres em todo sistema. Del Castillo e Cochran trabalharam com dois tipos de modelo de pesquisa operacional combinados, duas programações lineares (uma agregada e a outra desagregada) que determinaram um planejamento principal, refinado por um modelo de simulação de equações diferenciais.

Um dos artigos mais citados por vários dos autores pesquisados é o de Crainic, Gendreau e Dejax (1993). Eles trabalharam com o planejamento de parte do transporte terrestre do comércio marítimo internacional de contêineres. Para eles, esta é uma atividade extremamente complexa, especialmente se o modelo buscar otimizar simultaneamente os aspectos de custo e serviço das operações de uma companhia, em um ambiente competitivo. Os componentes fundamentais deste problema são relativos à alocação de contêineres vazios aos clientes, à preparação de movimentações futuras da carga de exportação, e ao reposicionamento de outros contêineres vazios em depósitos ou portos de armazenagem, visando ao objetivo de utilizá-los para atender os próximos pedidos periódicos (esperados e previstos).

Na ocasião, Crainic, Gendreau e Dejax afirmaram que não haviam encontrado outros modelos que auxiliassem especificamente o problema de alocação de contêineres vazios no enfoque que eles utilizaram. Citam a pesquisa elaborada por Dejax e Crainic (1987), que ressaltou o pouco esforço direcionado para o desenvolvimento de modelos relativos ao transporte de contêineres, sendo que a maior parte dos modelos existentes eram dedicados aos aspectos marítimos. Dejax e Crainic também haviam observado poucos autores tratando o problema da distribuição de contêineres vazios considerando a alocação de contêineres disponíveis em excesso em um terminal (gerados por carregamentos chegados anteriormente), e levando em conta o planejamento da movimentação de carga subsequente.

Crainic, Gendreau e Dejax propuseram modelos de rede determinísticos e estocásticos para alocação de contêineres vazios em um sistema de distribuição e transporte terrestre, agregando fatores de complexidade. Introduziram duas formulações determinísticas dinâmicas para casos de um tipo de contêiner e de vários tipos de contêineres, oferecendo um esquema de modelo geral para essa classe de problemas, levando em conta suas características específicas: eventos dependentes de espaço e de tempo, substituição entre tipos de contêineres, relacionamento entre companhias parceiras, importação e exportação, fluxos de equilíbrio de grande escala. Citaram como principais contribuições: a identificação de elementos e estrutura básicos do problema de distribuição

de contêineres; o desenvolvimento de um modelo para vários tipos de contêineres, contemplando a substituição entre tipos; e uma formulação matemática para tratamento dos aspectos dinâmicos e das características de incerteza de problemas de alocação e distribuição de contêineres.

Crainic, Gendreau e Dejax lembram que o esforço de modelagem do problema de alocação de contêineres é significativamente facilitado pelo fato de as companhias de navios porta-contêineres não necessitarem construir terminais terrestres com freqüência, em função do alto custo. Elas podem utilizar terminais já existentes, como pátios de ferrovias, por um custo bem mais baixo do que se construíssem seus próprios terminais. Isso permite que elas reavaliem periodicamente suas decisões com relação ao uso de terminais terrestres, e a correspondente designação de clientes a depósitos.

Cheung e Chen (1998) interpretaram a solução proposta por Crainic, Gendreau e Dejax como um modelo estocástico em dois estágios compreendendo o transporte terrestre de contêineres vazios entre portos, depósitos e clientes individuais. O problema do segundo estágio é minimizar o custo esperado ocasionado pelo excesso e pela falta de contêineres vazios nos portos e nas dependências dos clientes. Na avaliação de Cheung e Chen, esse é basicamente o modelo do jornaleiro (também conhecido como *Newsboy*) para o problema de estoque com demanda aleatória (Eck, 1976; Goldbarg, 2000; Wagner, 1986). Por sua vez, o modelo de Cheung e Chen considera o transporte oceânico, onde o segundo estágio do problema é um modelo de rede, com suprimentos e capacidades aleatórios, considerando a realocação de contêineres como o estoque dos portos.

O modelo de Crainic, Gendreau e Dejax também é analisado por Choong, Cole e Kutanoglu (2002) destacando o aspecto do horizonte de planejamento e as condições para o final do horizonte, cujas sugestões ficaram em torno de dez a vinte unidades de tempo, uma vez que o número de variáveis de decisão é muito grande. Comentam as observações de Crainic, Gendreau e Dejax de como as informações disponíveis a respeito de suprimentos e demandas futuras têm de ser consideradas ao selecionar a duração do horizonte de planejamento, e sobre suas alternativas para o ajuste dos estoques de contêineres vazios. Finalizam a análise ressaltando a falta de resultados experimentais.

O modelo de Lai, Lam e Chan (1995) visou determinar a proporção entre contêineres, próprios e arrendados por curto prazo, que uma companhia deveria manter em rotas de longa duração. Para isso, era necessário verificar o impacto financeiro do aumento da proporção de contêineres próprios com relação ao custo do arrendamento de curto prazo. Por outro lado, à medida que o número de contêineres próprios cresce, a companhia tem de arcar com custos adicionais de transporte, com relação ao capital inicial projetado.

Além disso, a companhia começará a perder a habilidade de se desfazer de contêineres, o que auxiliaria na redução dos custos de carga.

Em lugar de um modelo de otimização, Lai, Lam e Chan utilizaram um modelo de simulação e desenvolveram técnicas de pesquisa heurísticas para avaliar diferentes políticas de alocação de contêineres, identificando maneiras de reduzir os custos operacionais. Julgam que a formulação padrão para o problema de otimização do transporte é inadequada para resolver este modelo, uma vez que ele requer que o número de tipos de contêineres transportados de uma determinada origem a um destino específico seja conhecido por antecipação. O objetivo deles não é determinar a melhor rota que minimize os custos de navegação. Na sua modelagem, as rotas são fixas, e eles procuram encontrar uma política que determine a quantidade de produtos (contêineres vazios de dois tamanhos) a ser carregada a partir de vários portos (origens), de maneira a atender a demanda em outros portos (destinos), sujeitos a restrições de cronograma e capacidade da embarcação, que são dinâmicas por natureza.

Para Lai, Lam e Chan, outra complicação não atendida pelo problema de transporte naval diz respeito à situação em que a demanda total (de todos os portos) é maior do que o suprimento, e é preciso decidir como alocar os contêineres entre os portos. A dificuldade reside na aleatoriedade da demanda e do suprimento de contêineres em cada destino, e no fato de que os custos de tratamento da descarga são diferentes em cada porto. Mencionam três trabalhos anteriores em operação em terminais de contêineres, ressaltando que na área de realocação de contêineres vazios o material é escasso. Citam Crainic, Gendreau e Dejax (1990 *apud* Lai, Lam e Chan, 1995) como o único trabalho em alocação de contêineres vazios que apresenta um modelo de rede estocástico e dinâmico.

Lai, Lam e Chan aplicaram seu estudo em uma companhia de navegação de Hong Kong, visando determinar a melhor maneira de alocar contêineres vazios, transportados através de onze portos, e a combinação de tipos de contêineres que a companhia deveria manter no seu percurso. Para lidar com as mudanças, utilizaram um modelo de simulação das atividades operacionais da companhia de navegação. Foram empregadas técnicas heurísticas para identificar as políticas que permitissem menor custo operacional entre *leasing*, armazenagem, busca, devolução e outras despesas. Para eles, o que torna o problema difícil é a previsão de movimentos de exportação futuros, assim como a demanda de contêineres vazios mudando constantemente, além do fato de a companhia confrontar-se com a possibilidade de perder negócios se os contêineres não estiverem disponíveis quando requisitados pelos clientes.

O estudo deles forneceu subsídios que resultaram em economias substanciais para a companhia de navegação (citam US\$ 320.000 anuais), aumentando a satisfação dos clientes. A economia foi atribuída primeiro à introdução de estoques de segurança, bem como à revisão da prioridade de alocação (levando em conta um novo componente de custo, o custo de ociosidade) em adição aos custos de manipulação e descarga em cada porto. Quanto mais dados forem coletados após a implementação desta política, mais a robustez do modelo adotado poderá ser testada como padrão para alteração da demanda entre portos. Além disso, identificaram portos com tendência a excesso e déficits. Através de simulação, ajudaram a investigar o impacto do custo de várias composições de contêineres. Ao final do projeto, a administração da companhia afirmou ser mais fácil aceitar um modelo de simulação e trabalhar com análise de sensibilidade, do que formulações analíticas que não podem ser utilizadas regularmente.

Shen e Khoong (1995) desenvolveram um sistema de suporte à decisão para resolver o problema de planejamento a longo prazo da distribuição de contêineres vazios para uma companhia de navegação. O sistema utiliza modelos de otimização de rede. Além de otimizar o posicionamento de contêineres através dos portos, o sistema é capaz de recomendar decisões com melhor custo-benefício, com relação a arrendar contêineres ou devolvê-los para a companhia de *leasing*. Escolheram modelos de otimização em rede pelo fato de oferecerem dois pontos atrativos: permitem representar os problemas graficamente e existem muitos algoritmos eficientes para resolver esses modelos. Shen e Khoong observaram que a literatura existente na época enfatizava mais os aspectos técnicos do problema do que os aspectos econômicos. Eles adotaram uma perspectiva econômica, com ênfase no comércio naval.

As decisões de planejamento trabalhadas por Shen e Khoong para resolver situações de desequilíbrio comercial foram: (a) arrendar contêineres de uma companhia de *leasing* (*leasing-in*); (b) devolver contêineres para uma companhia de *leasing* (*off-leasing*); (c) trazer contêineres de outros portos (*positioning-in*); e (d) levar contêineres para outros portos (*positioning-out*). As restrições operacionais ao processo de planejamento foram: (a) existem contratos negociais que determinam o volume de *leasing* para uma companhia; (b) geralmente é imposto um limite máximo por mês para *off-leasing* pelas companhias de *leasing*; e (c) existem restrições quanto ao número de espaços do navio alocados para contêineres vazios. Para implementar o modelo de decisão, assumiram a utilização de apenas um tipo de contêiner.

Shen e Khoong decomuseram o problema da distribuição de contêineres vazios em três níveis de problemas de planejamento inter-relacionados, denominados níveis de planejamento de terminal (porto), de planejamento intra-regional, e de planejamento inter-

regional. Esta decomposição refletiria a maneira que uma companhia de navegação organiza seus negócios globais e planeja sua distribuição. Dentro de seu modelo, Shen e Khoong estabeleceram três tipos de comunicação: (a) entre modelos de planejamento de terminal e intra-regional; (b) entre modelos de planejamento intra-regionais; e (c) entre modelos de planejamento intra-regional e inter-regional.

O sistema de apoio à decisão de Shen e Khoong funciona da seguinte forma: uma das mais importantes decisões de um administrador de terminal é o dimensionamento de espaço para estoque de contêineres vazios para seu porto. Uma vez recebidas todas as informações de cada porto da região, o problema de planejamento intra-regional é resolvido. O problema intra-regional é um problema de fluxo de mínimo custo onde os nodos representam os portos da região e os arcos representam as rotas de serviço intra-regionais. Depois que este problema estiver solucionado, a informação é comunicada para cada porto com instruções tais como para onde mandar contêineres excedentes e como resolver a carência de contêineres. Uma região pode ter desequilíbrios de excesso ou de carência de contêineres e pode tentar resolver esse desequilíbrio comunicando-se com as regiões vizinhas. Se não tiver sucesso, pode se comunicar com os responsáveis pelo modelo de planejamento inter-regional. Após obter todas as informações necessárias, o problema inter-regional pode ser resolvido. Este também é um problema de fluxo de mínimo custo. Neste caso, os nodos representam as regiões e os arcos representam as rotas de serviço inter-regionais. Após a resolução deste problema, a informação é novamente comunicada para cada região. Shen e Khoong enfatizam que o processo de planejamento de distribuição de contêineres vazios é do tipo iterativo complexo, com cada iteração envolvendo três estágios.

O modelo básico otimiza o fluxo de contêineres vazios durante um horizonte de planejamento multiperiódico, baseado nos custos de propriedade, movimentação e arrendamento de contêineres. O modelo assume que todas as demandas de clientes devem ser satisfeitas. Utilizando modelos de otimização de redes, são recomendadas decisões de arrendamento e devolução de contêineres com melhor custo-benefício. Em um segundo momento, o sistema incorporou técnicas de relaxamento de restrições, utilizando duas estratégias. A primeira objetivou minimizar o custo total de relaxamento. A segunda estratégia procurou minimizar o número de relaxamentos, sendo aplicada apenas se a solução fosse impraticável sem relaxamento, utilizando uma heurística para descobrir o número mínimo de relaxamentos que deveriam ser executados. Para os autores, as técnicas de relaxamento minimizaram as perturbações nas decisões de planejamento existentes em resposta a mudanças *ad hoc* na demanda e no suprimento de contêineres vazios.

Em um trabalho posterior, Crainic *et al.* (1993 *apud* Cheung e Chen, 1998) desenvolveram um modelo de rede para vários tipos de contêineres, designando depósitos

para clientes na rede de transporte terrestre, onde os contêineres vazios podem ser transportados entre depósitos, a fim de minimizar os custos totais de transporte terrestre (entre depósitos e clientes, e entre depósitos). Este problema de planejamento tático da rede foi formulado por programação inteira mista e resolvido por processo de *tabu search*.

Chen e Chen (1993 *apud* Cheung e Chen, 1998) consideraram as movimentações de contêineres cheios e vazios e desenvolveram um modelo de rede dinâmico para vários tipos de contêineres. Chen e Ma (1995 *apud* Cheung e Chen, 1998), mais tarde, estenderam esse modelo a um ambiente estocástico, similar ao proposto por Crainic, Gendreau e Dejax (1993).

O problema da alocação de contêineres vazios pode ser englobado dentro de um campo mais amplo, chamado de Logística Reversa. A logística reversa consiste no gerenciamento do fluxo de material, oposto ao fluxo de suprimento convencional (Stock, 1992 *apud* Fleischmann *et al.*, 1997; Kopicki *et al.*, 1993 *apud* Fleischmann *et al.*, 1997).

É um campo relativamente novo. Fleischmann *et al.* (1997) elaboraram uma coletânea de artigos que utilizaram modelos quantitativos para logística reversa, dentro do ponto de vista da pesquisa operacional, de onde foram retirados os conceitos descritos nesta seção.

A logística reversa abrange as atividades logísticas de todo o caminho de retorno que produtos já utilizados, não mais necessários aos usuários, fazem para que se tornem produtos novamente utilizáveis em um mercado.

Fleischmann *et al.* classificaram a pesquisa em três áreas principais:

1. *Planejamento da distribuição* – envolve o transporte físico de produtos usados desde o usuário final até o produtor;
2. *Gerenciamento de estoque* – é a transformação, pelo produtor, dos materiais retornados em produtos novamente utilizáveis;
3. *Planejamento da produção* – consiste na adequação de métodos de planejamento da produção tradicionais, de acordo com a forma de reutilização dos produtos ou da reciclagem de materiais.

A reutilização de produtos pode ser classificada por alguns critérios, tais como: motivação de reutilização (econômica, ecológica), tipo de itens recuperados (embalagens, componentes, produtos de consumo), forma de reutilização (direta, reparada, reciclada ou remanufaturada), e atores envolvidos (nas funções de coletar, testar, reprocessar). Todos esses aspectos influenciam a forma de reutilização do item considerado, delineando o ciclo de vida de cada produto.

Dentro destes critérios, os contêineres estão classificados na motivação *econômica*, no tipo de item *embalagem*, forma de reutilização *direta* (sem maiores operações de reparo, exceto limpeza e alguma manutenção).

Os atores são parte importante a ser considerada na integração entre as atividades de logística normal e reversa. Nos últimos tempos, têm surgido atores especializados em atividades logísticas específicas, e fornecedores tradicionais têm estendido seus serviços de logística. Novas atividades focam em particular na coleta e transporte de fluxo de retorno, e em fornecer embalagens (ex. contêineres) de transporte reutilizáveis (Fleischmann *et al.*, 1997).

A distribuição reversa compreende a coleta e o transporte de produtos e embalagens utilizadas. Guiltinan e Nwokoye (1975 *apud* Fleischmann *et al.*, 1997) forneceram uma das primeiras análises de redes deste tipo de distribuição. A maior questão que deve ser discutida na distribuição reversa é *se e como* os canais normais e reversos devem ser integrados.

Para construir um canal eficiente de distribuição reversa, algumas decisões devem ser tomadas:

- *Quem são os atores envolvidos no canal de distribuição reversa?*
Os mesmos membros do canal usual (fornecedores de serviços logísticos) ou parceiros especializados.
- *Quais funções devem ser realizadas no canal de distribuição reversa e onde?*
Possíveis funções: coleta, teste, classificação, transporte e processamento. Deve ser designada uma rede de distribuição, determinando locais adequados para essas funções.
- *Qual a relação entre o canal de distribuição normal e o reverso?*
O sistema pode ser descrito como aberto: os contêineres não retornam a quem os liberou, são utilizados por outros usuários.

Com relação ao projeto de rede, o modelo pode ser construído modelando-se separadamente o fluxo reverso ou integrando a distribuição normal e reversa. Uma particularidade das redes de distribuição reversas é seu alto grau de incerteza do suprimento em termos de quantidade e qualidade dos itens retornados.

Como exemplo de modelagem separada do fluxo reverso, Fleischmann *et al.* citam o trabalho de Kroon e Vrijens (1995), que apresentou um sistema logístico de devolução para contêineres retornáveis, desenvolvido em um estudo de caso para uma organização de serviço logístico da Holanda. O sistema é relativo a transporte, manutenção e estocagem de

contêineres vazios. Foi formulado um modelo clássico para analisar o número de contêineres, o número de depósitos e suas localizações.

Fleischmann *et al.* observaram a existência de poucos modelos tratando a distribuição normal e reversa simultaneamente. Citaram Del Castillo e Cochran (1996), que estudaram o planejamento da produção e distribuição de produtos entregues por contêineres reutilizáveis, cujo modelo inclui o transporte de contêineres vazios de volta para as fábricas. A disponibilidade de contêineres vazios é modelada como uma restrição de recurso para a produção do produto original.

Os autores ressaltam que uma rede de distribuição reversa não é necessariamente um desenho simétrico da distribuição normal, e que um ponto de extrema importância é a interação entre as duas distribuições.

Fleischmann *et al.* afirmam que a literatura científica nessa área é muito limitada. Até o momento, a integração de ambos os canais havia sido considerada apenas no estágio de projeto da rede. Eles não encontraram nenhuma pesquisa unindo rotas, ou seja, fazendo uso de percursos para transferência de coleta e de retorno. Citam como um possível ponto de partida as investigações recentes em sistemas de transporte de contêineres, incluindo a realocação de contêineres vazios, mencionando o trabalho de Crainic, Gendreau e Dejax (1993). Como comentário geral final eles acentuam que, apesar da relevância desse tópico, são poucas e esparsas as publicações de pesquisa em distribuição reversa.

Segundo Fleischmann *et al.*, métodos tradicionais das áreas de planejamento da distribuição, controle de estoque e planejamento da produção podem ser aplicados a problemas de planejamento na área de logística reversa, dentro da perspectiva da pesquisa operacional. Entretanto, nem todas as atividades de reutilização encaixam-se na abordagem tradicional, requerendo novos métodos de planejamento.

O que agrega complexidade aos sistemas envolvidos é exatamente a interação entre novos fluxos de material retornando e os fluxos normais. Esse dois fluxos não podem ser tratados de forma independente, mas têm de ser considerados simultaneamente, a fim de permitir um planejamento adequado. O segundo ponto importante é o constante aumento da incerteza em sistemas que envolvem reutilização de produtos. Lidar com essa incerteza adequadamente é uma das maiores tarefas no planejamento de atividades de reutilização.

Finalmente, Fleischmann *et al.* mencionam que um dos seus objetivos era encorajar pesquisas nessa área: “A logística reversa como campo científico ainda é muito nova. Os resultados publicados até essa data [1997] são muito isolados. Abordagens abrangentes são raras. (...) A influência dos fluxos de retorno no gerenciamento da cadeia de suprimentos é um tópico que merece esforços de pesquisa mais fortes.”

Cheung e Chen (1998) desenvolveram um modelo de rede dinâmico para auxiliar os operadores de linhas navais a alocar seus contêineres vazios eficientemente, através da redução dos custos de arrendamento e do nível de estoque em portos. Elaboraram um modelo de minimização de custos para determinar o reposicionamento dos contêineres vazios e discutir onde e quando arrendar contêineres, a fim de atender a demanda nos portos. O núcleo do modelo é uma rede dinâmica, estocástica, baseada em um só tipo de contêiner, onde o suprimento e a demanda de contêineres vazios, e o espaço disponível para acomodação de contêineres vazios nos navios são considerados variáveis aleatórias. Propuseram a utilização de métodos estocásticos quasi-gradiente clássicos e de uma nova classe de métodos híbridos para resolver o modelo de rede. Compararam o seu modelo com os modelos de Florez (1986 *apud* Cheung e Chen, 1998) e de Chen e Chen (1993 *apud* Cheung e Chen, 1998), que são determinísticos, acreditando que a consideração explícita de incerteza tornou o modelo deles mais acurado.

Focaram no transporte marítimo, onde os clientes são consolidados em um único nível. Para tanto, consideraram que a maioria das companhias de contêineres trabalha com transporte terrestre e marítimo separadamente, uma vez que as atividades envolvidas nesses dois modos de transporte são diferentes. Justificaram esta opção alegando que o transporte terrestre é sujeito a um planejamento bem mais flexível do que o marítimo. Formularam o problema de alocação dinâmica de contêineres como um modelo de rede estocástico em dois estágios. As decisões incluem como posicionar contêineres vazios e quantos contêineres devem ser arrendados nos portos. Utilizaram como dados aleatórios a capacidade (residual) para acomodar contêineres vazios em um navio; a demanda total para contêineres em um porto e o total de contêineres retornando (suprimento) a um porto em determinado período de tempo.

Os autores lembram que, no mundo real, as decisões têm de ser tomadas antes que parâmetros de incerteza (demanda, suprimento e capacidade do navio) sejam conhecidos. Eles decompueram a rede em dois estágios: no estágio um todos os parâmetros são determinísticos e no estágio dois todos os parâmetros são estocásticos.

Cheung e Chen demonstraram como a classe de métodos estocásticos quasi-gradiente (em inglês, sigla SQG, de *stochastic quasi-gradient methods*) e a classe de procedimentos de aproximação híbridos estocásticos (em inglês, sigla SHAPE, de *stochastic hybrid approximations procedures*) podem ser aplicados para resolver o modelo de rede, tirando vantagem da própria estrutura do modelo. Além disso, desenvolveram várias implementações desses métodos, e compararam sua eficiência através de testes numéricos. Posteriormente, compararam o modelo estocástico em dois estágios com uma

variação dele, um modelo determinístico em dois estágios. Na maioria dos experimentos, o modelo estocástico funcionou melhor, embora não com a eficiência esperada.

No modelo em dois estágios, Cheung e Chen assumiram que todos os parâmetros aleatórios no estágio dois são percebidos de uma só vez. Na realidade, os parâmetros são percebidos o tempo todo. Indicam como sugestão de trabalhos futuros encontrar uma maneira de formular o problema de alocação dinâmica de contêineres vazios como um modelo multiestágio. Esse modelo deveria capturar os acontecimentos que podem ocorrer e alterar decisões à medida que novas informações fossem disponibilizadas. Julgam que resolver um modelo multiestágio seria muito mais difícil do que um de dois estágios, embora Cheung e Powell (1996 *apud* Cheung e Chen, 1998) tenham sugerido que modelos multiestágios podem ser mais fáceis de resolver porque a formulação multiestágio ajudaria a decompor a estrutura combinatória do problema. Comentam que têm como objetivo descobrir como formular o problema de alocação de contêineres em um modelo multiestágio e como desenvolver métodos de solução tratáveis computacionalmente. Alegam que, se o desenvolvimento de soluções puder levar em consideração o uso de informação em tempo real, então a aplicação dos métodos na prática seria bastante viável.

Choong, Cole e Kutanoglu (2002) mencionam Cheung e Chen sob o ponto de vista do horizonte de planejamento, observando que seus experimentos demonstraram que um horizonte longo não necessariamente é melhor do que um mais curto; ao aumentar o horizonte de planejamento, às vezes as soluções melhoravam, às vezes eram piores. Comentam que Cheung e Chen não discutiram outros fatores que possam ter ocasionado essas situações.

O estudo de Choong, Cole e Kutanoglu abordou os efeitos do horizonte de planejamento no gerenciamento de contêineres vazios para redes de transporte intermodal. Utilizaram programação inteira para minimizar os custos relativos à movimentação de contêineres, considerando um tipo de contêiner e três tipos de transporte: caminhão, trem e barca. Aplicaram em um estudo de caso para ilustrar os efeitos da duração do horizonte de planejamento, observando que um horizonte maior permite utilizar modos de transporte mais lentos e de menor custo.

Choong, Cole e Kutanoglu elaboraram um modelo matemático para minimizar o custo total de gerenciamento de contêineres vazios, satisfazendo a demanda de clientes por contêineres disponíveis no momento oportuno. Adaptaram o modelo de Crainic, Gendreau e Dejax (1993), incluindo múltiplos modos de transporte, capacidade de armazenagem e limitação de capacidade dos modos de transporte. Entretanto, seu modelo não inclui janelas de entrega (os tempos iniciais e finais nos quais as entregas devem ser feitas), assumindo

que os contêineres são entregues nas dependências do cliente no período em que são necessários.

Ressaltam que Crainic, Gendreau e Dejax selecionaram o tipo de transporte antes de resolver seu modelo estático e intermodal. Como as funções são lineares e as rotas de transporte não têm limite de capacidade, as modalidades de transporte ou suas combinações são baseadas apenas no menor custo. Em seu modelo, Choong, Cole e Kutanoglu não poderiam fazer o mesmo porque seu modo mais barato, a barca, tem capacidade limitada.

Choong, Cole e Kutanoglu tratam da mesma forma contêineres arrendados e contêineres próprios das companhias, e não consideram o custo de arrendamento até que efetivamente entrem na rede de transporte. Além disso, não tratam a devolução de contêineres arrendados, assumindo que os contratos de arrendamento não expirem dentro de seu horizonte de planejamento (geralmente menos de um mês).

Para simplificar a modelagem, ignoram o tempo de manipulação (contêineres que chegam tornam-se vazios e disponíveis imediatamente). Outras características do modelo: são conhecidos o número de contêineres vazios disponíveis e número de contêineres vazios requeridos; os contêineres vazios não podem ser armazenados nas dependências dos clientes de suprimento – após descarregados, são imediatamente conduzidos aos clientes de demanda ou para os *pools* de contêineres; contêineres vazios não são enviados anteriormente a uma demanda futura; clientes de demanda não armazenam contêineres para períodos posteriores; não permitem pedidos pendentes (*backorders*); o número de contêineres vazios do *pool* de contêineres é conhecido, no início do horizonte de planejamento, podendo incluir contêineres próprios e arrendados.

Choong, Cole e Kutanoglu concluem que um horizonte de planejamento mais longo pode fornecer planos de distribuição melhores para contêineres vazios em períodos iniciais. Um horizonte maior permite melhor gerenciamento do *leasing* de contêineres e encoraja o uso de modos de transporte mais lentos e mais baratos – por exemplo, a barca. Essas vantagens seriam pequenas para sistemas que tenham um número suficiente de *pools* de contêineres. Além disso, o horizonte de planejamento tem que ser grande o suficiente para contemplar o próprio tempo de transporte da barca.

Para eles, o impacto de escolher um horizonte de planejamento pequeno depende de três condições:

1. *Concentração das atividades na rede* – se o período imediatamente após o horizonte escolhido é muito ativo, um horizonte maior traz uma solução melhor.

Estender o horizonte pode permitir a utilização de modos de transportes mais lentos.

2. *Tempo de trânsito dos movimentos dos contêineres* – se o sistema necessita de tempos de trânsito longos, pode necessitar de um horizonte de planejamento mais longo.
3. *Efeitos do fim do horizonte* – se forem pequenos, podem reduzir o significado de aumentar o horizonte de planejamento. Os efeitos são menores quando a distância média de transporte do sistema é pequena, ou se o estoque inicial dos *pools* de contêineres é alto.

Choong, Cole e Kutanoglu ressaltam que, embora haja muita literatura sobre efeitos do horizonte no planejamento e controle de produção, pouco tem sido escrito com relação a gerenciamento de contêineres vazios. Citam a tese de doutorado de Choong (2000 *apud* Choong, Cole e Kutanoglu, 2002) como origem de seu artigo. Os autores sugerem como pesquisas futuras: integrar os fluxos de contêineres vazios e cheios um só modelo ou agregar a natureza estocástica das demandas e dos suprimentos no problema de gerenciamento de contêineres.

Jansen *et al.* (2004) descrevem um sistema desenvolvido para uma empresa de transporte de cargas da Alemanha, para ser utilizado no planejamento de cerca de 4000 ordens diárias de contêineres. Os caminhões deveriam retornar em dois dias e os contêineres vazios tinham que estar disponíveis na hora certa no local certo. Ressaltam que o transporte entre o oeste e o leste da Alemanha é tipicamente não balanceado, complicando o reposicionamento dos contêineres vazios.

Seu objetivo era fornecer um plano de transporte de eficiente com relação ao custo (problema de fluxo de mínimo custo) para uma dada quantidade de ordens, levando em consideração um grande número de restrições. Utilizaram duas modalidades de transporte: ferroviário e rodoviário, trabalharam com horizonte de planejamento de um a três dias, e horizonte de reposicionamento de uma semana.

Julgam o trabalho deles como único pelas seguintes características:

- É um problema operacional, não estratégico – as requisições de transporte e as capacidades dos diferentes modos de transporte variam dia a dia.
- O tamanho do problema é imenso – dado o requisito de tempo computacional, acreditam que não havia na literatura método que pudesse ser utilizado diretamente.
- Há várias restrições práticas difíceis. Além disso, as funções de custo não são convexas, descontínuas e não necessariamente aumentam com a distância.

- O reposicionamento de contêineres vazios é parte integral das operações diárias.
- O algoritmo deveria ser flexível para aceitar adição ou modificação de restrições e da estrutura de custo.

Uma das questões teóricas que os autores levantam é se haveria possibilidade de resolver os problemas de planejamento e de reposicionamento de forma simultânea.

No Brasil, foram encontradas quatro dissertações de mestrado relacionadas a contêineres vazios, no Banco de Teses mantido pela CAPES. Barco, em 1998, propôs um modelo de programação linear, auxiliado por um modelo de previsão de estoque, apontando o posicionamento ótimo de contêineres vazios para companhias de navegação, visando ao menor custo. Pereira Júnior (1999) analisou o caso real de uma empresa de navegação operando em um cenário de desequilíbrio nos fluxos de importações e exportações, desenvolvendo um modelo de simulação computacional, o qual foi utilizado para avaliação e determinação das melhores políticas de estoque e movimentação de contêineres vazios para auxiliar a solução do problema. Souza (2001) descreveu o problema de alocação de contêineres (marítimo e terrestre) e apresentou algumas alternativas de estratégias de solução. Sampaio (2001) baseou-se no trabalho de Lai, Lam e Chan (1995) para gerar um programa computacional para a simulação de um problema de alocação de contêineres vazios típico, a fim de fornecer suporte à decisão para os gerentes do transporte intermodal internacional. Sampaio classificou o problema como típico de Logística Reversa, devido à movimentação e à falta de interação entre a distribuição e o transporte dos contêineres cheios e a distribuição e o transporte dessas unidades, quando vazias, para serem reutilizadas.

Com base na revisão da literatura, cujas principais contribuições foram apresentadas neste capítulo, pôde-se confirmar a carência de publicações na área de gerenciamento de contêineres vazios, fato ressaltado por Dejax e Crainic (1987), Crainic, Gendreau e Dejax (1993), Lai, Lam e Chan (1995) e Choong, Cole e Kutanoglu (2002); e de modelos que tratassem a distribuição normal e reversa de contêineres simultaneamente, o que também foi enfatizado por Fleischmann *et al.* (1997).

Esta tese tem como principal contribuição a elaboração de um modelo de gerenciamento integrado da distribuição e alocação de contêineres cheios e vazios.

2.4. Considerações sobre métodos

Dejax e Crainic (1987), em seu amplo trabalho de revisão sobre modelos para transporte de cargas, utilizaram os seguintes critérios para distinção de metodologia para estudos nesta área:

a) Hipóteses de modelagem:

- domínio do tempo – o problema pode ser estático, considerando um período de planejamento isolado ou típico, ou dinâmico, quando o problema deve ser resolvido abrangendo vários períodos de tempo contíguos;
- hipóteses determinísticas ou estocásticas no suprimento e na demanda, ou medidas de desempenho da rede (tempo de transporte, por exemplo).

b) Abordagem da modelagem:

- formulação algébrica para conseqüente otimização com técnicas de programação matemática;
- modelos estocásticos analíticos tais como modelos de filas;
- modelos de simulação (ex. Monte Carlo).

c) Técnicas de solução:

- otimização de programação matemática (linear, não-linear, inteira etc.);
- algoritmos de rede;
- otimização estocástica;
- simulação.

Segundo Cheung e Chen (1998), apesar de vários modelos (a maioria de rede) terem sido propostos para o problema de alocação de contêineres, a natureza estocástica e o tamanho do problema dificultam o desenvolvimento e teste de métodos de solução eficientes. Observam ainda que, nos processos estocásticos, as decisões têm de ser tomadas antes que os parâmetros aleatórios sejam observados. Além disso, após os valores tornarem-se disponíveis, devem ser tomadas novas ações. O custo esperado futuro depende da decisão atual, e geralmente envolve problemas de otimização baseados em expectativas, tornando o problema muito difícil de solucionar.

Cheung e Chen agrupam os métodos de solução para programação estocástica em três categorias:

1. *Métodos de aproximação não-linear* – aproximam a função de recurso esperado, de alta complexidade, para uma função não-linear determinística;
2. *Métodos de cenário* – utilizam exemplos fixos para aproximar o espaço de probabilidade subjacente, para então resolver o problema resultante por técnicas

de otimização, que são usualmente métodos de decomposição natural (por exemplo, algoritmo *hedging* progressivo e decomposição *L-shaped*); e

3. *Métodos estocásticos quasi-gradiente* – utilizam gradientes ou subgradientes de amostra para aproximar a linearidade da função de recurso esperado, para então resolver uma seqüência de problemas de programação linear.

Observam que podem ser feitas também combinações desses métodos ou abordagens híbridas.

Os mesmos autores classificam o problema de alocação dinâmica de contêineres (em inglês, DCA – *Dynamic Container Allocation*) como altamente relacionado com o problema de alocação dinâmica de veículos (em inglês, DVA – *Dynamic Vehicle Allocation*), que envolve gerenciar uma frota de veículos no espaço e no tempo, citando algumas diferenças fundamentais entre eles. Em primeiro lugar, no DVA, a origem da aleatoriedade é assumida pela demanda do mercado, representada pelas capacidades de arcos aleatórios na formulação da rede estocástica, enquanto que, no DCA, a demanda e o fornecimento de contêineres vazios e o espaço disponível para contêineres vazios no navio são todos quantidades aleatórias. No DVA, não há programação fixa para um veículo mover-se, enquanto que no DCA existe uma programação da viagem. No modelo de rede do DVA, os veículos circulam na rede e o transportador tem controle total do veículo; no DCA, uma vez que um contêiner é utilizado para atender a demanda em um porto (tornando-se um contêiner cheio), ele deixa a rede, reentrando como um suprimento aleatório no futuro.

Para Crainic, Gendreau e Dejax (1993), a existência de vários tipos de contêiner e regras de substituição complexas são alguns dos fatores que distinguem o problema de alocação de contêineres do problema da alocação dinâmica de veículos em outros meios de transporte. Como conseqüência, a noção de contêineres equivalentes tem de ser introduzida no modelo com vários tipos de contêiner.

Com respeito ao processo de alocação, Crainic, Gendreau e Dejax salientam que apenas movimentos vazios aparecem como variáveis de decisão nos modelos de alocação de contêineres, embora movimentos com carga sejam considerados em todo o sistema de planejamento e no modelo de roteamento. Isso se deve ao fato de que contêineres carregados são embarcados para fora da rede terrestre, desaparecendo para propósitos de planejamento. Nos modelos DVA, os veículos carregados permanecem nas fronteiras da rede para tornarem-se disponíveis novamente para alocação em um curto espaço de tempo. O mesmo veículo pode ser alocado várias vezes dentro de um determinado horizonte de planejamento, o que praticamente nunca acontece no caso da distribuição de contêineres em terra. Uma conseqüência inesperada disso é que decisões de alocação atuais têm

menos impacto no sistema em consideração. Os autores julgam que isso pode reduzir as distorções de *feedback* causadas por um horizonte de planejamento limitado, permitindo trabalhar com um horizonte menor.

Para Crainic, Gendreau e Dejax, o modelo de alocação de contêineres vazios, similarmente a qualquer outro modelo operacional de uma organização ampla e complexa, requer dados abundantes e prontamente disponíveis. Essas informações são variáveis por natureza e podem ser usadas para inferir as formulações e o desenho da aplicação, devendo ser atualizadas cada vez que o horizonte de tempo avança. Os modelos devem ser projetados como parte de um sistema de suporte à decisão de planejamento de curto prazo para contêineres vazios e cheios. Para sua implementação, assume-se que deva existir um sistema de informação confiável. As previsões de suprimento e demanda de contêineres vazios devem ser precisas e têm de ser constantemente atualizadas, o que é crítico para o sucesso da implementação do modelo de alocação. Segundo os autores, estudos preliminares demonstraram que métodos de previsão simples não conseguem capturar toda a complexidade do mecanismo de demanda, o que julgam acontecer também com relação ao suprimento. Uma análise mais acurada havia revelado que as demandas e os suprimentos observados são de fato uma superposição de vários processos com características diferentes. Para obter previsões realistas, é necessário identificar o processo, monitorá-lo através do sistema de informação da companhia, derivar previsões individuais e por processo adequadas, e finalmente reunir todas essas previsões em distribuições de probabilidade.

A seguir, serão apresentados os modelos que serviram de base para a elaboração do modelo integrado de alocação e movimentação de contêineres vazios e cheios.

2.5. Modelo de transbordo

O modelo de transbordo é um problema de transporte que contém uma característica adicional. Em vez de enviar itens de uma origem diretamente a um destino, eles podem circular por quaisquer outras origens ou destinos até chegar ao seu destino final (Eck, 1976).

É uma extensão do modelo clássico de transporte, incluindo os casos em que alguns locais intermediários podem atuar como pontos de transbordo, também chamados de pontos de armazenagem (Goldbarg, 2000). A análise das redes produz um plano de rotas para redistribuição dos itens e atendimento da demanda de forma a obter custo total de transporte mais baixo possível (Wagner, 1986).

O modelo a seguir foi extraído de Goldberg (2000).

Parâmetros:

$M = \{1, 2, \dots, m\}$: conjunto de pontos de suprimento, índice i

$S = \{1, 2, \dots, s\}$: conjunto de depósitos, índice k

$N = \{1, 2, \dots, n\}$: conjunto de pontos de demanda, índice j

o_i : quantidade disponível na origem i

d_j : quantidade requerida no destino j

x_{ik} : fluxo que percorre um arco $i - k$

y_{kj} : fluxo que percorre um arco $k - j$

c_{ik} : custo de percorrer o arco $i - k$

w_{kj} : custo de percorrer o arco $k - j$

f_k : custo fixo de se ativar um ponto de transbordo ou depósito $k, k \in S, S = \{1, \dots, s\}$, o conjunto dos pontos de suprimento

v_k : variável binária que assume o valor 1 se o ponto de transbordo é ativado e 0 em caso contrário

a_k : capacidade de armazenagem disponibilizada pelo ponto de transbordo k

Função objetivo:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^s c_{ik} x_{ik} + \sum_{k=1}^s \sum_{j=1}^n w_{kj} y_{kj} + \sum_{k=1}^s f_k v_k$$

Restrições:

$$\sum_{i=1}^s x_{ik} \leq a_k v_k \quad k = 1, \dots, s \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^s y_{kj} = d_j \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ik} = \sum_{j=1}^n x_{kj} \quad k = 1, \dots, s \quad (3)$$

$$x_{ik} \geq 0 \quad i \in M, k \in S \quad (4)$$

$$y_{kj} \geq 0 \quad k \in S, j \in N \quad (5)$$

$$v_k \in \{0,1\} \quad k \in S \quad (6)$$

A restrição (1) representa o processo de criação (ou abertura de depósitos), considerando o aspecto do atendimento do fluxo demanda x suprimento. A restrição (2) garante o atendimento da demanda e a restrição (3) assegura a continuidade de fluxo. As exigências de não-negatividade e da natureza das variáveis estão representadas nas expressões (4), (5) e (6).

2.6. Modelo de alocação de contêineres vazios

A formulação de alocação de contêineres vazios foi reproduzida de Crainic, Gendreau e Dejax (1993). Este modelo é dinâmico e determinístico, contemplando apenas um tipo de contêiner, utilizando funções lineares de custo para todas as atividades inseridas no modelo de alocação: propriedade, substituição, empréstimo e transporte. Os custos de manipulação não foram incluídos no modelo.

Parâmetros:

T : extensão do horizonte de planejamento ($t = 1, 2, \dots, T$)

D : conjunto de depósitos em terra (não inclui depósitos em portos)

H : conjunto de portos (pontos de entrada e saída do sistema)

A fim de deixar a notação mais clara, depósitos em portos e não-portos (em terra) foram associados a conjuntos diferentes.

I^t : conjunto de requisições de clientes de demanda, a ser entregues no máximo no período t ($t = 1, 2, \dots, T$)

Δ_i : a janela de entrega do cliente i , $i \in I^t$:

Se $\Delta_i = 0$, a entrega deve ser feita exclusivamente num período t

Se $\Delta_i > 0$, existe a opção de entrega em todos os períodos, $t, t-1, \dots, t-\Delta_i$

S^t : conjunto de requisições de clientes de suprimento, a ser recolhidas no período t , $t = 1, 2, \dots, T$.

As operações na rede são direcionadas pela quantidade de suprimento e demanda de contêineres vazios associados com clientes, depósitos e portos, para cada um dos períodos do horizonte de planejamento.

Os suprimentos e demandas de contêineres vazios associados com portos retratam que, em geral, qualquer sistema de transporte é encaixado em outro maior: regiões em estados, estados em países, países no mundo etc. Esses valores refletem as diferenças entre suprimentos e demandas no comércio internacional.

X_i^t : demanda do cliente i , com requisição de entrega de contêineres nas suas dependências no mais tardar no período t ; $i \in I^t$, $t = 1, 2, \dots, T$;

X_j^t : demanda de exportação do porto j no período t ; representa as requisições de contêineres vazios originadas fora da área de estudo; $j \in H$, $t = 1, 2, \dots, T$;

Y_s^t : suprimento de contêineres que tornam-se disponíveis no período t no cliente de suprimento s ; $s \in S^t$, $t = 1, 2, \dots, T$;

Y_j^t : suprimento de importação no porto j no período t ; representa a entrada de contêineres vazios de fora da área de estudo; $j \in H$, $t = 1, 2, \dots, T$.

As variáveis de decisão representam movimentos de contêineres através do tempo e do espaço. Os movimentos que envolvem clientes são identificados pela letra v , enquanto que w é usado para todos os outros.

A variável que corresponde à decisão de alocação a partir do depósito ao cliente é:

$v_{ji}^{t'}$: o volume de contêineres alocados do depósito j ao cliente i no período t , e chegando ao destino no período t' ; $i \in I_j^t$, $j \in D \cup H$, $t = 1, 2, \dots, T$, para

esclarecer especificamente a ocorrência espaço-temporal que representa o cliente identificado. Entretanto, uma vez que o período de tempo inicial de um movimento é especificado, o tempo de chegada é totalmente determinado pelo tempo de trânsito correspondente, e, portanto, não é uma decisão. Os mesmos comentários aplicam-se a todas as variáveis de decisão definidas neste modelo, simplificando a notação.

A notação t_{hm} identifica os tempos de trânsito dos vários movimentos, onde a origem h e o destino m podem representar um depósito, um cliente ou um porto. Esses intervalos incluem o tempo requerido para carga na origem e descarga no destino, mais o tempo necessário para traslado entre os dois pontos. Todos os tempos de trânsito foram assumidos como independentes de seus períodos de partida (t) e chegada (t').

Notação adicional:

- I_j^t : conjunto de todas as requisições i de clientes de demanda que podem ser satisfeitas a partir do depósito j por um movimento que inicia no período t e termina no período $t+t_{ji}$; ou seja, cliente i pertence a I_j^t se $t'-\Delta_i \leq t+t_{ji} \leq t'$ para $i \in I^t$; $j \in D \cup H$, $t=1,2,\dots,T$;
- $J_i^{t'}$: conjunto de todos os depósitos j os quais, no período t' , podem ser usados para satisfazer as requisições i dos clientes de demanda, $i \in I^t$; o carregamento começa no período t' e chega no período $t'+t_{ji}$ de forma que $t-\Delta_i \leq t'+t_{ji} \leq t$; $J_i^{t'} \subseteq D \cup H$, $t'=1,2,\dots,T$;
- J_s^t : conjunto de todos depósitos j onde o cliente de suprimento s , $s \in S^t$ pode despachar no período t os contêineres vazios presentes nas suas dependências; em particular, o porto de origem do movimento de carga que gera o suprimento vazio atual, notação $j(s)$, pertence a J_s^t ; $J_s^t \subseteq D \cup H$, $s \in S^t$, $t=1,2,\dots,T$;
- $S_j^{t'}$: conjunto de todos os clientes de suprimento s , $s \in S^{t'}$, $t'=t-t_{sj}$ os quais, a partir do depósito j , podem receber contêineres no período t ; $j \in D \cup H$, $t=1,2,\dots,T$.

Variáveis de decisão:

- v_{ji}^t : volume de contêineres alocados no período t a partir do depósito j ao cliente i . O carregamento chega no período $t' = t + t_{ji}$; $j \in D \cup H$, $i \in I_j'$, $t = 1, 2, \dots, T$;
- v_{sj}^t : volume de contêineres vazios apanhados no período t no cliente de suprimento s , o qual chega no depósito j no período $t + t_{sj}$; $s \in S^t$, $j \in J_s'$, $t = 1, 2, \dots, T$;
- w_{jj}^t : estoque de contêineres vazios disponíveis no depósito j no final do período t (o fluxo de estoque do depósito j no período t para depósito j no período $t+1$); $j \in D \cup H$, $t = 1, 2, \dots, T$;
- w_{jk}^t : fluxo de contêineres vazios embarcados do depósito j para o depósito k ; o carregamento começa no período t e é completado no período $t + t_{jk}$; $j \in D \cup H$, $k \in D \cup H$, $t = 1, 2, \dots, T$.

Função objetivo:

Minimizar o custo total de operação do sistema de distribuição e transporte terrestre

$$\text{Min} \sum_{t=1,2,\dots,T} \left\{ \sum_{j \in D \cup H} \left(\sum_{i \in I_j'} c_{ji}^t v_{ji}^t + \sum_{k \in D \cup H} c_{jk}^t w_{jk}^t + c_j^t w_{jj}^t + \bar{c}_j^t b_j^t \right) + \sum_{j \in H} \tilde{c}_j^t e_j^t + \sum_{s \in S^t} \sum_{j \in J_s'} c_{sj}^t v_{sj}^t \right\} \quad (7)$$

onde:

- c_{ji}^t : custo unitário de transporte do depósito j ao cliente de demanda i no período t ; $j \in D \cup H$, $i \in I_j'$, $t = 1, 2, \dots, T$;
- c_{sj}^t : custo unitário de transporte do cliente de suprimento s para o depósito j no período t ; $s \in S^t$; $j \in D \cup H$; $t = 1, 2, \dots, T$;
- c_{jk}^t : custo unitário de transporte do depósito j ao depósito k no período t ; $j \in D \cup H$; $k \in D \cup H$; $t = 1, 2, \dots, T$;

c_j^t : custo de permanência de um contêiner de fora do sistema no depósito j no período t ; $j \in D \cup H$; $t = 1, 2, \dots, T$;

\bar{c}_j^t : custo de ingresso de um contêiner de fora do sistema para o depósito j no período t ; $j \in D \cup H$; $t = 1, 2, \dots, T$;

\tilde{c}_j^t : custo unitário de multa por não satisfazer a demanda externa de contêineres vazios no porto j no período t ; $j \in H$; $t = 1, 2, \dots, T$.

Para escrever a função objetivo do modelo (7), é preciso definir o critério de custo associado a cada uma das atividades de transporte e armazenagem definidas no sistema. De modo geral, a função de custo de uma atividade específica (ex. movimentar contêineres, em um período de tempo específico, entre um dado cliente e um porto particular) pode depender dos valores de todas as variáveis de fluxo do modelo. Apesar disso, na prática, não é requerida uma definição ampla, uma vez que a maioria do tráfego vazio que envolve clientes é feita em distância e movimentos relativamente curtos, poucos contêineres por vez (geralmente por caminhão). Foi assumido que, para esse tipo de operação, a função de custo depende apenas da intensidade da atividade. Para manter a apresentação simplificada, todas as funções foram consideradas como lineares.

Restrições:

[demanda de cliente identificada]

$$\sum_{t \leq t} \sum_{j \in J_i^t} v_{ji}^t = X_i^t - K_i^t \quad \text{para todo } i \in I', t = 1, 2, \dots, T \quad (8)$$

A demanda de um cliente (8) pode ser satisfeita a partir de todos os depósitos aos quais o cliente está ligado, por navios que chegam em qualquer dos períodos que estejam no intervalo de tempo definido pela janela de entrega do cliente. Em alguns casos, parte da demanda identificada pode já ter sido satisfeita pelos carregamentos iniciados em períodos anteriores ao início do horizonte de planejamento, ou porque a janela de entrega do cliente começa antes deste tempo, ou porque aqueles carregamentos têm ainda que chegar nas dependências do cliente. Como esses carregamentos correspondem a decisões conhecidas, um valor constante K_i^t ajusta a demanda identificada para o horizonte de planejamento (em consequência, a definição do conjunto J_i^t é modificada):

K_i^t : volume de contêineres enviados ao cliente i , $i \in I^t$ antes do início do atual horizonte de planejamento.

Para garantir viabilidade, foi assumido que, para cada demanda de cliente identificada i , $i \in I^t$, nem todos os conjuntos $J_i^{t'}$ estão vazios. Em termos operacionais, implica que sempre há um depósito suficientemente próximo para satisfazer a demanda de um cliente identificado. Corresponde ao fato de que a companhia pode não aceitar uma ordem que seja temporariamente impraticável.

[suprimento de cliente]

$$\sum_{j \in J_s^t} v_{sj}^t = Y_s^t \quad \text{para todo } s \in S^t, t = 1, 2, \dots, T \quad (9)$$

Contêineres vazios, que estão disponíveis nas dependências do cliente (9), têm de ser movidos para fora, e podem ser enviados ao porto onde o movimento de carga inicial foi originado, ou para um (ou vários) dos depósitos para os quais o cliente foi designado no plano tático.

[estoques em depósitos não-portos]

$$w_{jj}^t = w_{jj}^{(t-1)} + \sum_{t' \leq t} \left(\sum_{k \in D \cup H | t_{kj} = t-t'} w_{kj}^{t'} + \sum_{s \in S_j^t} v_{sj}^{t'} \right) + b_j^t + K_j^t - \sum_{k \in D \cup H} w_{jk}^t - \sum_{i \in I_j^t} v_{ji}^t$$

para todo $j \in D$, $t = 1, 2, \dots, T$ (10)

Para cada depósito, o estoque de contêineres vazios é calculado no final de cada período de tempo (10). Os volumes embarcados para outros depósitos, portos e clientes estarão fora do depósito. O volume de entrada durante o período é constituído pelo tráfego de contêineres que chegaram, em períodos anteriores, de outros depósitos, portos e clientes de suprimento, entrando no depósito no período atual. Esse volume é adicionado ao estoque disponível no início do período, e pelos contêineres recebidos de fora do sistema.

b_j^t : volume de contêineres tomados (de companhias parceiras; pode também representar contêineres arrendados ou recentemente adquiridos) no depósito j no período t ; $j \in D \cup H$;

O estoque disponível no depósito j , $j \in D \cup H$, no início do horizonte de planejamento, foi estipulado por w_{jj}^0 . Assim como na situação anterior, foi utilizada uma constante para ajustar o suprimento do depósito com relação aos contêineres carregados no depósito antes do início do horizonte de planejamento atual:

K_j^t : volume de contêineres enviados para o depósito j antes do início do horizonte de planejamento atual, e que chegam no período t ; $j \in D \cup H$; $t = 1, 2, \dots, T$.

[*suprimento, demanda e estoque de portos*]

$$w_{jj}^t = w_{jj}^{(t-1)} + \sum_{t' \leq t} \left(\sum_{k \in D \cup H | t_{kj} = t-t'} w_{kj}^{t'} + \sum_{s \in S_j^t} v_{sj}^{t'} \right) + b_j^t + K_j^t - \sum_{k \in D \cup H} w_{jk}^t - \sum_{i \in I_j^t} v_{ji}^t - X_j^t + Y_j^t + e_j^t$$

para todo $j \in H$, $t = 1, 2, \dots, T$ (11)

onde:

e_j^t : demanda de exportação de contêineres vazios insatisfeita no porto j , no período t ($e_j^t \geq 0$); $j \in H$, $t = 1, 2, \dots, T$.

As restrições que determinam os níveis de estoque nos depósitos de portos são muito similares aos controles de estoque em depósitos não-portos, com exceção de que a demanda de importação e exportação da rede no porto tem de ser atendida (11). A variável de folga foi identificada como "demanda insatisfeita", principalmente levando em conta o custo de não atendimento da demanda de exportação, em alguns casos. Esta não é a única demanda assumida como possível de ser rejeitada. A presença das variáveis b_j^t e e_j^t , com os custos correspondentes, permite executar um número de análises interessantes do *tradeoff* entre o custo de não atender uma demanda em relação ao custo de trazer novos contêineres para dentro do sistema.

[*fluxos de balanceamento*]

$$l_{jk}^t \leq w_{jk}^t \leq u_{jk}^t \quad \text{para todo } j \in D \cup H, k \in D \cup H, t = 1, 2, \dots, T \quad (12)$$

onde:

$l_{jk}^t (u_{jk}^t)$: limite inferior (superior) do movimento balanceado de contêineres iniciado no período t do depósito j para o depósito k ; $j, k \in D \cup H$, $t = 1, 2, \dots, T$.

Obs.: Incluindo as restrições usuais de não-negatividade das variáveis de decisão.

As equações representadas em (12) garantem que os movimentos de balanceamento são realizados de acordo com as regras da companhia, especialmente os contratos com os transportadores. Em particular, os limites l_{jk}^t e u_{jk}^t são exógenos ao modelo e refletem essas políticas e contratos.

3. Metodologia de pesquisa

Neste capítulo, são apresentados os principais elementos que orientaram a execução desta tese.

3.1. Justificativa

Nas últimas décadas, observou-se um grande crescimento do comércio naval e o volume de cargas transportadas em contêineres ampliou-se de forma a se tornar a fração mais importante do tráfego de mercadorias.

Os contêineres oferecem várias vantagens, entre elas a padronização do carregamento, aumento da segurança e facilidade de manipulação para o transporte intermodal. Por outro lado, apresentam problemas específicos tais como dimensionamento e gerenciamento de frota, decisão entre propriedade ou arrendamento dos contêineres, reposicionamento de contêineres que foram liberados e preparação anterior a um carregamento. O alto custo de aquisição, manutenção, manipulação e transporte de contêineres faz com que o seu gerenciamento seja um problema de grande relevância (Dejax e Crainic, 1987).

O problema de alocação de contêineres vazios é freqüente no comércio naval, sendo consequência do desequilíbrio volumétrico entre importação e exportação, decorrente das diferentes necessidades econômicas de cada região. Por outro lado, o sistema de movimentação de contêineres cheios está diretamente vinculado ao sistema de controle de contêineres vazios, havendo uma relação direta entre as entradas e as saídas de cada sistema.

Conforme relatado neste estudo, vários autores constataram haver poucos trabalhos na área de gerenciamento de contêineres vazios (Dejax e Crainic, 1987; Crainic, Gendreau e Dejax, 1993; Lai, Lam e Chan, 1995; Choong, Cole e Kutanoğlu, 2002), fato também verificado na pesquisa realizada no decorrer deste trabalho.

Além disso, Fleischmann *et al.* (1997), em sua ampla pesquisa sobre trabalhos em Logística Reversa, observaram a existência de poucos modelos tratando a distribuição normal e reversa simultaneamente, citando apenas o trabalho de Del Castillo e Cochran (1996), para contêineres reutilizáveis. Comentam, ainda, que a integração de ambos os canais tem sido considerada apenas no estágio de projeto da rede. Até aquela ocasião, eles não haviam encontrado nenhuma pesquisa unindo rotas ou utilizando fluxos vazios para coleta e retorno, concluindo seu artigo criticando a falta de publicações de pesquisa na área de logística reversa, tópico que julgam muito relevante.

Enfim, devido à relevância do problema e ao fato de não ter sido encontrado um modelo integrando os fluxos de contêineres cheios e vazios, esse campo de estudo apresentou-se como uma grande oportunidade de investigação para uma tese de doutorado.

3.2. Questões de pesquisa

As questões fundamentais no que diz respeito à organização das operações de distribuição e transporte de contêineres vazios e cheios, incluindo sua integração, para atender uma determinada companhia naval, são:

- Como planejar o fluxo normal e o fluxo reverso de contêineres vazios e cheios?
- Como fazer a integração entre os fluxos?
- Como avaliar o balanceamento entre os fluxos?

3.3. Objetivos

O objetivo geral desta tese é desenvolver um modelo que auxilie o planejamento das operações de distribuição e transporte de contêineres vazios integrado com a movimentação de contêineres cheios, visando minimizar os custos associados a essas atividades e aprimorar o atendimento aos clientes de companhias navais.

Objetivos específicos:

- Modelar o fluxo de um contêiner vazio, desde seu descarregamento nas dependências de um destinatário até que esteja novamente disponível a um cliente, independentemente de sua localização.
- Modelar o fluxo de um contêiner cheio, desde seu carregamento nas dependências de um cliente até que seja entregue a um destinatário, independentemente de sua localização.
- Integrar os dois fluxos (normal e reverso), com análise do balanceamento entre eles.
- Realocar dinamicamente os contêineres vazios com eficiência, de forma a atender às demandas dos clientes de modo satisfatório.
- Implementar computacionalmente o modelo integrado.
- Verificar o modelo computacional.

3.4. Método

Antes de partir para a formulação do problema e com base na literatura pesquisada, foi cumprida a fase de diagnóstico, identificando alguns fatores críticos e principais decisões, medidas de desempenho dessas decisões e possíveis *tradeoffs*.

O processo de análise quantitativa foi conduzido pelos estágios a seguir, baseados na clássica metodologia de pesquisa operacional apresentada em Wagner (1986).

Estágio 1: Formulação do problema

O estágio de formulação do problema consistiu na identificação dos seguintes elementos:

- entidades – depósitos em portos, depósitos em terra, clientes de suprimento, clientes de demanda (detalhes descritos na SEÇÃO 4.2 – ELABORAÇÃO DO MODELO INTEGRADO);
- variáveis de decisão – quantidade de contêineres vazios e cheios a ser transportada (SEÇÃO 4.3 – DESCRIÇÃO DO MODELO INTEGRADO (ESTÁTICO));
- parâmetros – custos de transporte, armazenagem e processamento de contêineres; tempos de transporte, armazenagem e processamento de contêineres (SEÇÃO 4.3);
- objetivos – minimização de custos e atendimento das demandas (SEÇÃO 4.3 – EQUAÇÃO (23));
- restrições – quantidade de contêineres vazios e cheios disponível na origem ou requerida no destino (SEÇÃO 4.3 – EQUAÇÕES (24) a (29)).

Estágio 2: Construção do modelo

Para atender os objetivos desta tese, foram elaborados modelos matemáticos para alocação e movimentação de contêineres vazios (SEÇÃO 4.1.1) e de contêineres cheios (SEÇÃO 4.1.2), derivados de modelos previamente desenvolvidos, descritos nas seções 2.5 – MODELO DE TRANSBORDO e 2.6 – MODELO DE ALOCAÇÃO DE CONTÊINERES VAZIOS. Posteriormente, esses modelos foram integrados (SEÇÃO 4.2 – ELABORAÇÃO DO MODELO INTEGRADO), quando também foram estabelecidas outras definições:

- identificação de parâmetros estáticos – custos de transporte, armazenagem e processamento; estoque mínimo; capacidade de depósitos (SEÇÃO 4.3 – DESCRIÇÃO DO MODELO INTEGRADO (ESTÁTICO));
- identificação de parâmetros dinâmicos – tempo de carregamento e descarregamento de contêineres em clientes; tempo de processamento e armazenagem de contêineres em depósitos; tempo de transporte de contêineres entre clientes e depósitos (SEÇÃO 4.3);

- formulação matemática para representar as inter-relações entre esses elementos:
 - modelo de transbordo para alocação e movimentação dos contêineres (SEÇÃO 4.3);
 - procedimentos heurísticos para ajuste das demandas de contêineres vazios e cheios (SEÇÃO 4.4 – UTILIZAÇÃO DO MODELO COMO BASE PARA IMPLEMENTAÇÃO DINÂMICA);
- procedimentos de resolução do modelo estático incorporando aspectos dinâmicos (SEÇÃO 4.5 – PROCEDIMENTOS DE RESOLUÇÃO DO MODELO INTEGRADO);
- implementação computacional do modelo, descrita com detalhes no CAPÍTULO 5, apresentando as principais funções (seções 5.1 – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS E 5.3 – MÓDULOS), projeto das informações de saída (seções 5.2 – MODELO DE DADOS e 5.4 – GRÁFICOS) e decisão sobre atributos parametrizáveis (SEÇÃO 5.5 – CUSTOMIZAÇÕES (FLEXIBILIDADE DO MODELO));
- estimativa das medidas de eficiência para as várias decisões, tais como custos mínimos e nível de serviço satisfatório (seções 5.1 – CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS e 5.4 – GRÁFICOS).

Estágio 3: Execução das análises

Para a operacionalização do modelo integrado, foi necessário criar uma estrutura de dados (SEÇÃO 5.2 – MODELO DE DADOS) e funções (SEÇÃO 5.3 – MÓDULOS) que representassem adequadamente a dinâmica do modelo integrado. A partir disso, foram realizadas as seguintes etapas:

- cálculo da solução matemática – para teste e execução foi utilizado um modelo de simulação, descrito na SEÇÃO 5.6 – EXECUÇÃO DO MODELO (SIMULAÇÃO);
- escolha de valores para as variáveis de decisão que otimizem o objetivo principal e forneçam um bom desempenho aos demais objetivos – o modelo foi executado utilizando dados gerados aleatoriamente, observando diversas políticas e diferentes combinações de valores (CAPÍTULO 6 – RESULTADOS COMPUTACIONAIS);
- a estabilidade do modelo foi avaliada em uma extensa etapa de testes, com diferentes combinações de valores, apresentando um desempenho bastante satisfatório (SEÇÃO 6.3 – EXEMPLO ILUSTRATIVO DE UTILIZAÇÃO DO SISTEMA);
- análise da sensibilidade da solução às especificações do modelo e avaliação da precisão das suposições estruturais – a utilização de um modelo de simulação

permitiu uma melhor análise de sensibilidade das soluções encontradas, reforçando as suposições iniciais. Ao mesmo tempo, foi possível avaliar a viabilidade do modelo para várias instâncias e diferentes situações (seções 6.1 – DESEMPENHO DO MODELO e 6.2 – RESULTADOS ADICIONAIS – INFLUÊNCIA DO LEASING).

Estágio 4: Implementação dos resultados e atualização do modelo

O modelo foi projetado de forma a absorver futuras atualizações e aprimoramentos, bem como condições específicas diferentes das atuais. As considerações finais, contribuições e limitações foram descritas no CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES.

4. Modelo de alocação e movimentação de contêineres

4.1. Modelos matemáticos

A fim de representar a movimentação de contêineres, vazios e cheios, foi desenvolvido um modelo de roteamento baseado no problema clássico de transbordo (Goldbarg, 2000). Para os contêineres vazios, foi elaborado um modelo de alocação apresentando a melhor distribuição desses contêineres de forma a satisfazer a demanda de clientes, conhecida e futura, derivado do modelo de Crainic, Gendreau e Dejax (1993).

A seguir, são apresentados os modelos matemáticos para representação do problema de alocação e roteamento de contêineres vazios e cheios.

4.1.1. Modelo de alocação e movimentação de contêineres vazios

Os contêineres vazios podem ser transportados desde qualquer origem inicial até qualquer destino final, dependendo apenas das demandas necessárias nos pontos de destino e do suprimento disponível nos pontos de origem. Antes de chegar ao seu destino final, os contêineres vazios circulam através de um ou mais pontos intermediários (depósitos em terra e depósitos em portos), que operam como pontos de transbordo.

O modelo de alocação de contêineres vazios é representado por uma rede, cujos nós são compostos pelos pontos de origem e de destino, e pelos pontos de transbordo (depósitos em terra e depósitos em portos). Os arcos da rede representam os movimentos possíveis entres esses pontos. Por definição, não são efetuadas ligações diretas entre clientes de suprimento e clientes de demanda. Também são excluídas as combinações que representam movimentos entre o mesmo depósito em terra ou entre o mesmo depósito em porto.

Cada ponto de origem pode transportar contêineres vazios para depósitos em terra ou depósitos em portos que, ao atuar como pontos de transbordo, devem repassar esses contêineres para os pontos de destino, de acordo com sua demanda.

O objetivo da distribuição de contêineres vazios é realocá-los de forma a atender a demanda de cada ponto pertencente ao modelo, visando obter o menor custo possível de transporte global. O modelo apresentado a seguir foi derivado do modelo clássico de transbordo (Eck, 1976; Goldbarg, 2000; Wagner, 1986).

Parâmetros:

N : conjunto de nós da rede, $N = H \cup W \cup S \cup D$

H : conjunto de portos, $H \subset N$

W : conjunto de depósitos em terra (não inclui depósitos em portos), $W \subset N$

S : conjunto de clientes de suprimento, $S \subset N$

D : conjunto de clientes de demanda, $D \subset N$

A : conjunto de arcos da rede; em particular, $(i,i) \notin A$, $\forall i \in N$; $(i,j) \notin A$, para $i \in S$ e $j \in D$

c_{ij} : custo unitário de transporte de contêineres vazios do nó i ao nó j , $(i,j) \in A$

p_i : custo unitário de processamento de contêineres vazios no nó i , $i \in W \cup H$

a_i : custo unitário de armazenagem de contêineres vazios no nó i , $i \in W \cup H$

X_s : quantidade de contêineres vazios disponível na origem s , $s \in S$

Y_d : quantidade de contêineres vazios requerida no destino d , $d \in D$

Variáveis de decisão:

x_{ij} : quantidade de contêineres vazios transportados do nó i ao nó j , $(i,j) \in A$

Função objetivo:

Minimizar o custo total de operação do sistema de distribuição e transporte de contêineres vazios.

$$\begin{aligned}
& \sum_{s \in S} \sum_{w \in W} c_{sw} x_{sw} + \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} c_{sh} x_{sh} + \sum_{w \in W} \sum_{d \in D} (c_{wd} + p_w + a_w) x_{wd} + \sum_{h \in H} \sum_{d \in D} (c_{hd} + p_h + a_h) x_{hd} + \\
& \sum_{w \in W} \sum_{w' \in W | w \neq w'} (c_{ww'} + p_w + a_w) x_{ww'} + \sum_{w \in W} \sum_{h \in H} (c_{wh} + p_w + a_w) x_{wh} + \\
& \sum_{h \in H} \sum_{h' \in H | h \neq h'} (c_{hh'} + p_h + a_h) x_{hh'} + \sum_{h \in H} \sum_{w \in W} (c_{hw} + p_h + a_h) x_{hw}
\end{aligned} \tag{13}$$

Restrições:*[suprimento de cliente]*

$$\sum_{w \in W} x_{sw} + \sum_{h \in H} x_{sh} \leq X_s \quad \text{para todo } s \in S \quad (14)$$

[demanda de cliente]

$$\sum_{w \in W} x_{wd} + \sum_{h \in H} x_{hd} \geq Y_d \quad \text{para todo } d \in D \quad (15)$$

[fluxos de balanceamento]

$$\sum_{i \in S \cup W \cup H} x_{ij} = \sum_{k \in W \cup H \cup D} x_{jk} \quad \text{para todo } j \in W \cup H \quad (16)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad \text{para todo } (i, j) \in A \quad (17)$$

Na função objetivo (13), o custo total é formado pela soma de todos os custos com armazenagem, processamento e transporte entre clientes de suprimento e depósitos, entre depósitos e clientes de demanda, e entre depósitos (em terra e em portos).

A restrição de suprimento de cliente (14) considera o suprimento de cada ponto de origem, envolvendo todos os pontos intermediários de destino (depósitos em terra e depósitos em portos). A restrição de demanda de cliente (15) garante o atendimento da demanda, considerando todas os pontos intermediários de origem (depósitos em terra e depósitos em portos).

A restrição (16) assegura o fluxo de balanceamento de todos os contêineres vazios que passam por determinado ponto intermediário (depósito em terra ou depósito em porto), e a expressão (17) representa as restrições usuais de não-negatividade das variáveis de decisão.

Dimensionamento do modelo de contêineres vazios

A quantidade de variáveis do modelo de alocação de contêineres vazios é definida por:

$$|S|(|W|+|H|)+|D|(|W|+|H|)+2(|W|\times|H|)+(|W|^2-|W|)+(|H|^2-|H|)$$

após os artifícios algébricos a seguir:

$$|S||W|+|S||H|+|D||W|+|D||H|+|W||H|+|W||H|+|W|(|W|-1)+|H|(|H|-1)$$

$$|W|(|S|+|D|+|W|+|H|-1)+|H|(|S|+|D|+|W|+|H|-1)$$

obtem-se a seguinte expressão:

$$(|W|+|H|)(|S|+|D|+|W|+|H|-1)$$

A quantidade de restrições do modelo de alocação de contêineres vazios (excluindo as usuais restrições de não-negatividade dos fluxos) é obtida por:

$$|S|+|D|+|W|+|H|$$

4.1.2. Modelo de alocação e movimentação de contêineres cheios

Os contêineres cheios possuem destino específico, mas devem ser conduzidos através de pontos intermediários (depósitos em terra e depósitos em portos), que atuam como pontos de transbordo.

O modelo de alocação de contêineres cheios é representado por uma rede, cujos nós são compostos pelos pontos de origem e de destino, e pelos pontos de transbordo (depósitos em terra e depósitos em portos). Os arcos da rede representam os movimentos possíveis entres esses pontos. Por definição, não são efetuadas ligações diretas entre clientes de suprimento e clientes de demanda. Também são excluídas as combinações que representam movimentos entre o mesmo depósito em terra ou entre o mesmo depósito em porto.

Cada ponto de origem envia os contêineres cheios para depósitos em terra ou depósitos em portos que, ao atuar como pontos de transbordo, devem repassar esses contêineres para os pontos de destino predeterminados.

O objetivo da distribuição de contêineres cheios é transportar cada unidade até seu destino final, buscando obter o menor custo possível de transporte global. O modelo

apresentado a seguir é baseado no modelo de alocação de contêineres vazios (dinâmico determinístico, para um tipo de contêiner) de Crainic, Gendreau e Dejax (1993).

Parâmetros:

N : conjunto de nós da rede, $N = H \cup W \cup S \cup D$

H : conjunto de portos, $H \subset N$

W : conjunto de depósitos em terra (não inclui depósitos em portos), $W \subset N$

S : conjunto de clientes de suprimento, $S \subset N$

D : conjunto de clientes de demanda, $D \subset N$

A : conjunto de arcos da rede; em particular, $(i,i) \notin A$, $\forall i \in N$; $(i,j) \notin A$, para $i \in S$ e $j \in D$

c_{ij} : custo unitário de transporte de contêineres cheios do nó i ao nó j , $(i,j) \in A$

p_i : custo unitário de processamento de contêineres cheios no nó i , $i \in W \cup H$

a_i : custo unitário de armazenagem de contêineres cheios no nó i , $i \in W \cup H$

X_{sd} : quantidade de contêineres cheios oriunda do cliente s destinada ao cliente de demanda d , $s \in S$, $d \in D$

Variáveis de decisão:

x_{ijre} : quantidade de contêineres cheios transportados do nó i ao nó j , cuja origem inicial é r e destino final é e , $(i,j) \in A$, $r \in S$, $e \in D$

Função objetivo:

Minimizar o custo total de operação do sistema de distribuição e transporte de contêineres cheios.

$$\begin{aligned}
& \sum_{r \in S} \sum_{e \in D} \left[\sum_{s \in S} \sum_{w \in W} c_{sw} x_{swre} + \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} c_{sh} x_{shre} + \sum_{w \in W} \sum_{d \in D} (c_{wd} + p_w + a_w) x_{wdre} + \right. \\
& \sum_{h \in H} \sum_{d \in D} (c_{hd} + p_h + a_h) x_{hdre} + \sum_{w \in W} \sum_{v \in W | v \neq w'} (c_{ww'} + p_w + a_w) x_{ww're} + \\
& \left. \sum_{w \in W} \sum_{h \in H} (c_{wh} + p_w + a_w) x_{whre} + \sum_{h \in H} \sum_{h' \in H | h' \neq h} (c_{hh'} + p_h + a_h) x_{hh're} + \sum_{h \in H} \sum_{w \in W} (c_{hw} + p_h + a_h) x_{hwre} \right] \quad (18)
\end{aligned}$$

Restrições:

[suprimento de cliente]

$$\sum_{w \in W} x_{swsd} + \sum_{h \in H} x_{shsd} = X_{sd} \quad \text{para todo } s \in S, d \in D \quad (19)$$

[demanda de cliente]

$$\sum_{w \in W} x_{wdsd} + \sum_{h \in H} x_{hdsd} \geq X_{sd} \quad \text{para todo } d \in D, s \in S \quad (20)$$

[fluxos de balanceamento]

$$(x_{sjsd} - x_{jdsd}) = 0 \quad \text{para todo } s \in S, j \in W \cup H \quad (21)$$

$$x_{ijre} \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad \text{para todo } (i, j) \in A, r \in S, e \in D \quad (22)$$

Na função objetivo (18), o custo total é formado pela soma de todos os custos de armazenagem, processamento e transporte entre clientes de suprimento e depósitos, entre depósitos e clientes de demanda, e entre depósitos (em terra e em portos).

A restrição de suprimento de cliente (19) considera o suprimento de cada ponto de origem endereçado a um determinado ponto de destino, envolvendo todos os pontos de destino intermediários (depósitos em terra e depósitos em portos). A restrição de demanda de cliente (20) garante o atendimento da demanda, considerando todas as origens intermediárias (depósitos em terra e depósitos em portos).

A restrição (21) assegura o fluxo de balanceamento de todos os contêineres cheios que passam por determinado ponto intermediário (depósito em terra ou depósito em porto). A expressão (22) representa as restrições usuais de não-negatividade das variáveis de decisão.

Dimensionamento do modelo de contêineres cheios

A quantidade de variáveis do modelo de alocação de contêineres cheios é definida por:

$$\left[2 \left[(|W| + |H|) + (|W||H|) \right] + (|W|^2 - |W|) + (|H|^2 - |H|) \right] |S||D|$$

que, após as seguintes simplificações algébricas:

$$\left[2|W| + 2|H| + |W||H| + |W||H| + |W|(|W| - 1) + |H|(|H| - 1) \right] |S||D|$$

$$\left[|W|(2 + |H| + |W| - 1) + |H|(2 + |W| + |H| - 1) \right] |S||D|$$

$$\left[|W|(|H| + |W| + 1) + |H|(|H| + |W| + 1) \right] |S||D|$$

é equivalente à expressão:

$$(|W| + |H|)(|W| + |H| + 1)|S||D|$$

A quantidade de restrições do modelo de alocação de contêineres cheios é obtida por:

$$2(|S||D|) + (|W| + |H|)|S||D|$$

que, simplificando, equivale a:

$$(|W| + |H| + 2)|S||D|$$

4.2. Elaboração do modelo integrado

Antes da construção do modelo integrado, foi necessário modelar o fluxo de um contêiner vazio (desde seu descarregamento nas dependências de um destinatário até que esteja novamente disponível a um cliente, independentemente de sua localização), e de um contêiner cheio (desde seu carregamento nas dependências de um cliente até que seja entregue a um destinatário). Após a elaboração desses fluxos, eles foram integrados, observando o balanceamento entre o fluxo normal e o fluxo reverso.

A FIGURA 4.1 apresenta um esquema do modelo integrado, delineando a rede de movimentação de contêineres vazios e cheios. Na rede, os nós representam clientes de origem e de destino, portos, depósitos em terra, e um *pool* de companhias arrendatárias de contêineres. Os arcos representam as rotas possíveis entre essas entidades, que podem ser terrestres (caminhão ou trem) ou marítimas. O *pool* será habilitado apenas quando for definido que o modelo incorpore a opção de utilização de *leasing*.

Os clientes podem originar demandas de contêineres cheios ou vazios, ou fornecer suprimento de contêineres cheios ou vazios. A demanda de um cliente pode ser satisfeita a partir de qualquer cliente que possua suprimento disponível, sempre através de um depósito (em terra ou porto) que esteja ligado a ambos os clientes. Os portos e os depósitos em terra processam e armazenam temporariamente contêineres em seus pátios. Por definição, não são efetuadas ligações diretas entre clientes de suprimento e clientes de demanda. Também são excluídas as combinações que representam movimentos entre o mesmo depósito em terra ou entre o mesmo depósito em porto.

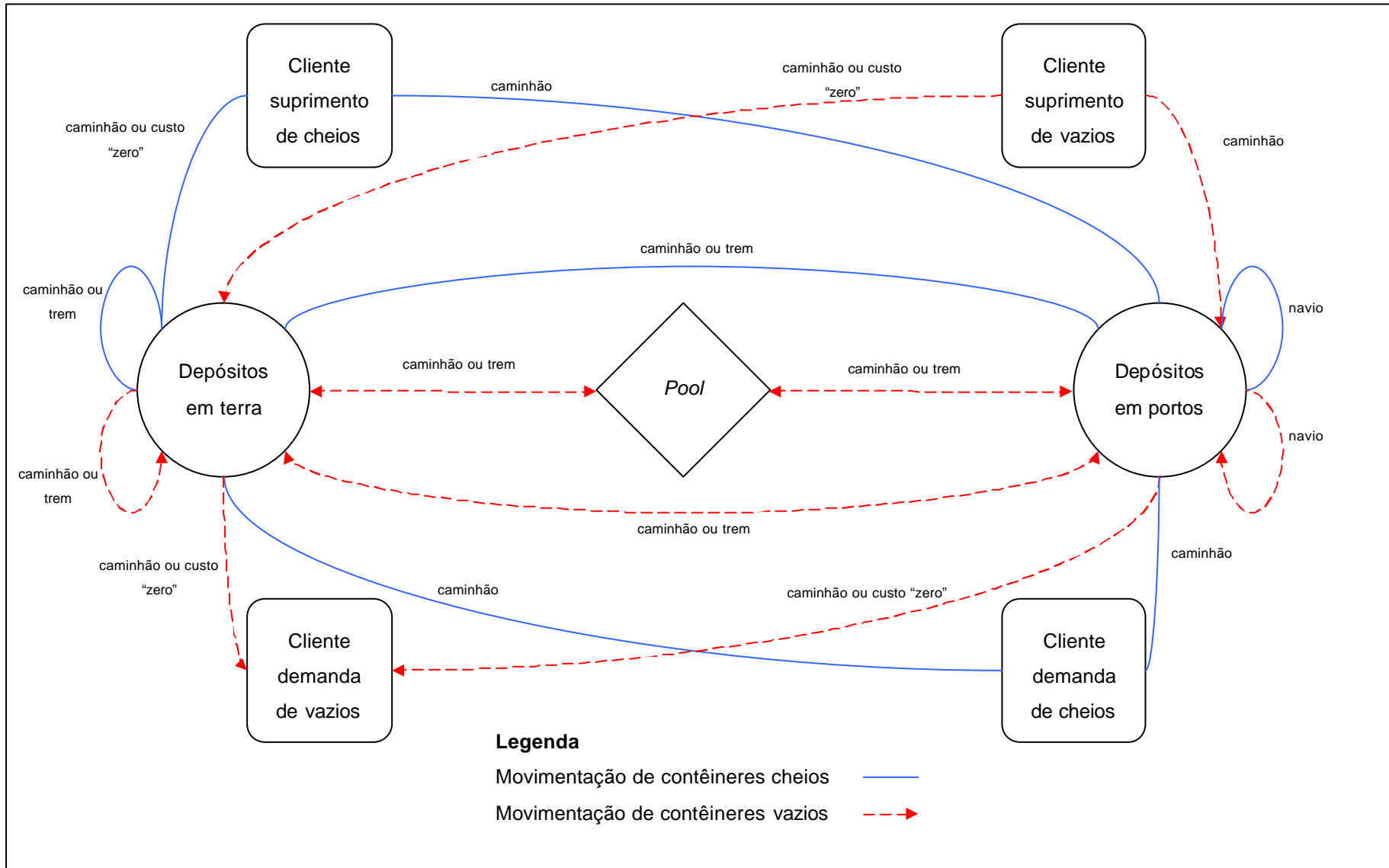


FIGURA 4.1 – FLUXO DE MOVIMENTAÇÃO DE CONTÊINERES VAZIOS E CHEIOS

Pode-se ilustrar simplificadamente a dinâmica temporal deste modelo com o esquema da FIGURA 4.2:

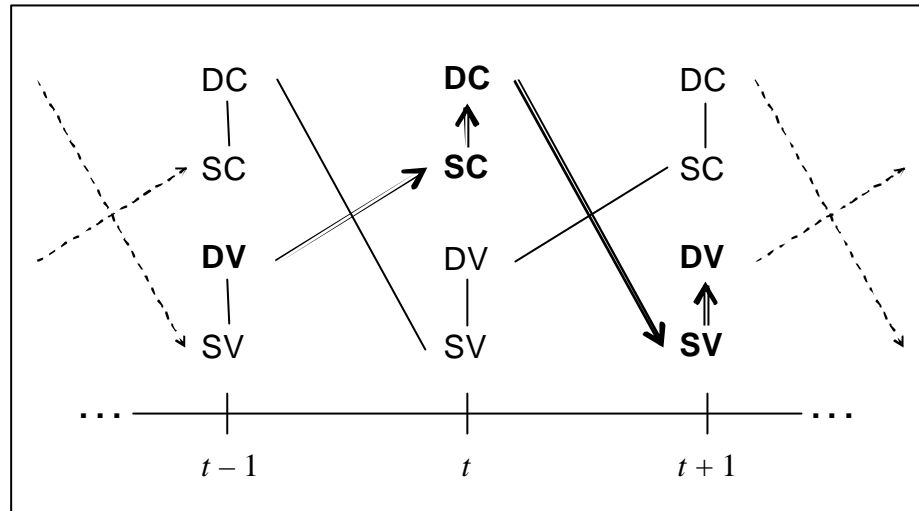


FIGURA 4.2 – ESQUEMA DE EXECUÇÃO DINÂMICA

Cada demanda de contêineres cheios (DC_t), em um determinado período t , gerará uma oferta de contêineres vazios (SV_{t+1}) no próximo período, $t + 1$. Esse suprimento de vazios será destinado aos demandadores de contêineres vazios (DV_{t+1}) naquele mesmo período. Ao mesmo tempo, o suprimento de contêineres cheios (SC_t) no período t gerou uma demanda de contêineres vazios (DV_{t-1}) no período anterior, $t - 1$, a fim de poder atender os pedidos de demandas de contêineres cheios (DC_t) no período t . Nota-se, pelo esquema descrito, que a relação entre as demandas e suprimentos de contêineres cheios e vazios se dá de dois em dois períodos, por exemplo, o valor de DV_{t-1} impactará o valor de DV_{t+1} e não o valor de DV_t .

Dentro de um mesmo período, os problemas podem ser representados utilizando-se modelos tradicionais da pesquisa operacional. O fluxo de SV_t para DV_t corresponde a um problema de transbordo (estático). De SC_t para DC_t , o problema de transbordo torna-se um pouco mais complexo, pois os contêineres cheios possuem origem e destino predeterminados, também de forma estática.

O fluxo que vai de DC_t para SV_{t+1} não representa movimentação, mas um simples esvaziamento de contêineres, para balanceamento de estoques. O fluxo que vem de DV_{t-1} para SC_t faz a integração dinâmica com o período anterior, representando a provisão de

contêineres vazios para carregamento posterior. Essa ligação deverá ser tratada através de procedimentos heurísticos.

Para representar a **movimentação** de contêineres, vazios e cheios, o modelo de roteamento foi derivado do problema clássico de transbordo (Eck, 1976; Goldberg, 2000; Wagner, 1986). Os contêineres não são enviados de uma origem diretamente a um destino, eles podem circular por quaisquer outros pontos intermediários (portos ou depósitos em terra), que também atuam como pontos de armazenagem, até chegar ao seu destino final. Os contêineres vazios podem ser transportados desde qualquer origem inicial até qualquer destino final, dependendo apenas das demandas necessárias nos pontos de destinos e do suprimento disponível nos pontos de origem. Embora os contêineres cheios possuam destino específico, também são conduzidos através dos pontos de transbordo. O objetivo da movimentação de contêineres vazios e cheios é transportá-los de forma a atender a demanda de cada ponto pertencente ao modelo, visando obter o menor custo possível de transporte global.

Uma demanda de contêineres cheios para um determinado cliente pode originar uma demanda de contêineres vazios deste para outros clientes, se não houver disponibilidade. O modelo de **alocação** de contêineres vazios está embutido na rede de movimentação: os nós representam os pontos de demanda e de suprimento, e os pontos de transbordo (depósitos em terra e depósitos em portos); os arcos da rede representam os caminhos entre esses pontos. O modelo de alocação de contêineres vazios foi inspirado no modelo de Crainic, Gendreau e Dejax (1993) e visa apresentar a melhor distribuição de contêineres vazios de forma a satisfazer a demanda de clientes, projetando o menor custo possível. O modelo de Crainic, Gendreau e Dejax é dinâmico e determinístico, considerando apenas um tipo de contêiner, utilizando funções lineares de custo para propriedade, substituição, empréstimo e transporte. Os custos de manipulação não foram incluídos em seu modelo. Por sua vez, o modelo proposto nesta tese engloba os custos de transporte, armazenagem e processamento (manipulação) de contêineres vazios e cheios, para um tipo de contêiner, o de 20 pés, correspondente a um TEU.

Os modelos de movimentação de contêineres vazios e cheios e de alocação de contêineres vazios foram integrados em um modelo de rede unificado, observando o balanceamento entre o fluxo normal e o fluxo reverso. A análise da rede produz um plano de rotas para redistribuição dos contêineres e atendimento da demanda de contêineres vazios e cheios, minimizando o custo total de transporte, armazenagem e processamento dos contêineres cheios e vazios, desde sua origem até seu destino, levando em consideração o suprimento disponível e o atendimento da demanda dos clientes.

O modelo integrado tem seu comportamento delineado em estágios: em um determinado instante de tempo t são verificadas as demandas de clientes por contêineres cheios. Os clientes demandados, por sua vez, verificam sua disponibilidade de contêineres vazios para atendimento dos pedidos de contêineres cheios, gerando, se necessário, uma demanda de contêineres vazios. O suprimento de contêineres vazios é alocado aos clientes de forma a atender a demanda e visando o menor custo de transporte possível. No próximo estágio, os contêineres vazios assim designados serão roteados juntamente com os contêineres cheios, satisfazendo as restrições do modelo de transbordo e buscando minimizar o custo global de transporte, armazenagem e processamento. Após a realocação desses contêineres, são incorporadas novas demandas de contêineres cheios (em $t + 1$) que darão origem a novas demandas de contêineres vazios, retornando ao primeiro estágio do problema. Todos os roteiros determinados em cada estágio ficam registrados e são controlados dinamicamente até seu total cumprimento.

Desta forma, os modelos de alocação de contêineres vazios e de movimentação de contêineres vazios e cheios tiveram seus fluxos e seu comportamento unificados em uma só rede, sendo tratados simultaneamente e de forma integrada.

4.3. Descrição do modelo integrado (estático)

A seguir, será apresentado o modelo matemático para representação do problema de alocação e movimentação de contêineres vazios e cheios de forma integrada. Sejam:

N : conjunto de nós da rede, $N = H \cup W \cup S \cup D$

H : conjunto de portos, $H \subset N$

W : conjunto de depósitos em terra (não inclui depósitos em portos), $W \subset N$

S : conjunto de clientes de suprimento, $S \subset N$

D : conjunto de clientes de demanda, $D \subset N$

A : conjunto de arcos da rede; em particular, $(i, i) \notin A$, $\forall i \in N$; $(i, j) \in A$, para $i \in S$ e $j \in D$

Note-se que, por definição, são impedidas ligações diretamente entre clientes.

c_{ij} : custo unitário de transporte de contêineres vazios do nó i ao nó j , $(i, j) \in A$

f_{ij} : custo unitário de transporte de contêineres cheios do nó i ao nó j , $(i, j) \in A$

p_i : custo unitário de processamento de contêineres no nó i , $i \in W \cup H$

a_i : custo unitário de armazenagem de contêineres no nó i , $i \in W \cup H$

Os custos são específicos para contêineres cheios ou vazios, embora possam ter o mesmo valor. Em cada ponto de transbordo, são também computados o custo de processamento (ou manipulação) e o custo de armazenagem por contêiner.

X_s : quantidade de contêineres vazios disponível na origem s , $s \in S$

Z_d : quantidade de contêineres vazios requerida no destino d , $d \in D$

Y_{sd} : quantidade de contêineres cheios oriunda do cliente de suprimento s destinada ao cliente de demanda d , $s \in S$, $d \in D$

Os contêineres vazios não possuem destino fixo, são distribuídos após análise dos suprimentos e demandas globais, a cada execução do modelo. Os contêineres cheios possuem destino fixo, devendo ser transportados pelo caminho de menor custo possível.

As variáveis de decisão do modelo são as quantidades de contêineres vazios e cheios que devem ser transportadas em cada arco da rede, observando-se que a variável referente a contêineres cheios mantém seu endereçamento (origem inicial e destino final).

x_{ij} : quantidade de contêineres vazios transportados do nó i ao nó j , $(i, j) \in A$

y_{ijre} : quantidade de contêineres cheios transportados do nó i ao nó j , cuja origem inicial é r e destino final é e , $(i, j) \in A$, $r \in S$, $e \in D$

De posse dessas variáveis, a função objetivo busca minimizar o custo total de operação do sistema de distribuição e transporte de contêineres vazios e cheios.

$$\begin{aligned}
& \left. \begin{aligned}
& \sum_{s \in S} \sum_{w \in W} c_{sw} x_{sw} + \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} c_{sh} x_{sh} + \sum_{w \in W} \sum_{d \in D} (c_{wd} + p_w + a_w) x_{wd} + \sum_{h \in H} \sum_{d \in D} (c_{hd} + p_h + a_h) x_{hd} + \\
& \sum_{w \in W} \sum_{w' \in W | w \neq w'} (c_{ww'} + p_w + a_w) x_{ww'} + \sum_{w \in W} \sum_{h \in H} (c_{wh} + p_w + a_w) x_{wh} + \\
& \sum_{h \in H} \sum_{h' \in H | h \neq h'} (c_{hh'} + p_h + a_h) x_{hh'} + \sum_{h \in H} \sum_{w \in W} (c_{hw} + p_h + a_h) x_{hw} +
\end{aligned} \right\} \text{vazios} \\
& \left. \begin{aligned}
& \sum_{r \in S} \sum_{d \in D} \left[\sum_{s \in S} \sum_{w \in W} f_{sw} y_{swre} + \sum_{s \in S} \sum_{h \in H} f_{sh} y_{shre} + \sum_{w \in W} \sum_{d \in D} (f_{wd} + p_w + a_w) y_{wdre} + \right. \\
& \sum_{h \in H} \sum_{d \in D} (f_{hd} + p_h + a_h) y_{hdre} + \sum_{w \in W} \sum_{w' \in W | w \neq w'} (f_{ww'} + p_w + a_w) y_{ww're} + \\
& \left. \sum_{w \in W} \sum_{h \in H} (f_{wh} + p_w + a_w) y_{whre} + \sum_{h \in H} \sum_{h' \in H | h \neq h'} (f_{hh'} + p_h + a_h) y_{hh're} + \sum_{h \in H} \sum_{w \in W} (f_{hw} + p_h + a_h) y_{hwre} \right] \\
\end{aligned} \right\} \text{cheios}
\end{aligned} \tag{23}$$

O custo total em (23) é formado pela soma de toda a movimentação de contêineres (vazios e cheios) a partir de clientes de suprimento para depósitos, de depósitos para clientes de demanda, e entre depósitos (em terra e em portos). Definiu-se que os custos de armazenagem e de processamento fossem alocados ao final de cada arco (trecho de transporte).

As restrições de suprimento dos clientes do modelo são indicadas por:

$$\sum_{j \in W \cup H} x_{sj} \leq X_s \quad \text{para todo } s \in S \tag{24}$$

$$\sum_{j \in W \cup H} y_{jsd} \geq Y_{sd} \quad \text{para todo } s \in S, d \in D \tag{25}$$

Para contêineres vazios (24), considera-se o suprimento total de cada ponto de origem, envolvendo todos os pontos intermediários de destino (depósitos em terra e depósitos em portos). Para contêineres cheios (25), considera-se o suprimento de cada ponto de origem endereçado a um determinado ponto de destino, envolvendo todos os pontos de destino intermediários.

Da mesma forma, as restrições de demandas de clientes são representadas por:

$$\sum_{j \in W \cup H} x_{jd} \geq Z_d \quad \text{para todo } d \in D \tag{26}$$

$$\sum_{j \in W \cup H} y_{jds} \geq Y_{sd} \quad \text{para todo } d \in D, s \in S \tag{27}$$

Essas restrições garantem o atendimento da demanda, de contêineres vazios (26) e de contêineres cheios (27), considerando todas os pontos intermediários de origem (depósitos em terra e depósitos em portos).

Além disso, é necessário estabelecer os fluxos de balanceamento do modelo, expressos por:

$$\sum_{s \in S} x_{sj} = \sum_{d \in D} x_{jd} \quad \text{para todo } j \in W \cup H \quad (28)$$

$$(y_{sjd} - y_{jdsd}) = 0 \quad \text{para todo } s \in S, d \in D, j \in W \cup H \quad (29)$$

Essas equações asseguram o balanceamento do fluxo de todos os contêineres vazios (28) e de todos os contêineres cheios (29) que passam por determinado ponto intermediário (depósito em terra ou depósito em porto).

$$x_{ij} \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad \text{para todo } (i, j) \in A \quad (30)$$

$$y_{ijsd} \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad \text{para todo } (i, j) \in A, s \in S, d \in D \quad (31)$$

Por fim, são embutidas as restrições usuais de não-negatividade das variáveis de decisão para contêineres vazios (30) e para contêineres cheios (31).

4.3.1. Dimensionamento do modelo de contêineres vazios e cheios

Para avaliação da complexidade do modelo, após a execução de algumas simplificações algébricas foram obtidas expressões equivalentes à quantidade de variáveis que representam os contêineres vazios e os contêineres cheios do modelo.

Seja $|N|$ a cardinalidade do conjunto N ,

a quantidade de variáveis referentes a contêineres vazios é definida por:

$$(|W| + |H|)(|S| + |D| + |W| + |H| - 1)$$

a quantidade de variáveis relativas a contêineres cheios é determinada por:

$$(|W| + |H|)(|W| + |H| + 1)|S||D|$$

Ao unificar as duas expressões, obtém-se a quantidade de variáveis do modelo integrado de alocação e movimentação de contêineres vazios e cheios que, após simplificações algébricas apresentadas a seguir:

$$\begin{aligned}
& (|W|+|H|)(|S|+|D|+|W|+|H|-1) + (|W|+|H|)(|W|+|H|+1)|S||D| \\
& (|W|+|H|)(|S|+|D|+|W|+|H|-1+1-1) + (|W|+|H|)(|W|+|H|+1)|S||D| \\
& (|W|+|H|)(|S|+|D|+|W|+|H|+1-2) + (|W|+|H|)(|W|+|H|+1)|S||D| \\
& (|W|+|H|)(|W|+|H|+1) + (|W|+|H|)(|S|+|D|-2) + (|W|+|H|)(|W|+|H|+1)|S||D| \\
& (|W|+|H|)(|W|+|H|+1)(|S||D|+1) + (|W|+|H|)(|S|+|D|-2) \\
& (|W|+|H|)[(|W|+|H|+1)(|S||D|+1) + |S|+|D|-2] \\
& (|W|+|H|)[(|W|+|H|+1)|S||D| + |W|+|H|+1 + |S|+|D|-2] \\
& (|W|+|H|)[|W|+|H|+|S|+|D|-1 + (|W|+|H|+1)|S||D|] \\
& (|W|+|H|)[|W|+|H|+|S|+|D|-1+1-1 + (|W|+|H|+1)|S||D|]
\end{aligned}$$

dá origem à expressão:

$$(|W|+|H|)[(|W|+|H|+1)(|S||D|+1) + |S|+|D|-2] \quad (32)$$

A quantidade de restrições do modelo relativas a contêineres vazios, excluindo as usuais restrições de não-negatividade dos fluxos, é obtida por:

$$|S|+|D|+|W|+|H|$$

As restrições do modelo de movimentação de contêineres cheios são representadas pela expressão:

$$(|W|+|H|+2)|S||D|$$

Ao associar essas expressões, determina-se a quantidade de restrições do modelo integrado de alocação e movimentação de contêineres vazios e cheios:

$$[|S|+|D|+|W|+|H|] + [(|W|+|H|+2)|S||D|]$$

que, simplificando, corresponde a:

$$(|W|+|H|)(|S||D|+1) + 2|S||D| + |S|+|D| \quad (33)$$

Atribuindo valores aos parâmetros dessas expressões, é possível dimensionar o número máximo de variáveis e de restrições (equações (32) e (33), respectivamente) de diferentes instâncias do modelo integrado de alocação e movimentação de contêineres vazios e cheios, evidenciando os efeitos de certas configurações para análise de sensibilidade do modelo. A seguir, são apresentados alguns exemplos.

Mantendo-se fixa a quantidade de origens e destinos, e aumentando a quantidade de portos e depósitos em terra verifica-se um progressivo aumento na quantidade de variáveis. A TABELA 4.1 torna evidente o fato de que, nesse caso, o incremento nas restrições é linear, como pode ser percebido imediatamente a partir da EQUAÇÃO (33).

TABELA 4.1 – DIMENSIONAMENTO DE VARIÁVEIS E RESTRIÇÕES COM ACRÉSCIMO DE DEPÓSITOS

S	D	W	H	Modelo					
				contêineres vazios		contêineres cheios		integrado	
				variáveis	restrições	variáveis	restrições	variáveis	restrições
2	2	0	1	4	5	8	12	12	17
2	2	0	2	10	6	24	16	34	22
2	2	0	3	18	7	48	20	66	27
2	2	4	4	88	12	288	40	376	52
2	2	5	5	130	14	440	48	570	62
2	2	10	10	460	24	1680	88	2140	112

Ao se fixar o número de depósitos (em portos e em terra), aumentando apenas o número de clientes de origem e de destino, há um incremento intenso na quantidade de variáveis do modelo, devido ao grande aumento nas variáveis relativas a contêineres cheios. Como pode ser verificado nas equações (32) e (33), tanto as variáveis como as restrições de contêineres cheios produzem um efeito combinatório. Exemplos dessas variações podem ser observados na TABELA 4.2.

TABELA 4.2 – DIMENSIONAMENTO DE VARIÁVEIS E RESTRIÇÕES COM ACRÉSCIMO DE CLIENTES

S	D	W	H	Modelo					
				contêineres vazios		contêineres cheios		integrado	
				variáveis	restrições	variáveis	restrições	variáveis	restrições
1	1	2	2	20	6	20	6	40	12
2	2	2	2	28	8	80	24	108	32
3	3	2	2	36	10	180	54	216	64
4	4	2	2	44	12	320	96	364	108
5	5	2	2	52	14	500	150	552	164
10	10	2	2	92	24	2000	600	2092	624

Analisando a TABELA 4.3, percebe-se que os contêineres cheios incrementam com muita intensidade a quantidade de variáveis do modelo, pelo fato de todos os caminhos serem multiplicados pelas diferentes combinações de origens e destinos.

TABELA 4.3 – DIMENSIONAMENTO DE VARIÁVEIS E RESTRIÇÕES COM ACRÉSCIMO DE CLIENTES E DEPÓSITOS

S	D	W	H	Modelo					
				contêineres vazios		contêineres cheios		integrado	
				variáveis	restrições	variáveis	restrições	variáveis	restrições
1	1	1	1	6	4	6	4	12	8
2	2	2	2	28	8	80	24	108	32
3	3	3	3	66	12	378	72	444	84
4	4	4	4	120	16	1152	160	1272	176
5	5	5	5	190	20	2750	300	2940	320
10	10	5	5	290	30	11000	1200	11290	1230
10	10	10	10	780	40	42000	2200	42780	2240
15	15	4	4	296	38	16200	2250	16496	2288
20	20	4	4	376	48	28800	4000	29176	4048
20	20	5	5	490	50	44000	4800	44490	4850

Pode-se verificar, enfim, que com uma instância pequena do problema – 20 clientes de origem e de destino, e 10 depósitos (em portos e em terra), atinge-se cerca de 45.000 variáveis e 5.000 restrições, ilustrando o efeito combinatório do modelo. Essa característica aponta para a conveniência de se utilizar métodos heurísticos, abrindo mão da otimização plena (Kim e Egbelu, 1999).

4.4. Utilização do modelo como base para implementação dinâmica

Na seção anterior foi apresentada a descrição do modelo integrado estático, que resolve a distribuição e o transporte dos contêineres vazios e cheios de acordo com os suprimentos e demandas informados. Para a implementação dinâmica, é necessário que as demandas e os suprimentos de contêineres cheios sejam atualizados e transferidos para as próximas unidades de tempo, interligando os estágios estático e dinâmico, conforme apresentado na FIGURA 4.2. Para que essa transferência fosse realizada de forma apropriada, fez-se uso de procedimentos heurísticos, que serão descritos a seguir.

4.4.1. Procedimentos heurísticos de solução

A cada unidade de tempo, o modelo deve refletir o estoque de contêineres de cada cliente e de cada depósito, tratar as demandas de clientes por contêineres vazios e cheios adequando ao suprimento ofertado, observar tempos de armazenagem e de processamento nos depósitos, e tempos de transporte entre todos os pontos, levando em conta que quaisquer desses parâmetros afetam o resultado da execução. Devido à existência de muitas combinações diferentes para ser testadas em modelos dessa natureza, Lai, Lam e Chan (1995) aconselham a utilização de técnicas heurísticas para obter algumas soluções preliminares, prática que foi adotada neste trabalho.

Entretanto, somente durante o projeto e desenvolvimento do sistema foi possível perceber a alta sensibilidade do modelo: além da quantidade de parâmetros que podem e devem ser customizados, alterações em quaisquer desses parâmetros podem modificar consideravelmente os resultados do processamento em longo prazo. Pequenas variações, tais como uma unidade de tempo adicional para armazenagem em um depósito, causam alteração no andamento do processamento e resultados bastante distintos em termos de prazos e quantidades transportadas.

Outro desafio enfrentado durante o desenvolvimento e testes do sistema foi encontrar uma forma eficiente de priorizar o atendimento das demandas lidando com os pedidos não atendidos das unidades de tempo anteriores (*backlog*). Algumas soluções causavam grande defasagem entre a data da solicitação e a data do atendimento. Ou seja, se pedidos não atendidos são adiados para a próxima unidade de tempo, e o sistema prioriza demandas mais antigas, as novas encomendas ficam temporariamente relegadas. Caso todas as encomendas fossem agregadas ao modelo antes da otimização, o custo ótimo poderia fazer com que as mais novas fossem atendidas prioritariamente, e as encomendas mais antigas nunca o fossem.

Ainda na fase de desenvolvimento, com a proposição de manter o mínimo custo, foi aventada a possibilidade de otimizar o roteiro a cada trecho de transporte, modificando os pontos intermediários dinamicamente, o que se mostrou inviável. Optou-se, então, por manter o caminho determinado, mesmo que esse custo não permanecesse ótimo no decorrer do tempo (ou pudesse ser minimizado ao longo da execução, devido à liberação de caminhos que eventualmente não estavam disponíveis no momento da otimização). Como, no mesmo momento, deveria ser feito o controle dos contêineres que já estavam sendo transportados, manter o caminho previamente determinado mostrou-se a solução mais indicada.

Se todo o cronograma fosse determinado inicialmente e mantido estático até o final, o custo ótimo seria conservado, mas novas demandas não seriam atendidas enquanto todo o roteiro não fosse cumprido. Então, após o roteamento pelo mínimo custo, a disponibilidade de vagas nos depósitos de cada trecho é atualizada à medida que o seu transporte é efetivado, e o custo real é recalculado ao final de cada unidade de tempo.

Portanto, optou-se por focalizar no custo, mas sem desprezar o nível de atendimento. Possivelmente, os custos de transporte poderiam ser menores, mas os gargalos no sistema o tornariam inviável.

Conforme exposto anteriormente, o problema de transporte de contêineres, em situações reais, é tipicamente desequilibrado – a regra é que a quantidade global de

suprimento e de demanda não sejam as mesmas. Entretanto, para a resolução eficiente de um problema tradicional de transbordo, é recomendável que essas quantidades sejam iguais. Para tanto, é necessário que, antes de montar o problema, seja feito algum tipo de equiparação entre a demanda necessária e o suprimento disponível, tanto para contêineres cheios como para contêineres vazios.

4.4.2. Ajuste da demanda de contêineres cheios

Para cada cliente para o qual estejam sendo solicitados contêineres cheios, são respeitados os seguintes critérios para priorização das demandas:

- Data original da demanda – pedidos mais antigos são priorizados, pois postergações sucessivas comprometem o nível de serviço oferecido.
- Custo de transporte – menor custo de transporte de contêineres cheios entre este cliente e o cliente que está solicitando os contêineres, pois a minimização do custo é o objetivo principal.
- Tempo de transporte – menor tempo de transporte entre este cliente e o cliente que está solicitando os contêineres, inspirado na regra de ordenamento de tarefas SPT (do inglês, *Shortest Processing Time*), que minimiza o tempo total de atravessamento.

No início de cada execução, são analisados todos os menores caminhos entre cada par de clientes, passando por ao menos um depósito. Para cada conjunto de cliente de origem, cliente de destino e depósitos intermediários, são calculados o custo total e o tempo total entre o ponto inicial e o final. Após, para cada par de clientes de origem e destino, é assinalada a opção de menor custo e a de menor tempo. O sistema pode utilizar uma ou outra conforme estiver configurado. Essa informação é utilizada para priorização de demandas quando o suprimento total disponível de contêineres não é suficiente. A demanda não atendida é recalculada e repassada para a próxima unidade de tempo.

A Tabela 5.4 mostra como são apresentadas as informações de menor custo e de menor tempo de transporte entre um cliente de origem (suprimento) e clientes de destino (demanda).

É importante registrar que várias outras possibilidades de priorização foram testadas, algumas fazendo com que o sistema atrasasse muito a resolução das pendências. Este método de priorização mostrou-se o mais adequado, com boa distribuição do atendimento das demandas entre os diferentes clientes.

TABELA 5.4 – ROTEIROS ENTRE CLIENTES – INFORMAÇÕES PARA PRIORIZAÇÃO

Cliente Origem	Cliente Destino	Depósitos	Custo Transporte Cheios	Tempo Médio Transporte	Menor Custo Cheio	Menor Tempo Transporte
2	1	001	5,00	4	Sim	Não
2	1	002	6,00	5	Não	Não
2	1	003	7,00	3	Não	Sim
2	3	001	5,00	5	Sim	Não
2	3	002	6,00	3	Não	Sim
2	3	003	7,00	3	Não	Não
2	4	001-002	7,00	8	Não	Não
2	4	002	7,00	5	Não	Não
2	4	003	5,00	4	Sim	Sim

4.4.3. Ajuste da demanda de contêineres vazios

Para atender aos pedidos de contêineres vazios, não é possível utilizar o mesmo método de priorização dos contêineres cheios (menor custo ou menor tempo), pelo fato de não haver caminhos (origens e destinos) preestabelecidos para ser analisados. Optou-se, então, pelo critério de priorização de demandas de maior volume.

A demanda por contêineres vazios não atendida em uma determinada unidade de tempo será incorporada ao pedido na próxima unidade de tempo, quando a demanda é recalculada adicionando as novas necessidades de contêineres, e abatendo os contêineres cheios e vazios que estão por chegar conforme a projeção configurada pelo usuário.

Esse método também se mostrou bem adequado à resolução das demandas de forma equânime entre os diferentes clientes.

Cabe ressaltar que esses procedimentos heurísticos bastante elementares (sem considerar os demais parâmetros envolvidos) reduziram drasticamente o número de variáveis e restrições do modelo. Por exemplo, na instância com 20 clientes, de origem e de destino, e oito depósitos, cujo número máximo de variáveis era cerca de 30.000, passou para 6.200 em 50 unidades de tempo; o número máximo de restrições, que se situava em torno de 4.000, reduziu-se para cerca de 800.

4.5. Procedimentos de resolução do modelo integrado

A solução encontrada para incorporação do fator “tempo” no modelo deste estudo foi decompor o problema em estágios, interligando seus resultados, conforme os passos a seguir:

Início

Passo 1 Fazer $t = 1$

Passo 2 **Ajustar** a demanda de contêineres vazios e cheios, considerando os suprimentos e demandas globais dos clientes

2.1 **Obter** demandas de contêineres cheios de cada cliente para todos os outros clientes

2.2 **Gerar** demanda de contêineres vazios, segundo os procedimentos descritos na SEÇÃO 5.3.1-2

2.3 **Obter** suprimento total de contêineres vazios do sistema, segundo os procedimentos descritos na SEÇÃO 5.3.1-3

2.4 **Ajustar** demandas e suprimentos globais, de contêineres cheios e vazios, segundo os procedimentos descritos nas seções 4.4.2 e 4.4.3

2.5 **Se** opção para utilizar *leasing* está habilitada **então**

Gerar pedidos de *leasing*

Efetuar devoluções de *leasing*

Passo 3 **Determinar** a solução de mínimo custo do modelo de transbordo – equações (23) a (31), considerando transporte, processamento e armazenagem de unidades de contêineres cheios e vazios

Passo 4 **Registrar** e **controlar** a dinâmica do transporte, utilizando a solução encontrada no **Passo 3**

Passo 5 **Se** $(t < t_{\max})$ **então**

Fazer $t = t + \Delta t$

Ir para o **Passo 2**

Passo 6 **Gerar** estatísticas

Fim

Observações:

- O Passo 2 efetua um balanceamento dos recursos, de forma estática, analisando as demandas com relação aos suprimentos disponíveis em cada unidade, reavaliando as capacidades dos fluxos e dos pontos de transbordo, priorizando a qualidade do atendimento (nível de serviço).
- A partir das demandas e suprimentos resultantes do Passo 2, o Passo 3 faz a alocação dos contêineres vazios e cheios, de forma estática, priorizando o mínimo custo através da resolução de um problema de roteamento.
- O Passo 4 observa o cumprimento das rotas obtidas na resolução do problema de transbordo executado no Passo 3, controlando também a utilização da capacidade de armazenamento dos depósitos em terra e em portos.
- Após o Passo 5, o modelo retorna ao Passo 2 para processar a unidade de tempo seguinte, e assim por diante, até atingir o horizonte de tempo informado (t_{\max}).

5. Implementação computacional do modelo

Após concluída a etapa de testes relativos à modelagem matemática do modelo, conferindo os resultados obtidos utilizando o software Lindo®, deu-se início à elaboração de um modelo executável, que representasse as diferentes entidades envolvidas no modelo e sua interação. Foi utilizado o Microsoft® Access para a base de dados e VBA (do inglês, *Visual Basic for Applications*) para os procedimentos, interagindo com o software Lindo® API (do inglês, *Application Programming Interface*) para os cálculos de minimização de custos. Os gráficos ilustrados nas figuras FIGURA 5.4 e FIGURA 5.5 foram desenvolvidos com apoio do software de código aberto Graphviz (Graph Visualization).

5.1. Características principais

Gerais

- Todos os clientes do modelo podem gerar demandas para outros clientes com os quais estejam relacionados.
- Os contêineres devem ser encaminhados aos clientes de demanda sempre através de portos ou depósitos em terra (pontos de transbordo), ou seja, transporte direto entre clientes não é permitido.
- Para efeitos de implementação, não houve diferenciação entre depósitos em portos e depósitos em terra, pelo fato de possuírem as mesmas características operacionais, funcionando apenas como pontos de transbordo.
- Os depósitos em terra e os depósitos em portos possuem capacidade limitada por seu espaço físico para armazenagem de contêineres, pré-cadastrada no sistema. Caso o depósito esteja com sua capacidade esgotada, os contêineres devem aguardar liberação para entrada.
- No transporte de contêineres cheios, a origem é determinada pelo cliente de demanda, no momento do pedido. No caso de vazios, o cliente de demanda não define a origem dos contêineres, sendo esta determinada pelo sistema, considerando a disponibilidade e buscando otimizar os custos.
- Os contêineres cheios que chegam ao cliente de destino, após serem descarregados, são automaticamente considerados como estoque de contêineres vazios neste cliente.
- Para minimizar pedidos muito freqüentes ou de quantidade reduzida, os clientes possuem cadastrado um estoque mínimo de contêineres vazios. Se o estoque em um cliente, ao atender uma demanda, torna-se inferior ao seu estoque mínimo, o sistema requisitará contêineres para este cliente, mesmo que a demanda efetiva

naquele instante possa ser atendida pelo seu estoque atual. Além disso, há uma margem (percentual) adicionada ao pedido sempre que o sistema requisitar contêineres vazios para cada cliente. Estes parâmetros podem também assumir valores nulos, moldando-se à conveniência do usuário.

- Quando uma demanda por contêineres cheios não puder ser atendida, uma nova demanda é gerada para a unidade de tempo seguinte. Demandas mais antigas têm maior prioridade de atendimento.
- Ao final de cada execução, é possível verificar a situação do sistema em cada unidade de tempo, e de cada cliente e de cada depósito individualmente, permitindo grande flexibilidade de análise.

Custos

- Foram embutidos no modelo três tipos de custo: transporte, processamento (manipulação) e armazenagem, considerados como logísticos. Não foram incluídos no modelo os custos de propriedade, aquisição, depreciação e manutenção de contêineres, por fugirem ao escopo do estudo.
- Em depósitos em terra e em portos, são computados os custos de processamento (por contêiner) e de armazenagem (por contêiner-unidade de tempo). Os custos de processamento (carga e descarga) e de armazenagem podem ser diferentes em cada porto ou depósito em terra.

Leasing

- O *leasing* pode ser ou não habilitado a cada execução do modelo. O *leasing* foi implementado de forma simplificada, buscando resolver gargalos de não-atendimento de demanda.
- A cada unidade de tempo, o sistema calcula a necessidade de *leasing* de cada cliente e, se necessário, faz uma operação de *leasing* global.
- Podem ser cadastradas mais de uma companhia de *leasing* – a decisão será pela de menor custo. As companhias de *leasing* podem, eventualmente, não ter disponibilidade de contêineres.
- Por simplicidade, considera-se que os contêineres arrendados estão disponíveis imediatamente após o pedido. Também a devolução dos contêineres, do cliente para a companhia, é feita instantaneamente (na mesma unidade de tempo).
- Cada operação de *leasing* possui um cronograma de devolução, com prazo mínimo de retorno e prazo de vencimento da operação.

- O custo de *leasing* é diário, o contêiner sendo ou não utilizado. Após o prazo mínimo de retorno, sua devolução é prioritária, precedendo a realocação dos contêineres vazios.
- Por simplificação, não foi implementada multa por não devolução do *leasing* após o vencimento, nem custo de transporte para busca e devolução de contêineres arrendados.
- Os custos de *leasing* não foram considerados como logísticos, mas financeiros, não sendo incluídos no cálculo de minimização do custo global, embora sejam calculados e estejam disponíveis.

5.2. Modelo de dados

A seguir, são apresentadas as principais entidades do sistema, relacionando seus atributos mais relevantes.

Cliente

- Estoque inicial de contêineres vazios
- Tempo necessário para colocar carga em um contêiner
- Tempo necessário para retirar carga de um contêiner
- Estoque mínimo de contêineres vazios
- Margem para pedido de contêineres vazios

Depósito

- Tipo de depósito (terra ou porto)
- Capacidade total para contêineres vazios e cheios somados
- Custo de processamento por contêiner
- Custo de armazenagem por contêiner, para cada unidade de tempo
- Tempo necessário para processar um contêiner
- Tempo de armazenagem de um contêiner

Relacionamento entre clientes

Para cada par de clientes entre os quais existe relacionamento são informadas as demandas de contêineres cheios, do cliente de destino (demandante) para o cliente de origem (supridor).

Relacionamento entre depósitos

Para cada par de depósitos entre os quais existe fluxo são cadastrados:

- Custo de transporte de um contêiner vazio
- Custo de transporte de um contêiner cheio
- Tempo necessário para transportar contêineres entre estes depósitos

Relacionamento entre clientes e depósitos

Para cada par de cliente e depósito entre os quais existe fluxo são cadastrados:

- Custo de transporte de um contêiner vazio
- Custo de transporte de um contêiner cheio
- Tempo necessário para transportar contêineres entre estas entidades

Demanda

- UT em que a demanda foi processada
- UT em que a demanda foi solicitada pela primeira vez
- Cliente de demanda
- Cliente de suprimento (apenas para demanda de contêineres cheios)
- Tipo de contêiner (vazio ou cheio)
- Quantidade de contêineres solicitados
- Quantidade ajustada de contêineres – é a parcela (ou total) da demanda para a qual existe suprimento
- Quantidade parcial (ou total) da demanda que chegou ao cliente final – até a UT atual

Roteiro de transporte

Armazena cada trecho do roteiro de transporte, descrevendo a rota que os contêineres devem seguir.

- UT da demanda
- Tipo (vazio ou cheio)
- Cliente ou depósito de Origem do trecho
- Cliente ou depósito de Destino do trecho
- Cliente de Origem Inicial – para cheios, contém o cliente supridor
- Cliente de Destino Final – para cheios, contém o cliente final (demandante)
- Quantidade a ser movimentada entre os locais

- Previsão do tempo de transporte entre estas entidades (apenas para decidir menor caminho)
- Tempo de processamento no destino (se o destino for um depósito)
- Tempo de armazenagem no destino (se o destino for um depósito)
- Custo de processamento no local de destino (se o destino for um depósito)
- Custo de armazenagem no local de destino (se o destino for um depósito)
- Custo de transporte entre o local de origem e de destino
- Outros atributos utilizados para o controle da movimentação de cada trecho (UT de entrada e saída do destino, UT de liberação para entrada em depósito)

Companhia de leasing

- Quantidade inicial de contêineres disponíveis para *leasing*
- Custo de *leasing* por contêiner, para cada unidade de tempo
- Prazo mínimo, em unidades de tempo, para devolução de contêineres
- Prazo de vencimento, em unidades de tempo, para operações de *leasing*

Operação de leasing

- Companhia de *Leasing*
- UT do Pedido
- UT em que pode ser iniciada a devolução, definida na criação da operação
- Data de Vencimento – UT máxima para devolução de todos os contêineres
- Quantidade Arrendada
- Quantidade Devolvida – até a UT atual
- UT de encerramento da operação
- Quantidades de contêineres entregues a cada cliente
- Quantidades devolvidas e UTs de cada devolução

Adicionalmente, foram criadas tabelas com informações consolidadas sobre os depósitos e os clientes, para cada unidade de tempo. Esses dados permitem uma grande variedade de análises sobre os pontos críticos e o nível de serviço do sistema.

Estatísticas dos depósitos por UT

- Depósito
- Unidade de tempo (UT) a que os dados se referem
- Quantidade de contêineres vazios ao final da UT
- Quantidade de contêineres cheios ao final da UT

Um exemplo das informações relativas aos depósitos pode ser verificado na TABELA 5.1.

TABELA 5.1 – ESTATÍSTICAS DOS DEPÓSITOS POR UT

Depósito	UT	Quantidade contêineres vazios	Quantidade contêineres cheios
1	1	50	80
1	2	50	80
1	3	50	80
1	4	50	80
1	5	50	100
2	1	0	0
2	2	2	0
2	3	2	6
2	4	5	0
2	5	8	19

Estatísticas dos clientes por UT

- Cliente
- Unidade de tempo (UT) a que os dados se referem
- Quantidade de contêineres vazios no início da UT
- Quantidade de contêineres vazios ao final da UT
- Demanda de contêineres vazios gerada por este cliente
- Demanda de contêineres cheios gerada por este cliente
- Demanda de contêineres vazios gerada por este cliente, ajustada pela disponibilidade
- Demanda de contêineres cheios gerada por este cliente, ajustada pela disponibilidade
- Demanda de contêineres cheios gerada para este cliente por outros clientes
- Quantidade de contêineres vazios despachados
- Quantidade de contêineres cheios despachados
- Quantidade de contêineres vazios recebidos
- Quantidade de contêineres cheios recebidos
- Quantidade de contêineres vazios recebidos por *leasing*
- Quantidade de contêineres vazios devolvidos para a companhia de *leasing*

A TABELA 5.2 apresenta um exemplo dos dados armazenados.

TABELA 5.2 – ESTATÍSTICAS DOS CLIENTES POR UT

Cliente	UT	Quantidade vazios início UT	Quantidade vazios	Demanda vazios solicitada	Demanda cheios solicitada	Demanda vazios ajustada	Demanda cheios ajustada	Demanda cheios solicitada por outros	Saída vazios	Saída cheios	Entrada vazios	Entrada cheios	Entrada leasing	Saída leasing
1	1	40	33	0	21	0	21	7	0	7	0	0	0	0
1	2	33	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	3	33	26	0	0	0	0	7	0	7	0	0	0	0
1	4	26	17	0	0	0	0	9	0	9	0	0	0	0
1	5	17	12	0	19	0	9	0	5	0	0	0	0	0
1	6	12	5	0	32	0	0	0	7	0	0	0	0	0
1	7	5	5	0	36	0	2	0	0	0	0	0	0	0
1	8	5	14	0	49	0	0	0	0	0	0	9	0	0
1	9	14	5	0	49	0	10	8	1	8	0	0	0	0
1	10	5	12	12	47	5	4	24	0	5	0	12	0	0
2	1	20	0	5	6	5	6	23	0	20	0	0	0	0
2	2	0	0	8	0	8	0	11	0	0	0	0	0	0
2	3	0	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0
2	4	0	0	0	10	0	10	11	0	0	0	0	0	0
2	5	0	0	4	0	4	0	21	0	0	0	0	0	0
2	6	0	0	14	20	0	3	35	0	0	0	0	0	0
2	7	0	11	14	17	0	0	35	0	0	5	6	0	0
2	8	11	8	14	17	0	0	35	0	11	8	0	0	0
2	9	8	4	14	26	0	5	24	0	8	4	0	0	0
2	10	4	0	11	45	0	9	23	0	4	0	0	0	0
3	1	10	2	0	21	0	18	6	2	6	0	0	0	0
3	2	2	2	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	2	2	0	18	0	7	0	0	0	0	0	0	0
3	4	2	2	0	20	0	9	0	0	0	0	0	0	0
3	5	2	2	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	6	2	2	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	7	2	0	0	11	0	0	4	0	2	0	0	0	0
3	8	0	7	0	17	0	11	2	0	0	0	7	0	0
3	9	7	11	0	6	0	0	11	0	7	0	11	0	0
3	10	11	9	0	13	0	0	4	5	4	0	7	0	0

Estatísticas do modelo por UT

- Unidade de tempo (UT) a que os dados se referem
- Quantidade de contêineres vazios no sistema
- Quantidade de contêineres cheios no sistema
- Quantidade de contêineres vazios que estão em transporte (não estão nem em clientes nem em depósitos)
- Quantidade de contêineres cheios que estão em transporte (não estão nem em clientes nem em depósitos)
- Quantidade de contêineres vazios que estão em clientes
- Quantidade de contêineres vazios que estão em depósitos
- Quantidade de contêineres cheios que estão em depósitos
- Custo total de transporte (registrado quando transporte chega no destino)
- Custo total de processamento (registrado quando transporte chega no depósito)
- Custo total de armazenagem (registrado quando transporte chega no depósito)

Um exemplo das informações disponibilizadas sobre as estatísticas do sistema pode ser verificado na TABELA 5.3.

TABELA 5.3 – ESTATÍSTICAS DO MODELO POR UT

UT	Total vazios	Total cheios	Quantidade vazios em transporte	Quantidade cheios em transporte	Quantidade vazios em clientes	Quantidade vazios em depósitos	Quantidade cheios em depósitos	Custo total transporte	Custo total processamento	Custo total armazenagem
1	120	125	5	45	65	50	80	0,00	0,00	0,00
2	120	125	11	45	57	52	80	4,00	4,20	4,40
3	113	132	11	46	50	52	86	12,00	12,60	13,20
4	94	151	8	71	31	55	80	9,00	6,30	6,60
5	85	160	10	41	17	58	119	108,00	78,70	83,40
6	82	163	25	83	7	50	80	0,00	0,00	0,00
7	86	159	16	72	16	54	87	43,00	27,10	28,20
8	91	154	4	55	29	58	99	128,00	63,70	66,40
9	79	166	9	75	20	50	91	83,00	23,10	24,20
10	85	160	7	77	28	50	83	42,00	6,30	6,60

5.3. Módulos

A FIGURA 5.1 apresenta um fluxograma da dinâmica do modelo de alocação e movimentação de contêineres vazios e cheios.

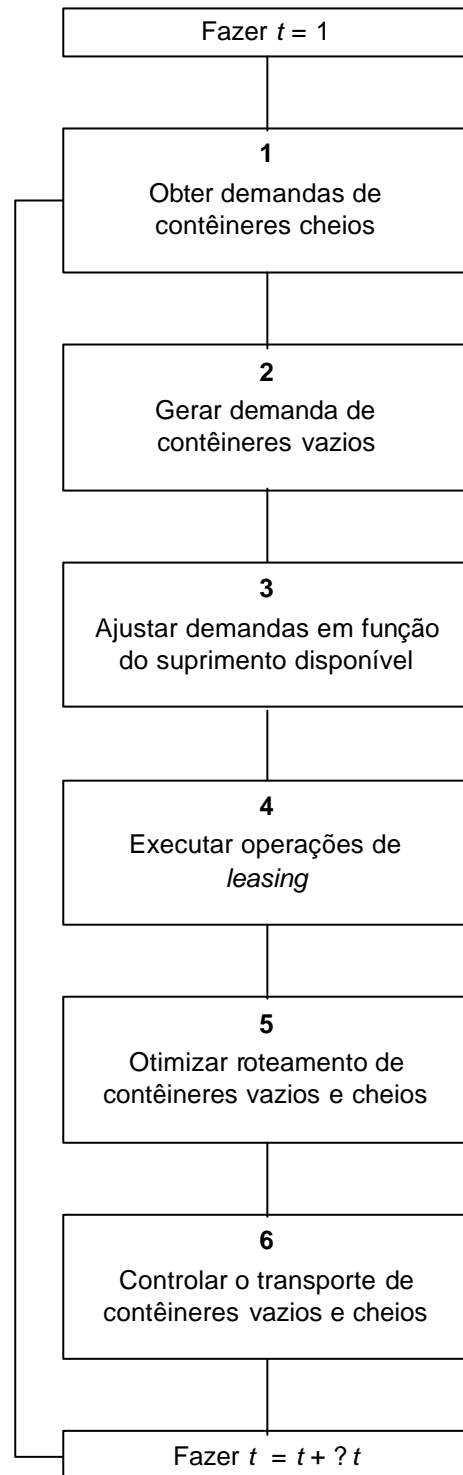


FIGURA 5.1 – FLUXOGRAMA DO MODELO DE ALOCAÇÃO E MOVIMENTAÇÃO DE CONTÊINERES

5.3.1. Descrição computacional

Nesta seção, a dinâmica do sistema é explicada através de uma breve descrição computacional dos principais módulos.

1. *Obter demandas de contêineres cheios*

Neste módulo, são verificados todos os pedidos de contêineres cheios de cada cliente para todos os outros clientes pertencentes ao modelo de execução.

2. *Gerar demandas de contêineres vazios*

Depois de computar todos os pedidos de contêineres cheios dirigidos a todos os clientes, o sistema determina a necessidade de contêineres vazios de cada cliente de suprimento, pois estes precisarão dos contêineres vazios para carregá-los posteriormente. Após verificar o saldo atual de contêineres vazios, o sistema ainda assegura que a demanda total de cada cliente preserve seu estoque mínimo preestabelecido, respeitando a expressão a seguir:

$$\begin{aligned} & \text{demanda total de contêineres vazios} \geq \text{saldo atual de contêineres vazios} \\ & \qquad \qquad \qquad - \text{estoque mínimo de contêineres vazios} \end{aligned}$$

Para determinar a necessidade ajustada de contêineres vazios de um cliente, o sistema verifica todos os contêineres vazios que estão por chegar e os contêineres cheios que devem ser recebidos em um prazo especificado pelo usuário (*look ahead*), pois esses contêineres vão tornar-se vazios após seu descarregamento. Para este trabalho, por exemplo, atribuiu-se um prazo de cinco unidades de tempo. Esses dois valores são computados na variável “*suprimento futuro de contêineres vazios e cheios*”.

Após essas verificações, se for necessário fazer um pedido, a demanda é definida de acordo com a expressão a seguir:

$$\begin{aligned} \text{demanda a gerar} = & \text{demanda total de contêineres vazios} \\ & + \text{estoque mínimo de contêineres vazios} \\ & - \text{saldo atual de contêineres vazios} \\ & - \text{suprimento futuro de contêineres vazios e cheios} \end{aligned}$$

A partir desse resultado (se maior que zero), a demanda é gerada com um percentual adicional, especificado para cada cliente. Aproveitando o momento em que uma

demanda está sendo consolidada, esse acréscimo evita a geração de pedidos muito pequenos ou muito freqüentes.

$$\text{demanda a gerar} = \text{demanda a gerar} + \text{margem pedido contêineres vazios}$$

3. Ajustar demandas em função do suprimento disponível

Conforme explicado anteriormente, é necessário equiparar a quantidade total de demandas com a quantidade total de suprimentos antes de processar o modelo de transbordo. Além disso, mesmo que não tenham sido geradas novas demandas, podem existir pendências no sistema (*backlog*). Então, para cada cliente, a cada unidade de tempo, são pesquisadas todas as demandas de contêineres cheios em que este cliente seja origem, priorizando as demandas mais antigas e com menor custo de transporte. Se a demanda não puder ser atendida completamente, será criada uma nova demanda para a unidade de tempo seguinte, com a quantidade remanescente. Quando isso acontece, a unidade de tempo em que ela foi originalmente solicitada permanece armazenada para fins de priorização.

Após resolver as demandas de contêineres cheios, que por sua vez podem ter gerado demandas de contêineres vazios, é necessário redimensionar todas as demandas de contêineres vazios do modelo. Em primeiro lugar, é preciso apurar o suprimento total de contêineres vazios do sistema. Para tanto, verifica-se a quantidade de pedidos de contêineres cheios para cada cliente, e calcula-se seu suprimento efetivo, que é a disponibilidade de contêineres vazios descontado seu estoque mínimo (de segurança) e descontadas as solicitações de contêineres cheios para este cliente (para as quais ele precisa reservar contêineres vazios).

$$\begin{aligned} \text{suprimento de contêineres vazios} &= \text{saldo atual de contêineres vazios} \\ &\quad - \text{demanda de contêineres cheios para este cliente} \\ &\quad - \text{estoque mínimo} \end{aligned}$$

Em seguida, são examinadas todas as demandas de contêineres vazios, com prioridade para demandas de maior volume, verificando o quanto desses pedidos pode ser atendido. Assim, as demandas são ajustadas em função do suprimento disponível – se o suprimento total for inferior ao total de demandas do modelo, o total de demandas deverá ser ajustado ao suprimento total.

4. Executar operações de leasing

O *leasing* é executado apenas quando necessário, e desde que sua utilização tenha sido solicitada nas opções de processamento.

- **Gerar pedidos de *leasing*** – Cria operações de *leasing* quando necessário. Procura casos de clientes cujas últimas demandas não foram atendidas (nem mesmo parcialmente), num prazo de unidades de tempo especificado na configuração do sistema. Para estes clientes, utiliza a quantidade da demanda mais recente, acrescida de uma margem pré-cadastrada, como necessidade de *leasing*. Com o total de todos os clientes, procura a companhia de menor custo, criando uma operação de *leasing* e distribuindo os contêineres entre os clientes.
- **Efetuar devoluções de *leasing*** – Verifica devoluções de operações de *leasing* que podem ser efetuadas. Inicialmente, procura operações que venceram, com prioridade para as vencidas há mais tempo e com maior saldo devedor. Para estes casos, devolve todos os contêineres vazios disponíveis nos clientes. Posteriormente, verifica operações cujo prazo mínimo de devolução já foi atingido, com prioridade para as que o prazo mínimo expirou há mais tempo e com maior saldo devedor. Para esta situação, a quantidade a devolver é calculada a partir da disponibilidade de cada cliente que excede o seu estoque mínimo, acrescida de uma margem predefinida.

5. Otimizar roteamento (transbordo) de contêineres vazios e cheios

Para cada unidade de tempo, é produzido um conjunto de dados de entrada para ser utilizado pelo software Lindo® API. Este módulo prepara a função objetivo e as restrições do modelo, a partir das demandas e dos suprimentos de contêineres vazios e cheios, de clientes para depósitos, de depósitos para depósitos, e de depósitos para clientes, considerando apenas as combinações pertinentes à unidade de tempo que está sendo processada (que tenham demanda ou suprimento).

Calcula-se o custo médio total (processamento e armazenagem) de cada depósito, por contêiner, acrescentando o custo de transporte unitário. Optou-se por computar os custos de cada trecho (transporte, processamento e armazenagem) no momento da chegada em cada destino. Portanto, trechos que partem de um cliente de origem até um depósito só possuem custo de transporte. O custo total de cada trecho dá origem aos coeficientes da função objetivo.

Para compor as restrições, são observados os limites de demandas (mínimo) e de suprimento (máximo). Então, é feito o balanceamento de contêineres vazios e cheios para cada depósitos, pois suas entradas e saídas devem ser iguais.

O software Lindo® API recebe os dados de entrada (uma representação de uma matriz esparsa) em uma estrutura muito específica e de difícil interpretação. Para lidar com esse problema, o sistema cria um nível de abstração utilizando uma estrutura de dados de compreensão mais simples, encarregando-se da tradução entre essas duas formas de representação.

Após a resolução do problema de minimização de custo pelo Lindo®, o sistema transforma a solução em um roteiro de transporte. Nesta etapa, as variáveis da função objetivo são examinadas e, para cada uma delas que possui valor, é criado um segmento de transporte (trecho entre cliente e depósito ou entre depósitos), que em conjunto compõem todas as movimentações produzidas pelas demandas da unidade de tempo atual.

O sistema pode gerar ainda os seguintes arquivos para análises: um arquivo que pode ser utilizado para resolução no Lindo® API (ANEXO 1), um arquivo texto com uma representação do modelo no formato típico de um modelo de transbordo (ANEXO 2). No ANEXO 3, encontra-se um exemplo do resultado gerado pelo software Lindo® API.

6. Controlar o transporte de contêineres vazios e cheios

Os trechos de transporte possuem grande interdependência, já que o início da movimentação de um trecho depende, entre outros fatores, da conclusão dos trechos que o precedem. O seu gerenciamento é feito por um conjunto de funções específicas:

- **Processar trechos iniciais** – Inicia transporte de trechos com saída em clientes. Procura trechos com origem em cliente que não foram iniciados, atualizando a quantidade disponível de contêineres vazios em cada cliente. Calcula a data de início de transporte do trecho e a chegada no destino, lembrando que para contêineres cheios é incluído o tempo de carga e para vazios, não.
- **Processar trechos com chegada em depósito** – Procura trechos com destino em depósitos que chegam na unidade de tempo atual ou anterior, com prioridade para os mais antigos. Se a capacidade do depósito permite, prepara a entrada dos contêineres, atualizando o estoque do depósito e os custos. Se excedeu o limite, o trecho não é processado nesta unidade de tempo e fica aguardando disponibilidade.
- **Processar trechos com saída de depósito** – Procura trechos que chegaram em depósitos e estão disponíveis para continuar o transporte, liberando os trechos

correspondentes para saída do depósito. Os contêineres de uma demanda podem chegar a um depósito em um ou mais grupos (vindos de mais uma origem) e também sair deste depósito em um ou mais grupos (para destinos diferentes), mesmo pertencendo a um único pedido de um determinado cliente. Para que todas estas possibilidades sejam tratadas adequadamente, esta função inclui algoritmos relativamente complexos. Os trechos de entrada que estão disponíveis são agrupados, com prioridade para os mais antigos e para os de contêineres cheios, e as quantidades totais determinam quais trechos de saída podem ser iniciados, com prioridade para os de menor tempo de transporte.

- **Processar trechos finais** – Processa trechos que chegaram aos clientes finais. Procura trechos, com destino em cliente, que chegaram na unidade de tempo atual – atualiza quantidade disponível de vazios (a entrada de contêineres cheios também é transformada em vazios). Além disso, as demandas referentes a estes trechos são atualizadas para refletir as quantidades entregues nesta unidade de tempo (parcial ou totalmente).

5.3.2. Registro de execução

O sistema mantém um arquivo de registro (*log*) com os resultados de cada execução (TABELA 5.4). Com estes dados é possível acompanhar os passos desenvolvidos pelo sistema e comparar os efeitos de diferentes parâmetros.

TABELA 5.4 – EXEMPLO DE REGISTRO DE UMA EXECUÇÃO DO MODELO

IDExecucao	Mensagem	Unidade Tempo	Nível Severidade	Código Mensagem	Mensagem
21/12/2004 19:04:15	556	1	1	1	Iniciando processamento da unidade de tempo 1
21/12/2004 19:04:15	557	1	1	3	Gerada demanda de cheios por comando para o cliente 3. Qtd: 5
21/12/2004 19:04:15	558	1	1	4	Gerada demanda de vazios para o cliente 3. Qtd: 4
21/12/2004 19:04:15	559	1	1	9	Valor da função objetivo na unidade de tempo 1: 313 Modelo feasible: Sim
21/12/2004 19:04:15	560	1	1	5	Contêineres com trechos iniciando transporte (vazios/cheios): 4 / 36
21/12/2004 19:04:15	561	1	1	6	Contêineres com trechos finalizando transporte (vazios/cheios): 0 / 0
21/12/2004 19:04:15	562	2	1	1	Iniciando processamento da unidade de tempo 2
21/12/2004 19:04:15	563	2	1	4	Gerada demanda de vazios para o cliente 2. Qtd: 12
21/12/2004 19:04:15	564	2	1	9	Valor da função objetivo na unidade de tempo 2: 242 Modelo feasible: Sim
21/12/2004 19:04:15	565	2	1	5	Contêineres com trechos iniciando transporte (vazios/cheios): 12 / 18
21/12/2004 19:04:15	566	2	1	6	Contêineres com trechos finalizando transporte (vazios/cheios): 0 / 0
21/12/2004 19:04:15	567	3	1	1	Iniciando processamento da unidade de tempo 3
21/12/2004 19:04:15	568	3	1	4	Gerada demanda de vazios para o cliente 2. Qtd: 8
21/12/2004 19:04:15	569	3	1	9	Valor da função objetivo na unidade de tempo 3: 73,4 Modelo feasible: Sim

5.3.3. Processamento do modelo

Antes de processar o modelo, as seguintes opções devem ser definidas:

- quantidade de unidades de tempo a processar (o processamento ocorre a partir da unidade de tempo 1);
- base de dados a ser processada (é possível manter várias bases de dados com configurações distintas, e assim comparar execuções com diferentes parâmetros);
- valor inicial para geração de números aleatórios (permite reproduzir os resultados mantendo-se o mesmo valor, mais detalhes na SEÇÃO 5.6 – EXECUÇÃO DO MODELO (SIMULAÇÃO));
- geração ou não dos arquivos no formato do software Lindo®, de entrada e de saída, para cada unidade de tempo (para análise e conferência);
- geração ou não de mensagens no *log* do sistema;
- processamento até conclusão de pendências – sem gerar novas demandas, continua o processamento além da unidade de tempo final, até que todas as demandas pendentes seja atendidas, finalizando todos os trechos de transportes roteados;
- utilização ou não de *leasing*.

A FIGURA 5.2 ilustra a forma como são informadas as opções de processamento do modelo.

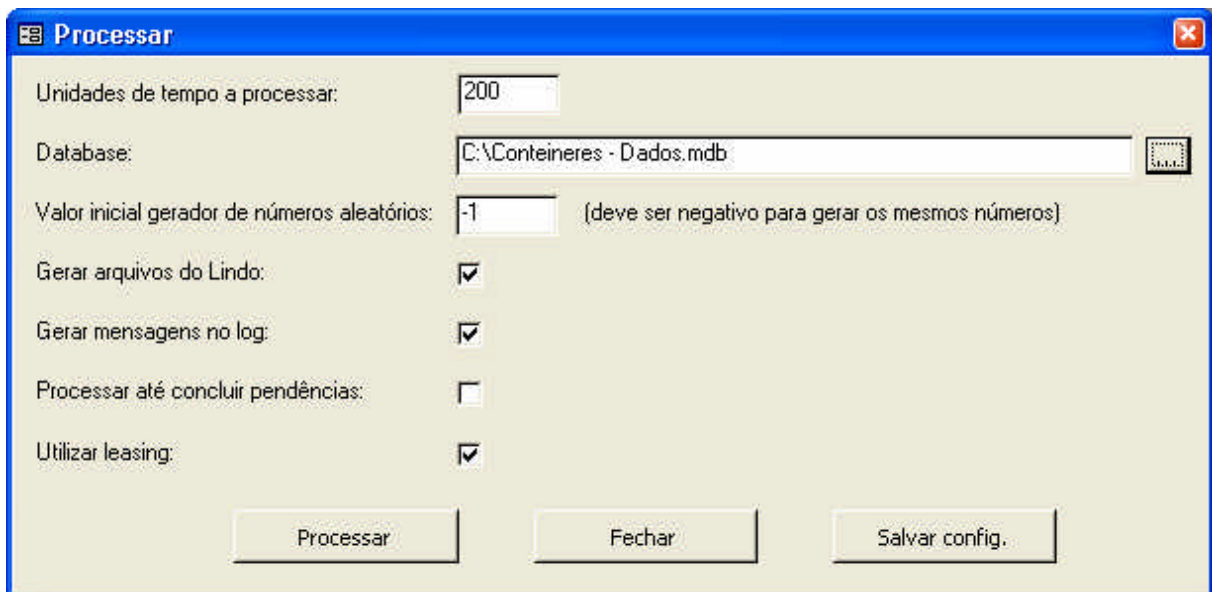


FIGURA 5.2 – OPÇÕES DE PROCESSAMENTO

Durante o processamento é possível verificar uma estimativa do tempo de execução e, ao final, o tempo total é apresentado.

5.4. Gráficos

O sistema possibilita a visualização do resultado do processamento através de gráficos, que podem ser solicitados a partir da tela apresentada na FIGURA 5.3.

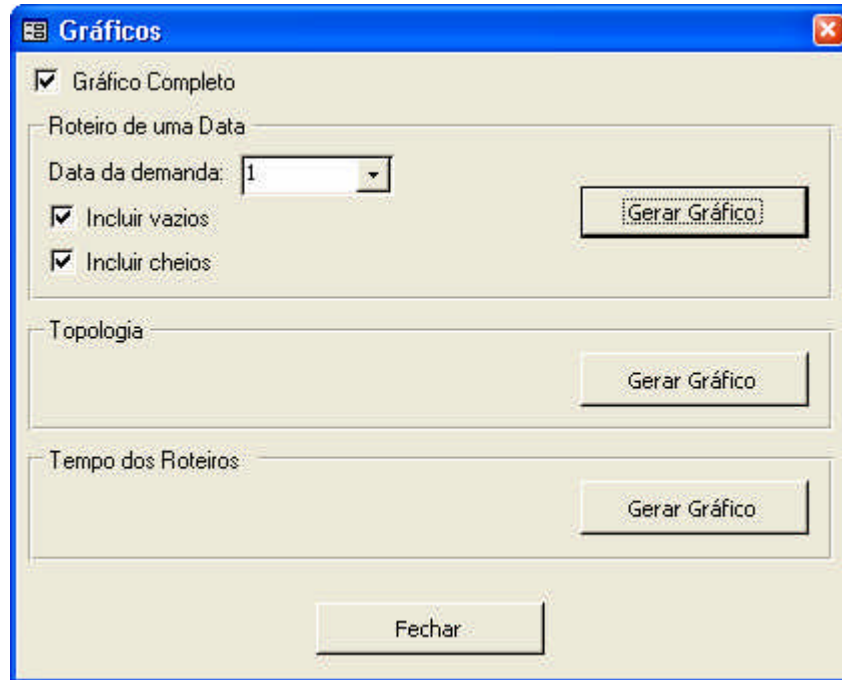


FIGURA 5.3 – TELA DE SOLICITAÇÃO DE GRÁFICOS

1. *Gráfico de roteiro de uma data*

Pode ser solicitado para todas as unidades de tempo em que houve demandas atendidas. É oferecida a opção de visualizar apenas os contêineres vazios, apenas os cheios ou os dois tipos. Uma ilustração desse gráfico pode ser conferida na FIGURA 5.4.

Nesta figura, são representadas as movimentações entre os clientes de origem e de destino que foram efetuadas em função das demandas da unidade de tempo solicitada. Também podem ser identificados os depósitos pelos quais os contêineres estão sendo transportados.

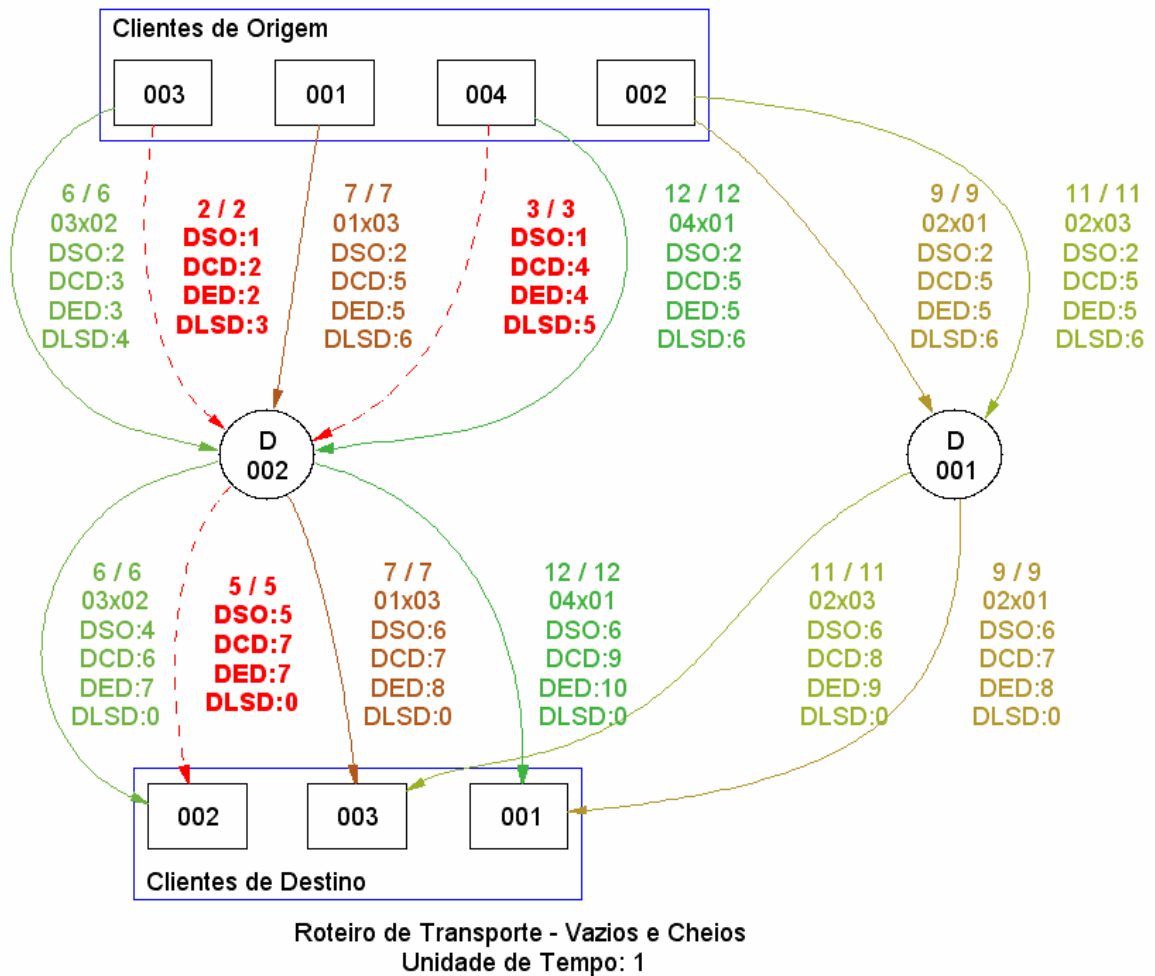


FIGURA 5.4 – ROTEIRO DE TRANSPORTE PARA UMA DATA

Legenda:

Vermelho (rotas tracejadas) – transporte de contêineres vazios

Outras cores (rotas contínuas) – transporte de contêineres cheios

nn/mm nn é a quantidade de contêineres despachados; mm é a quantidade de contêineres que chegaram no destino durante o tempo de processamento.

$oo \times dd$ oo é o cliente de origem dos contêineres; dd é o cliente de destino dos contêineres. Obs.: Apenas para contêineres cheios, pois os contêineres vazios não possuem identificação de origem nem de destino durante o transporte.

DSO Data de saída da origem. Para saídas de clientes, é calculada a partir do recebimento do pedido adicionado o tempo de carga que o cliente de origem necessita para armazenar a carga nos contêineres solicitados. Para saídas de

depósitos, é a soma da unidade de tempo de chegada com o tempo de processamento e de armazenagem dos contêineres.

- DCD Data de chegada no destino. É a data de saída da origem acrescentada do tempo necessário para transporte dos contêineres.
- DED Data de entrada no destino. Corresponde à data de chegada no destino adicionada ao tempo necessário para que os contêineres sejam liberados para entrada em um depósito, quando a capacidade máxima de armazenagem está temporariamente esgotada. Para chegada em clientes, é computado o tempo de descarga.
- DLSD Data de liberação de saída do destino. Registra o momento em que os contêineres estão liberados para ser encaminhados ao próximo destino, após período de processamento e armazenagem nos depósitos. Para chegadas em clientes, este valor é desconsiderado.

2. Gráfico da topologia da rede

Outra visualização oferecida pelo sistema é da topologia da rede de transporte. Neste gráfico, apresentado na FIGURA 5.5, é possível verificar todas as ligações entre clientes de origem e de destino, com todos os pontos intermediários (depósitos em terra e depósitos em portos). Para cada ligação entre dois trechos, são apresentados os custos para transporte de contêineres vazios e cheios, o tempo mínimo e máximo de transporte entre esses pontos e a capacidade de cada depósito.

3. Gráfico de tempo dos roteiros

Esta modalidade de gráfico, cujo exemplo pode ser verificado na FIGURA 5.6, pode ser solicitada para visualização e conferência de todos os trechos de roteiros de transporte que foram gerados em um processamento. É possível escolher a data da demanda inicial e a data da demanda final; algum ou todos os clientes de origem; algum ou todos os clientes de destino; e os tipos de contêineres (cheios, vazios ou todos). Na parte inferior do gráfico, pode-se acompanhar a linha de tempo (em unidades de tempo).

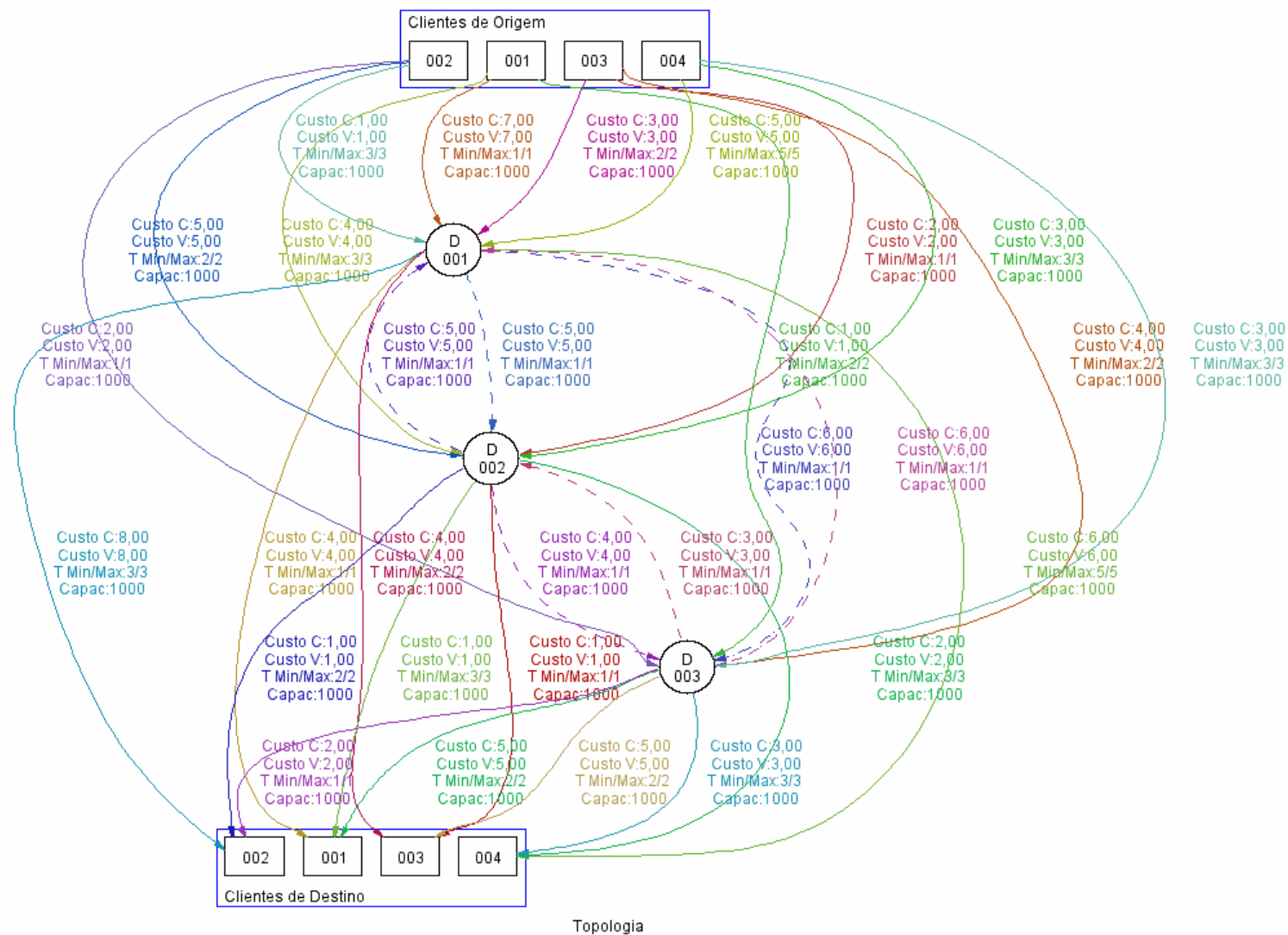


FIGURA 5.5 – TOPOLOGIA DA REDE DE TRANSPORTE ENTRE CLIENTES E DEPÓSITOS

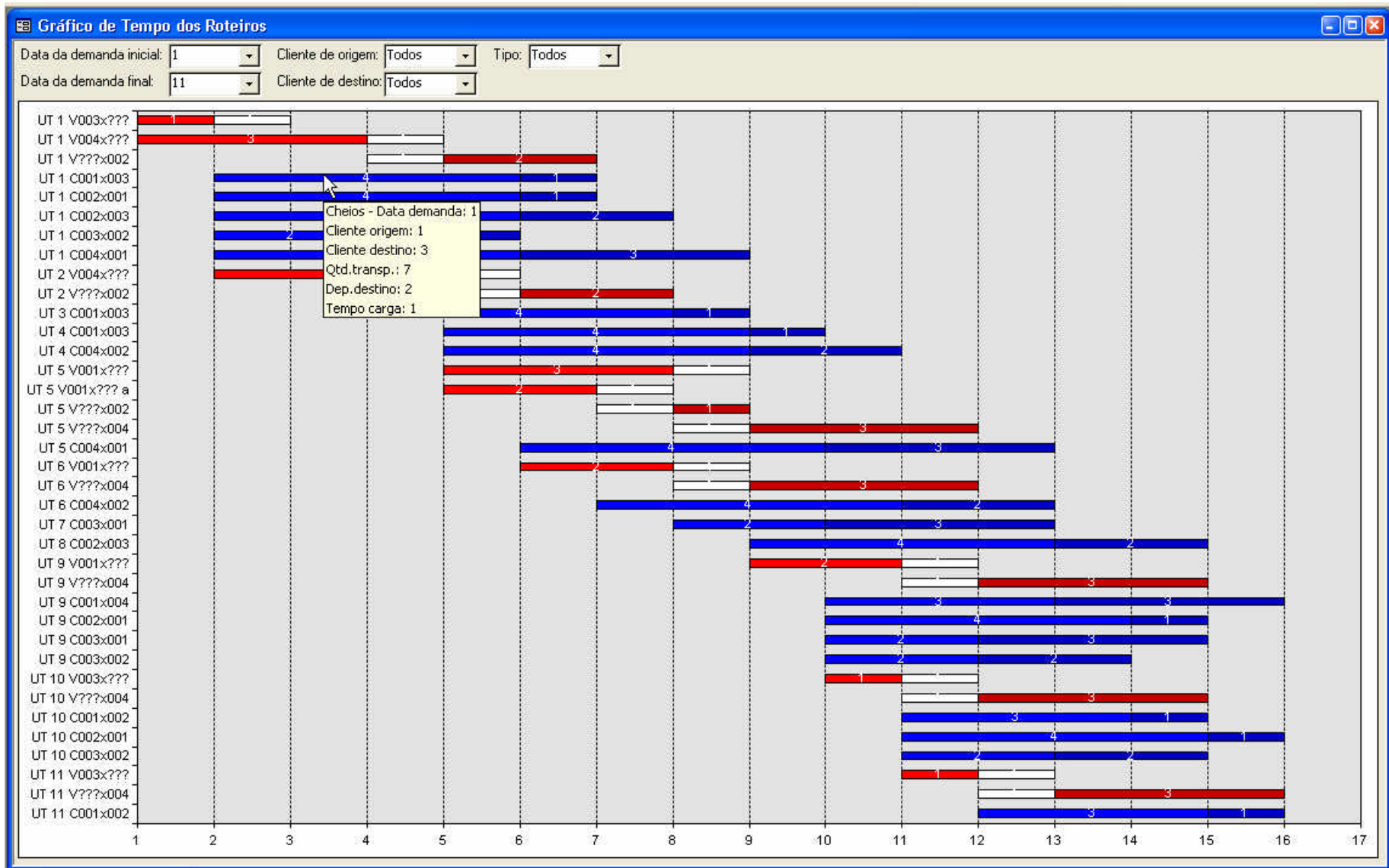


FIGURA 5.6 – GRÁFICO DE TEMPO DOS ROTEIROS

Os trechos que transportam contêineres cheios são apresentados na cor azul (clara, de cliente para depósito; escura, de depósito para cliente). É possível selecionar um trecho e obter informações mais detalhadas a seu respeito: data de demanda, cliente de origem, cliente de destino, quantidade de contêineres transportados, depósito intermediário, tempo de carga e tempo de descarga, conforme demonstrado na FIGURA 5.6.

Os trechos que transportam contêineres vazios são mostrados na cor vermelha (clara, de cliente para depósito; escura, de depósito para cliente). Para estes trechos, a informações detalhadas incluem: data de demanda, cliente de origem e depósito de destino (para trechos com origem em clientes) ou cliente de destino e depósito de origem (para trechos que chegam em clientes), quantidade transportada. Cabe lembrar que os contêineres vazios não possuem origem e destino predeterminados, sendo redistribuídos nos depósitos conforme o suprimento disponível e a demanda necessária. No exemplo a seguir (FIGURA 5.7), três contêineres saíram do cliente nº 4 e dois do cliente nº 3, através do depósito nº 2. No cliente de destino nº 2, chegaram cinco contêineres vazios oriundos do depósito nº 2.

Vazios - Data demanda: 1 Cliente origem: 4 Cliente destino: ? Qtd.transp.: 3 Dep.destino: 2	Vazios - Data demanda: 1 Cliente origem: 3 Cliente destino: ? Qtd.transp.: 2 Dep.destino: 2	Vazios - Data demanda: 1 Cliente origem: ? Cliente destino: 2 Qtd.transp.: 5 Dep.origem: 2
---	---	--

FIGURA 5.7 – INFORMAÇÕES DE TRECHOS DE TRANSPORTE DE CONTÊINERES VAZIOS

A coluna à esquerda, relativa a cada roteiro, apresenta a seguinte convenção:

UT d Tnnn x mmm

onde

d = UT da demanda

T = tipo de contêiner (C = cheio; V = vazio)

nnn = código do cliente de origem

mmm = código do cliente de destino

Obs.: Para contêineres vazios, é apresentado ou o cliente de origem ou o cliente de destino, uma vez que os contêineres são redistribuídos conforme as necessidades em cada

depósitos. Por isso, para vazios aparecem três pontos de interrogação (V???) ou na origem ou no destino, conforme o caso.

5.5. Customizações (flexibilidade do modelo)

O modelo de alocação e movimentação de contêineres vazios e cheios objeto desta tese foi desenvolvido de maneira a permitir o maior número possível de parâmetros, facilitando, desta forma, a execução de testes para análise da sensibilidade dos seus diferentes componentes. Alterações em um ou mais desses parâmetros afetam a dinâmica de todo o sistema.

São atributos parametrizáveis:

- tempo de carregamento e descarregamento de contêineres em clientes;
- estoque mínimo (de segurança, de reserva) de contêineres vazios em clientes;
- margem (percentual) a adicionar a pedidos de contêineres vazios (por cliente);
- tempo médio de processamento de um contêiner em um depósito em terra ou em um porto;
- tempo médio de armazenagem de um contêiner em um depósito em terra ou em um porto;
- capacidade total, dos depósitos, para contêineres vazios e cheios somados;
- tempo médio de transporte de contêineres entre clientes e depósitos, e entre depósitos;
- prazo mínimo para devolução de contêineres arrendados;
- prazo de vencimento de operações de *leasing*.

Outros atributos atuam como variáveis de estado iniciais, causando pouca influência no transcorrer do processamento do sistema, sendo percebidos apenas nos primeiros estágios da execução:

- estoque inicial de contêineres vazios nos clientes;
- estoque inicial de contêineres disponíveis para arrendamento, nas companhias de *leasing*.

Existem outros parâmetros que acarretam modificação no comportamento do sistema, sendo customizáveis para todas as entidades envolvidas no modelo:

- prazo, em unidades de tempo, para verificação de recebimentos futuros (*look ahead*) de contêineres cheios para um determinado cliente, antes que este faça um pedido de contêineres vazios;
- opção de utilização ou não de *leasing*;

- número de unidades de tempo com demanda de contêineres vazios não atendida, nem mesmo parcialmente, antes de fazer utilização de *leasing*;
- no pedido de *leasing*, percentual a adicionar à necessidade de contêineres vazios de cada cliente (margem de reserva);
- na devolução de *leasing*, percentual a adicionar ao estoque mínimo de cada cliente para determinar a quantidade a devolver.

5.6. Execução do modelo (simulação)

Para uma primeira verificação do modelo, foram cadastrados manualmente valores para todos os atributos necessários ao funcionamento do sistema. Todos os testes foram realizados a partir de valores realistas, embora não representem necessariamente dados de alguma empresa específica. Em uma primeira fase, foram efetuados vários testes com demandas e suprimentos fixos, visando a reprodução de uma resposta conhecida.

Após essa primeira fase, foi necessário verificar o comportamento do modelo para um horizonte de planejamento extenso, observando se havia gargalos ou problemas na execução do sistema. Com a evolução do tempo, também foi possível examinar se o modelo tenderia ou não se equilibrar na resolução das demandas. Cabe ressaltar que o modelo recebe novas demandas a cada unidade de tempo, simultaneamente com o processamento e o transporte de demandas de datas anteriores. Nesse momento, a resolução dos roteiros foi acompanhada caso a caso para conferência.

O sistema foi desenvolvido de forma incremental, agregando complexidade gradualmente. Até um determinado momento, por exemplo, não havia sido implementada a possibilidade de *leasing*. O fato relevante é que o sistema começou a apresentar gargalos: alguns clientes terminavam a movimentação com muita defasagem entre a data do pedido e a data do atendimento da demanda de contêineres cheios, e com grande volume de pedidos de contêineres vazios. Após a incorporação do *leasing*, esses problemas foram resolvidos e o tempo de processamento diminuiu bastante, desobstruindo os pontos críticos do sistema.

Para efeitos de testes, e para que o sistema operasse em condições mais complexas, com maior volume de dados, foi implementada a possibilidade de geração de demandas de contêineres cheios de forma aleatória. Para cada par de clientes (de suprimento e de demanda) foram cadastradas:

- a probabilidade de o cliente de destino gerar demanda de contêineres cheios, a cada unidade de tempo, para o cliente de origem
- quantidade mínima e máxima de contêineres cheios, em unidades, que o cliente demanda

A cada unidade de tempo, uma função, baseada na probabilidade de cada par de clientes, verifica se haverá uma demanda naquela data. Em caso positivo, a quantidade de contêineres da demanda é gerada aleatoriamente entre as quantidades mínima e máxima informadas (distribuição uniforme).

Também foram implementados como variáveis aleatórias:

- tempo necessário para colocar carga em um contêiner e tempo necessário para retirar carga de um contêiner, nos clientes (e conseqüente devolução dos contêineres ao sistema) – cadastrados um valor mínimo e máximo para cada cliente
- tempo mínimo e máximo necessário para processar um contêiner em um depósito
- tempo mínimo e máximo, em unidades de tempo, que um contêiner fica armazenado em um depósito
- tempo mínimo e máximo necessário para transportar contêineres entre dois depósitos, ou entre clientes e depósitos

Ressalte-se que a aleatoriedade é aqui utilizada apenas para a geração das demandas nas diversas unidades de tempo, como instância de teste do sistema. A partir disso, o sistema é resolvido (satisfação das demandas, elaboração de roteiros etc.) de forma determinística. Por outro lado, em situações de utilização comercial do sistema, a opção de geração de demandas aleatórias pode ser útil para garantir condições mais realistas de modelagem. Neste caso, haverá necessidade de análise de dados históricos para assegurar validade às suposições quanto às distribuições de probabilidade.

Outra configuração possível do modelo é trabalhar com demandas fixas (conhecidas) e tempos aleatórios para previsões de transporte, armazenagem, processamento, tempo de carga e tempo de descarga, ou combinações destes.

Processamento de comandos

É possível, através da inclusão de comandos, simular determinadas situações para análises e testes. Cada comando é associado a uma unidade de tempo e suas alterações serão efetivadas nesta data. Por exemplo, um tipo de comando cria uma demanda de contêineres cheios com valores predeterminados (quantidade, cliente de origem, cliente de destino). Outra opção de comando permite alterar a probabilidade de geração de demanda de contêineres cheios entre dois clientes quaisquer, incluindo a possibilidade de interromper a geração de demanda (0) ou deixá-la constante (1). Com a utilização desse recurso podem ser feitas, por exemplo, análises de sazonalidade. O sistema permite a implementação de novos comandos, à medida que forem necessários.

6. Resultados computacionais

Após o modelo de simulação ter sido implementado computacionalmente, executado e amplamente testado, foram produzidas diversas ilustrações do comportamento do sistema, avaliando seu desempenho, sua estabilidade e a flexibilidade das informações. Os dados de entrada foram gerados aleatoriamente (baseados em parâmetros prefixados), avaliando diferentes políticas e combinações variadas de quantidades de clientes e de depósitos, demandas, suprimentos, estoques iniciais, tempos de transporte, de armazenagem e de processamento. Este capítulo está organizado de forma a apresentar alguns resultados que o modelo é capaz de fornecer. Na SEÇÃO 6.1 foi avaliada a viabilidade de processamento do modelo em uma série de execuções comparativas. A SEÇÃO 6.2 mostra a influência do *leasing* no tempo de processamento, como exemplo da flexibilidade do sistema. A SEÇÃO 6.3 traz alguns exemplos de utilização do modelo em diferentes situações, apresentando também resultados gráficos representativos da estabilidade da solução.

6.1. Desempenho do modelo

Com o objetivo de avaliar a viabilidade de processamento do modelo, foram feitas várias execuções comparativas, com opção de utilização de *leasing*, para um horizonte de planejamento de 100 unidades de tempo e quantidades crescentes de clientes de demanda e de suprimento, mantendo fixa a quantidade de depósitos em terra (três) e portos (três). O computador utilizado foi um Pentium 4 de 2,2 GHz, com 512 MB de memória. Os resultados podem ser vistos na TABELA 6.1.

Uma análise da tabela permite a elaboração das seguintes observações:

- tempo de processamento – quase instantâneo para dois clientes até cerca de 40 minutos para o caso de 20 clientes. Levando-se em conta a quantidade de relacionamentos possíveis no caso de 20 clientes, o tempo de resolução pode ser considerado apropriado;
- número máximo de variáveis e de restrições – a quantidade de variáveis e restrições aumenta significativamente a cada inclusão de cliente, como se pode deduzir a partir das equações (32) e (33);
- custo total de transporte, armazenagem e processamento – esse valor sofre um grande incremento devido ao maior número de interações;

TABELA 6.1 – EXECUÇÕES COMPARATIVAS PARA 100 UNIDADES DE TEMPO

Número de clientes	Tempo de execução	Número máximo de variáveis	Número máximo de restrições	Custo total (1)	Demora média na entrega (2)	Diferença média atendimento/solicitação (3)	Ociosidade (4)
2	00:00:12	90	17	626,40	12,0	0,0	0,9
3	00:00:26	138	26	2.359,00	11,9	0,0	0,7
4	00:00:38	225	42	4.378,00	12,2	0,0	0,7
5	00:00:59	347	65	6.202,10	12,2	0,2	0,6
6	00:01:39	434	80	11.141,00	13,8	0,9	0,4
7	00:01:58	512	94	14.655,80	12,2	0,4	0,4
8	00:02:53	643	119	19.217,00	12,9	0,6	0,3
9	00:03:56	772	142	25.702,20	13,8	1,1	0,2
10	00:05:08	1139	206	30.895,80	13,4	0,8	0,2
11	00:06:34	1219	220	38.681,40	13,3	0,8	0,2
12	00:08:20	1426	260	44.212,10	14,1	1,2	0,2
13	00:10:23	1584	289	54.148,20	14,2	1,2	0,2
14	00:12:52	2051	370	60.319,80	13,8	1,0	0,2
15	00:15:57	2120	383	69.678,80	14,0	1,1	0,2
16	00:21:13	2851	508	84.081,80	14,0	1,2	0,1
17	00:25:56	4369	776	95.484,90	14,1	1,4	0,1
18	00:31:40	4559	810	107.191,90	14,2	1,3	0,1
19	00:35:45	4333	772	121.359,00	14,3	1,5	0,1
20	00:40:19	5142	911	129.872,10	14,5	1,5	0,1

(1) custo de transporte entre trechos: média 3,71; desvio padrão 2,22;

custo de armazenagem: média 2,08; desvio padrão 0,75;

custo de processamento: média 2,50; desvio padrão 1,12

(2) tempo de transporte entre trechos: média 3,6; desvio padrão 1,3

(3) geração de demanda de contêineres cheios:

probabilidade de geração por unidade de tempo: média 0,2; desvio padrão 0,05;

demanda mínima: média 2,7; desvio padrão 1,4;

demanda máxima: média 6,0; desvio padrão: 1,6

(4) ociosidade = [total de contêineres vazios] / [total de contêineres]

- demora média na entrega (média das diferenças entre as datas de recebimento e as datas de solicitação) – no exemplo, a demora média passou de 12 unidades de tempo, com dois clientes, para 14,5 unidades de tempo, com 20 clientes. O incremento de clientes aumentou em pequena proporção o tempo de espera dos pedidos;
- diferença média atendimento/solicitação (média das diferenças entre contêineres solicitados e quantidades atendidas) – a diferença permaneceu em zero, até quatro clientes, sendo de 1,5 quando havia 20 clientes. De modo geral, os pedidos estão sendo atendidos nas quantidades pretendidas, restando poucas pendências para as unidades de tempo posteriores;
- ociosidade (neste caso, relação entre o total de contêineres vazios e o total de contêineres do modelo) – pode-se verificar como a razão decresce conforme a quantidade de clientes aumenta, passando de 0,9 (com dois clientes) para 0,1 (com 20 clientes). Como esperado, um maior número de clientes faz com que os

contêineres não fiquem vazios por muito tempo, diminuindo a ociosidade do sistema.

Embora o modelo apresente uma complexidade $O(n^4)$ – ver EQUAÇÃO (32) – a TABELA 6.1 permite demonstrar que o sistema possui eficiência em casos práticos, dada a complexidade da rede envolvida. É provável que um especialista na área demandasse um prazo maior para obter soluções inferiores em termos de desempenho.

Os valores relativos à quantidade de clientes foram correlacionados com o tempo de execução (FIGURA 6.1) e com o custo total (FIGURA 6.2):

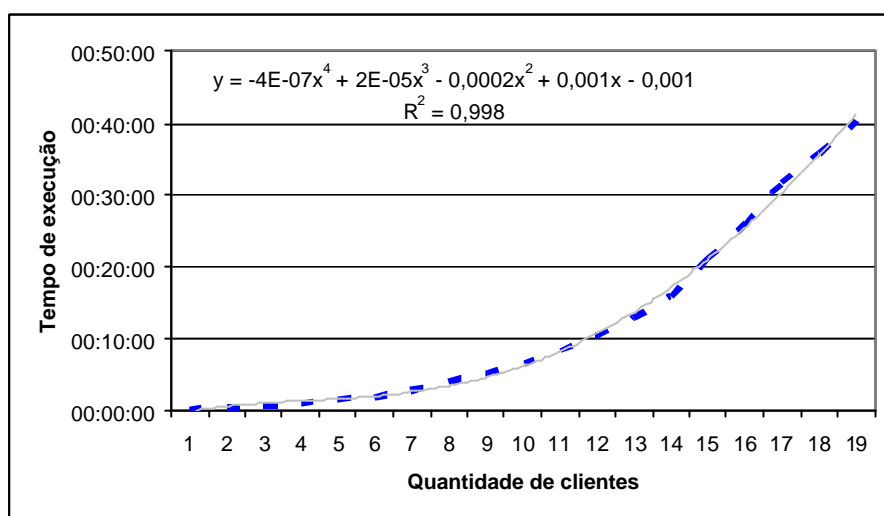


FIGURA 6.1 – TEMPO DE EXECUÇÃO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE CLIENTES

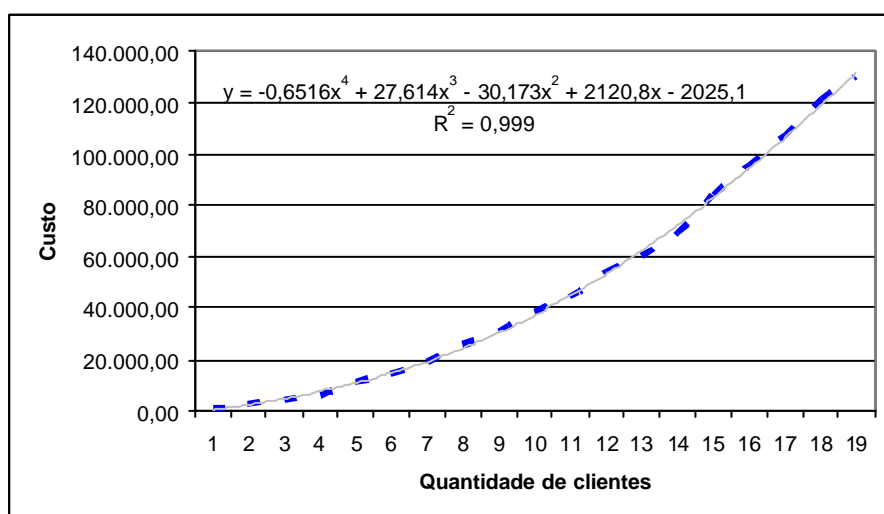


FIGURA 6.2 – CUSTO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE CLIENTES

Os resultados apresentados nas figuras FIGURA 6.1 ($R^2=0,998$) e FIGURA 6.2 ($R^2=0,999$) ilustram a complexidade $O(n^4)$ do modelo desenvolvido, assumindo-se que a magnitude de S e W não são muito diferentes.

Esse exemplo foi utilizado também para ilustrar a flexibilidade do modelo, relacionando algumas variáveis com o incremento da quantidade de clientes. Várias outras possibilidades de análise podem ser obtidas, dependendo do aspecto que o usuário esteja interessado em avaliar.

6.2. Resultados adicionais – influência do *leasing*

Para ilustrar os efeitos da utilização do *leasing* no comportamento dinâmico do sistema, foi utilizado um modelo de testes com quatro clientes (tanto de demanda como de suprimento), um porto e dois depósitos em terra, processando 200 unidades de tempo. Os tempos de carga e descarga nos clientes foram fixados em uma unidade de tempo; o tempo de armazenagem nos depósitos foi fixado em uma unidade de tempo e o tempo de processamento nos depósitos não foi computado neste exemplo. A média dos tempos de transporte entre clientes e depósitos é 2,33, com desvio padrão 1,13.

A TABELA 6.2 apresenta as operações de *leasing* realizadas durante a resolução do modelo.

O modelo resolvido sem opção de recurso do *leasing* levou 19 minutos e 42 segundos para ser processado e produziu 22.522 demandas, enquanto que o mesmo modelo explorando a possibilidade de *leasing* terminou seu processamento em 2 minutos e 31 segundos, gerando 3.982 demandas (e 22 operações de *leasing*). Nota-se, desta forma, a diferença que a possibilidade de utilização do *leasing* causa ao sistema, desobstruindo as pendências de demandas de contêineres vazios não atendidas.

Com esse exemplo, pode-se perceber que as opções de análise que o sistema oferece dependem primordialmente do enfoque que o usuário queira explorar com mais detalhe.

TABELA 6.2 – REGISTRO DE OPERAÇÕES DE LEASING

Operação leasing	Companhia leasing	UT pedido	UT mínima devolução	UT vencimento	Quantidade arrendada	Quantidade devolvida	Operação encerrada	UT encerramento
1	1	15	25	35	57	57	Sim	30
2	1	19	29	39	23	23	Sim	30
3	1	36	46	56	80	80	Sim	51
4	1	53	63	73	42	42	Sim	64
5	1	57	67	77	69	69	Sim	71
6	1	64	74	84	14	14	Sim	75
7	1	65	75	85	34	34	Sim	76
8	1	76	86	96	57	57	Sim	86
9	1	77	87	97	143	143	Sim	91
10	2	77	97	107	65	65	Sim	101
11	1	97	107	117	30	30	Sim	110
12	1	105	115	125	89	89	Sim	122
13	1	114	124	134	4	4	Sim	124
14	1	123	133	143	196	196	Sim	138
15	2	123	143	153	94	94	Sim	147
16	1	158	168	178	200	200	Sim	169
17	2	158	178	188	42	42	Sim	178
18	2	159	179	189	15	15	Sim	179
19	2	160	180	190	221	221	Sim	186
20	1	192	202	212	153	0	Não	0
21	1	193	203	213	2	0	Não	0
22	1	194	204	214	3	0	Não	0

6.3. Exemplo ilustrativo de utilização do sistema

Para demonstrar a utilização do sistema foi criada uma instância do modelo com cinco clientes de demanda, cinco clientes de suprimento e cinco depósitos (em terra ou em portos). Este problema foi resolvido em 12 segundos, em um computador Pentium 4 de 2,2 GHz, com 512 MB de memória. Na unidade de tempo (UT) 1, o sistema continha 435 variáveis e 93 restrições. Considerando as demandas; os estoques iniciais; tempos de transporte, carga, descarga e armazenagem; custos de transporte, processamento e armazenagem estipulados, o sistema resolveu todas as pendências em 16 unidades de tempo.

Neste exemplo, o cliente 1 possui estoque inicial de 40 contêineres vazios, o cliente 2, 20 contêineres, os clientes 3, 4 e 5 possuem 10, 45 e 5 contêineres, respectivamente. Todos os clientes podem fazer solicitações de contêineres cheios a qualquer outro cliente (FIGURA 6.3), e os contêineres vazios são realocados conforme necessário. No exemplo, as quantias de contêineres cheios solicitadas, na unidade de tempo 1, foram:

- cliente 1 – solicitou 20 contêineres para o cliente 2, 10 para o cliente 3, 5 para o cliente 4 e 5 para o cliente 5;

- cliente 2 – solicitou 10 contêineres para o cliente 1, 15, 20 e 5 contêineres, respectivamente, para os clientes 3, 4 e 5;
- cliente 3 – solicitou 5 contêineres para os clientes 1, 2 e 4 e 15 contêineres para o cliente 5;
- cliente 4 – solicitou 10 contêineres para o cliente 2; 5 contêineres para os cliente 2 e 3, e 10 contêineres para o cliente 5;
- cliente 5 – solicitou 10 contêineres para o cliente 1 e 5, 15 e 5 contêineres para os clientes 2, 3 e 4, respectivamente.

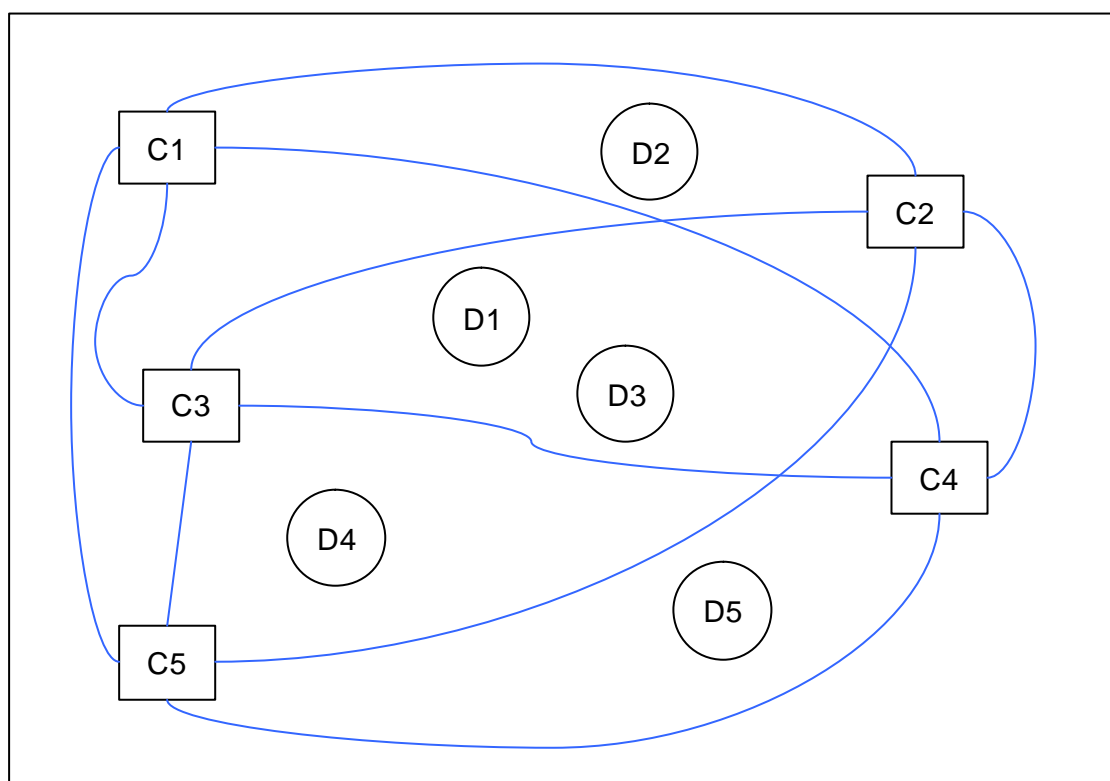


FIGURA 6.3 – ILUSTRAÇÃO COM 5 CLIENTES E 5 DEPÓSITOS EM TERRA OU EM PORTOS

A apresentação desses dados em tabelas bem como os demais dados de entrada deste problema (tempos e custos) podem ser conferidos no ANEXO 4.

Em um outro caso, a geração de demanda diária de um cliente para outro foi produzida aleatoriamente, dentro de uma faixa de valores, conforme explicado na SEÇÃO 5.6 – EXECUÇÃO DO MODELO (SIMULAÇÃO). Um exemplo das informações para 4 clientes de demanda e 4 clientes de suprimento podem ser vistos na TABELA 6.3.

TABELA 6.3 – RELACIONAMENTO ENTRE CLIENTES

Cliente de origem	Cliente de destino	Probabilidade demanda de contêineres cheios	Demanda de contêineres cheio mínima	Demanda de contêineres cheio máxima
1	2	0,3	10	30
1	3	0,2	5	10
1	4	0,1	7	14
2	1	0,3	8	20
2	3	0,2	6	16
2	4	0,1	5	12
3	1	0,1	2	4
3	2	0,2	4	10
3	4	0,1	3	6
4	1	0,4	6	16
4	2	0,2	10	30
4	3	0,1	4	10

Após o processamento de 200 unidades de tempo, para a instância do modelo com quatro clientes de demanda, quatro clientes de suprimento e três depósitos, é possível observar o comportamento dinâmico do sistema, verificando alguns parâmetros de nível de serviço que o modelo pretende suprir.

Resultados gráficos

Conforme demonstrado anteriormente, o modelo de simulação permite testar muitas combinações diferentes entre quantidades de clientes e de depósitos, variando demandas, suprimentos, estoques iniciais, tempos de transporte, de armazenagem e de processamento, fazendo com que seja possível observar o relacionamento entre vários conjuntos de variáveis. Nesta seção, são apresentados alguns resultados na forma de gráficos (séries temporais e histogramas), com a intenção de ilustrar algumas dessas diversas possibilidades.

Todos os gráficos apresentados a seguir são relativos a uma instância do modelo com quatro clientes de demanda e de suprimento, três depósitos (em terra ou em portos), e horizonte de planejamento de 200 unidades de tempo, sem utilização de *leasing*. Dados adicionais:

- custos:
 - custo de transporte entre trechos: média 3,42; desvio padrão 1,93
 - custo de armazenagem: média 2,20; desvio padrão 0,82
 - custo de processamento: média 2,10; desvio padrão 0,82
- tempo de transporte entre trechos: média 2,3; desvio padrão 1,1
- demanda de contêineres cheios:
 - probabilidade de geração por unidade de tempo: média 0,19; desvio padrão 0,10

- demanda mínima: média 5,8; desvio padrão 2,4
- demanda máxima: média 14,8; desvio padrão: 8,0

A FIGURA 6.4 mostra que a quantidade de contêineres vazios em clientes tende a um estado estacionário conforme o tempo transcorre. O mesmo fato é observado com relação à quantidade de contêineres vazios e de contêineres cheios em depósitos em terra e portos (FIGURA 6.5), demonstrando, visualmente, um certo equilíbrio no comportamento do sistema no decorrer do tempo.

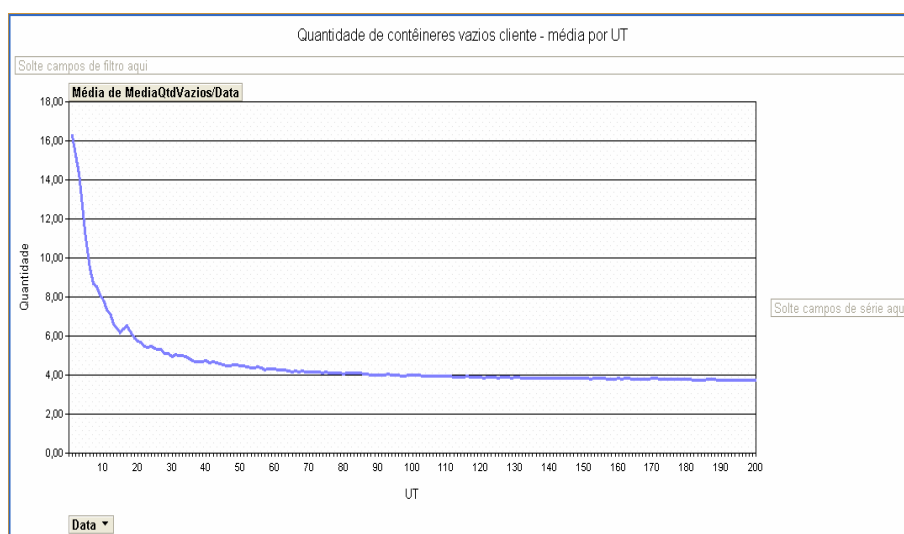


FIGURA 6.4 – QUANTIDADE MÉDIA POR UT DE CONTÊINERES VAZIOS EM CLIENTES

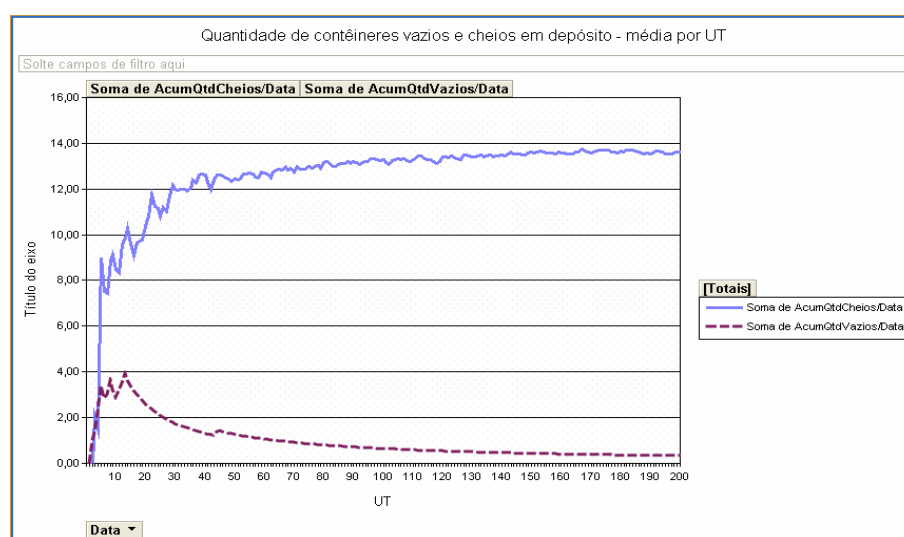


FIGURA 6.5 – QUANTIDADE MÉDIA POR UT DE CONTÊINERES VAZIOS E CHEIOS EM DEPÓSITOS

Também o custo médio, para contêineres cheios e para contêineres vazios, de transporte, armazenagem e processamento comporta-se de modo a estabilizar-se à medida que o tempo avança (FIGURA 6.6).

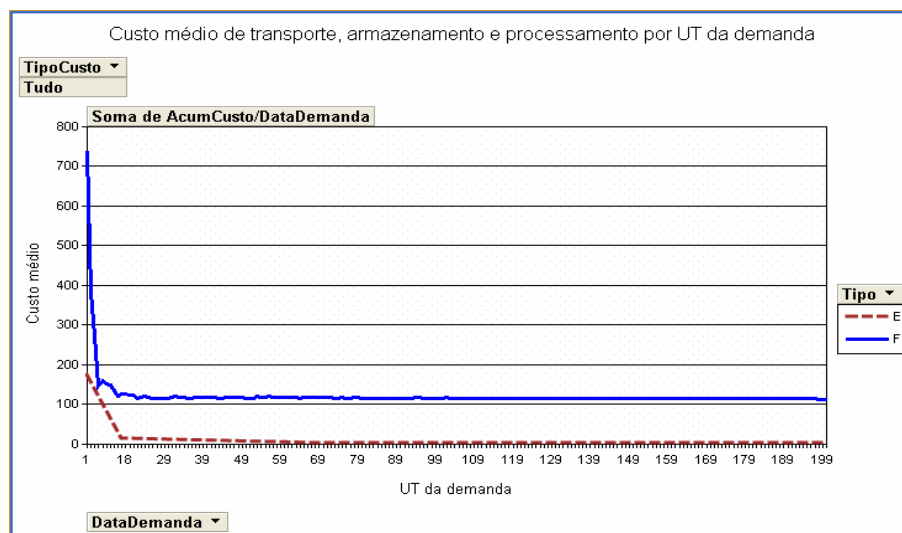


FIGURA 6.6 – CUSTO MÉDIO POR UT DE TRANSPORTE, ARMAZENAGEM E PROCESSAMENTO

Com relação à ociosidade do sistema, foram exploradas algumas relações entre contêineres vazios, contêineres cheios, contêineres em transporte e contêineres parados, verificando-se pouca flutuação no decorrer do tempo. No exemplo apresentado na FIGURA 6.7, foram ilustrados alguns desses parâmetros:

- total de contêineres vazios sobre o total geral de contêineres;
- total de contêineres vazios parados sobre total de contêineres;
- total de contêineres vazios em transporte sobre total de contêineres cheios em transporte;
- total de contêineres vazios em transporte sobre o total de contêineres em transporte; e
- total de contêineres vazios em transporte sobre o total geral de contêineres.

Todas essas relações tenderam a um equilíbrio com o desenvolvimento das unidades de tempo. Cabe ressaltar que o custo do transporte de contêineres cheios será repassado aos clientes, enquanto que o de contêineres vazios é encargo somente da companhia de navegação.

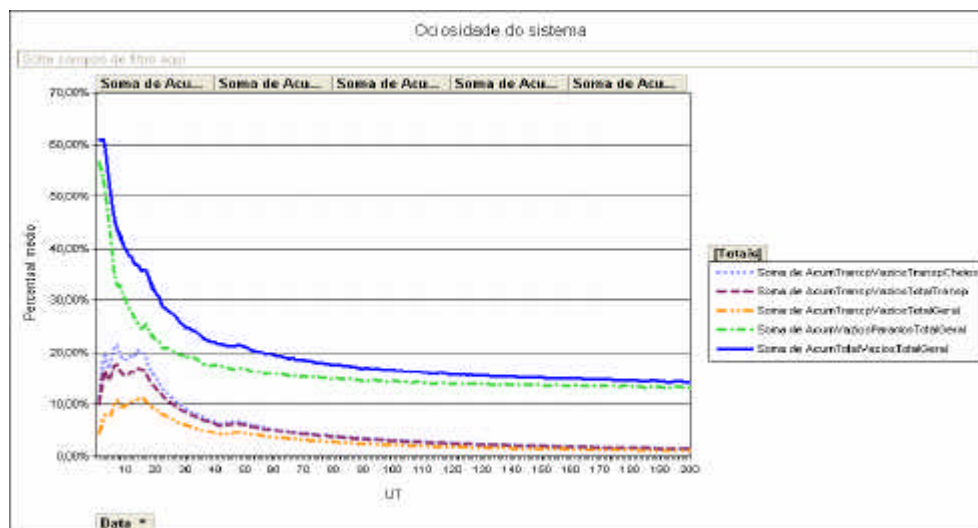
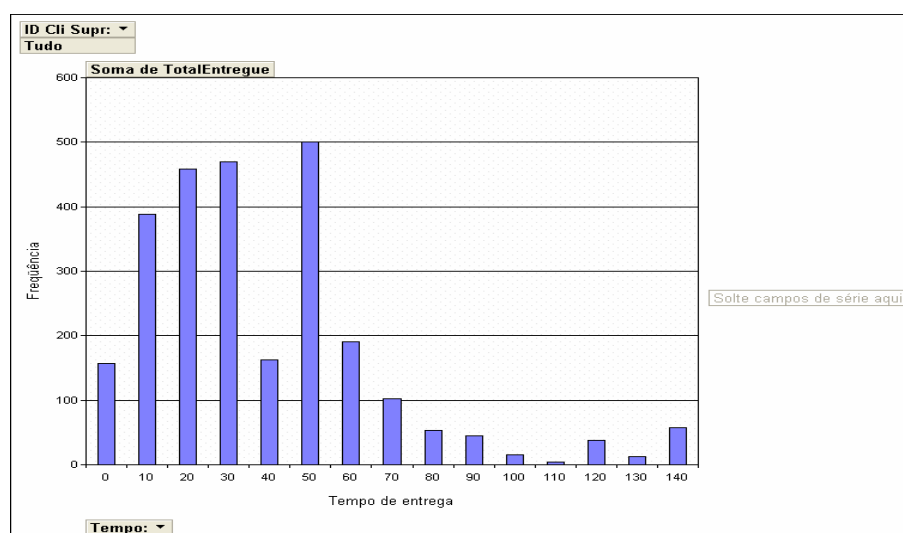


FIGURA 6.7 – OCIOSIDADE DO SISTEMA

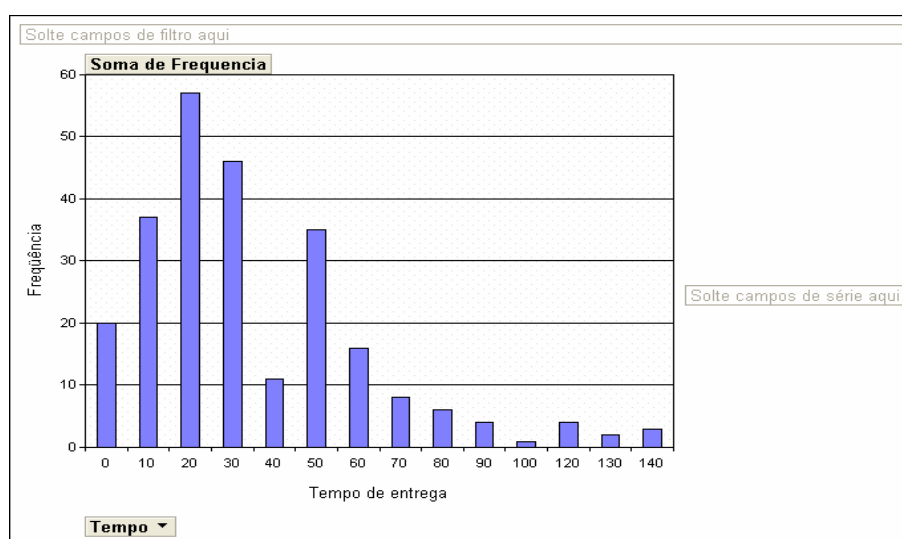
Para representar o prazo de entrega da demanda de contêineres cheios, foi calculada a diferença entre a última data de entrega de cada pedido completo, independente de entregas parciais, e a data original do pedido. As freqüências dessas diferenças foram colocadas em um histograma (FIGURA 6.8). Pode-se observar que há pouca incidência de valores altos, indicando um bom nível de serviço. (Obs.: Esse histograma somente pode ser apresentado para contêineres cheios, pois a demanda de contêineres vazios não atendida é repassada e acumulada na unidade de tempo seguinte).



média: 31,28
desvio padrão: 37,94

FIGURA 6.8 – HISTOGRAMA DOS TEMPOS DE ENTREGA DE CONTÊINERES CHEIOS

O prazo de entrega das demandas de contêineres cheios também pode ser apresentado ponderado pela quantidade de contêineres de cada encomenda. Para tanto, foi calculada a soma das diferenças entre a data da última entrega e a data da demanda original de cada entrega parcial multiplicada pela quantidade entregue; essa soma foi dividida pela quantidade total solicitada, para cada pedido. As freqüências dessas médias de tempo foram colocadas em um histograma (FIGURA 6.9). A curva que esse histograma forma também aponta um bom nível de serviço.



média: 41,19
desvio padrão: 28,39

FIGURA 6.9 – HISTOGRAMA DOS TEMPOS DE ENTREGA DE LOTES DE CONTÊINERES CHEIOS

Considerando contêineres cheios, para data original de cada pedido e seus respectivos clientes de demanda e de suprimento, foram agrupados o total de contêineres cheios solicitados e a quantidade que foi possível atender, após ajuste pelo suprimento. As diferenças entre esses valores foram acumuladas, e o valor acumulado foi dividido pelas datas originais, dando origem às médias das diferenças por data. Também foi calculado o percentual de atendimento (quantidade ajustada sobre quantidade solicitada). Esse percentual foi acumulado e dividido pela data original, originando o gráfico da FIGURA 6.10. Visualmente, pode-se observar que, após um período de tempo, a diferença entre a quantidade solicitada e a quantidade atendida estabiliza-se próxima a zero, indicando um certo equilíbrio no sistema no atendimento das demandas de contêineres cheios.

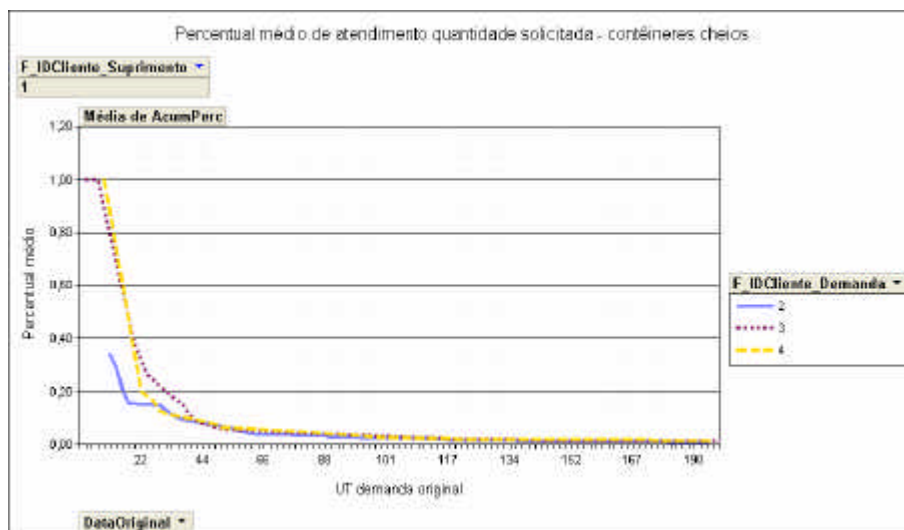


FIGURA 6.10 – PERCENTUAL MÉDIO DE ATENDIMENTO DA QUANTIDADE SOLICITADA – CONTÊINERES CHEIOS

Para contêineres vazios, para cada cliente de demanda e data original de cada pedido, foram computados o total de contêineres vazios solicitados e a quantidade que foi atendida (após ajuste pelo suprimento). As diferenças entre esses valores foram acumuladas, esse valor dividido pelas datas, originando as médias das diferenças por data original. Calculou-se, então, o percentual de atendimento (quantidade ajustada sobre solicitada). Esse percentual também foi acumulado e dividido pela data original, dando origem ao gráfico da FIGURA 6.11. O gráfico demonstra que, após um período de tempo, a diferença entre a quantidade solicitada e a quantidade atendida fica estabilizada em torno de zero, apontando que o sistema atinge um certo equilíbrio na resolução das demandas.

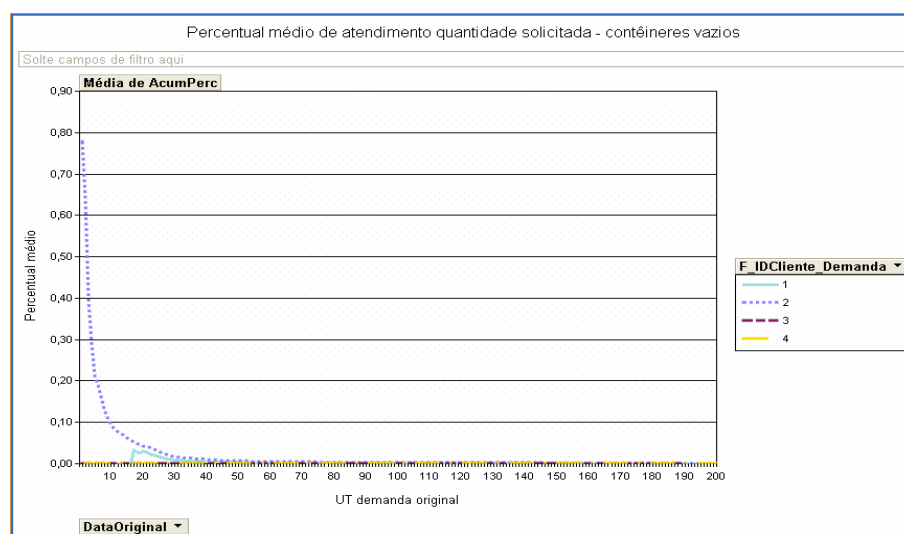


FIGURA 6.11 – PERCENTUAL MÉDIO DE ATENDIMENTO DA QUANTIDADE SOLICITADA – CONTÊINERES VAZIOS

É importante mais uma vez ressaltar que esses gráficos são apenas alguns exemplos ilustrativos da potencialidade de geração de análises sobre a dinâmica do modelo. Diversos tipos de dados podem ser correlacionados fornecendo outras ilustrações gráficas sobre o desempenho do sistema. Se necessário, cada cliente pertencente ao modelo pode ser analisado separadamente, sendo possível verificar as datas de chegada em cada cliente, bem como as quantidades entregues. Outra opção seria verificar a quantidade de contêineres cheios que cada cliente está despachando por unidade de tempo. Com relação ao transporte, é possível verificar os tempos médios e quantidades transportadas em cada trecho, analisando a capacidade dos diferentes roteiros. Também os custos de transporte, armazenagem e processamento podem ser separados para análise individual ou, ainda, individualizados por cliente.

Enfim, são muitas as possibilidades de ilustração na forma de tabelas, gráficos e correlações entre variáveis, sendo as aqui apresentadas apenas algumas escolhas demonstrativas da capacidade informacional que o modelo e o sistema podem oferecer. A quantidade de relacionamentos implementáveis depende, em última instância, dos interesses específicos do usuário.

7. Conclusões

O problema de alocação de contêineres vazios e cheios é extremamente complexo, especialmente se o modelo busca otimizar ao mesmo tempo os aspectos de custo e de nível de serviço das operações de uma companhia. A literatura enfatiza que o fator que agrega complexidade aos sistemas baseados em logística reversa é a interação entre os fluxos normais e os fluxos de retorno, pois esses fluxos têm de ser considerados simultaneamente. Como consequência, o problema apresenta natureza combinatória com relação à quantidade de variáveis e de restrições.

Outra dificuldade que se apresenta é a antecipação de demandas futuras, que faz com que a companhia de navegação prescindia também de um bom planejamento terrestre, reposicionando e controlando a entrega de contêineres vazios para clientes que deles necessitem para futuros carregamentos. Por isso, o conceito de janelas no modelo de alocação de contêineres vazios foi uma premissa muito forte da modelagem aqui apresentada. Não é possível fazer uma solicitação de demanda eficiente sem computar os contêineres que estão por chegar, tanto vazios como cheios; nem disponibilizar o estoque de contêineres vazios sem considerar os que devem ser remetidos a outros clientes nas próximas unidades de tempo. Portanto, é fundamental o papel do horizonte do planejamento, pois todas as ações têm repercussão nos próximos movimentos.

No modelo desenvolvido nesta tese, foi possível incorporar as recomendações de vários autores pesquisados, expostas na SEÇÃO 2.2, sobre as principais características de um sistema de alocação de contêineres. As decisões mais importantes de uma companhia de navegação são: determinar o roteiro de transporte dos contêineres, realocar contêineres vazios, e arrendar e retornar contêineres das companhias de *leasing*.

O modelo deste estudo apresenta um plano consistente de realocação de contêineres vazios, pois as características principais foram mapeadas: a projeção de demanda em cada unidade de tempo, para cheios e vazios, está sendo computada; é possível obter o cronograma de chegadas e partidas em cada depósito ou porto; e a quantidade de contêineres vazios excedentes é constantemente atualizada.

Com relação ao retorno de contêineres para a companhia de *leasing*, o modelo prioriza sua devolução, visando reduzir o custo total de arrendamento, minimizando também, por consequência, o custo de armazenagem. Para a decisão de arrendamento de contêineres, o modelo primeiro determina a realocação de contêineres vazios, incluindo os suprimentos futuros, e só então faz uso do *leasing*, se houver necessidade.

Também as restrições ressaltadas na literatura foram observadas pelo modelo. A limitação de espaço (capacidade) foi implementada para depósitos em terra e depósitos em portos. Com relação à limitação da devolução do *leasing* por contrato, são observados tanto o prazo inicial de devolução (mínimo) como o prazo máximo. O modelo foi implementado de forma a reproduzir a incerteza de obtenção de arrendamento, considerando a indisponibilidade de contêineres nas companhias de *leasing*. Ao final do processamento de cada unidade de tempo, as demandas de contêineres cheios e vazios são atualizadas e computadas para a unidade seguinte, avaliando os eventuais desvios na demanda projetada com relação à necessidade real.

É interessante observar que o modelo desenvolvido utilizou várias técnicas categorizadas na literatura. O problema foi modelado e resolvido de forma dinâmica, abrangendo vários períodos de tempo contíguos (domínio do tempo), utilizando parâmetros determinísticos e estocásticos no suprimento e na demanda. Também foram utilizadas medidas de desempenho da rede (tempo de transporte, tempo de atendimento da demanda), indicativas do nível de serviço. Para implementação do modelo, utilizou-se formulação algébrica, otimização com técnicas de programação matemática, modelos estocásticos, simulação e técnicas heurísticas para solução de problemas em rede.

O modelo foi projetado em estágios, permitindo que seja elaborada uma solução estática, designando os melhores caminhos e quantidades de contêineres cheios e vazios que devem ser transportados, de forma a obter o menor custo (transporte, armazenagem e processamento) possível. Após cada resolução do problema de transbordo e atualização de todos os dados, transcorre a próxima unidade de tempo, quando é feita uma nova avaliação das demandas, executando novamente o modelo, e assim sucessivamente. Todas as rotas obtidas na solução de mínimo custo (estática) são registradas e controladas dinamicamente até sua chegada ao destino final.

Além disso, o modelo foi concebido para ser flexível, propondo parâmetros tais como: ponto crítico de alocação (estoque de segurança mais fator de correção para alocação); opção de utilização ou não de *leasing*; ponto crítico para solicitação de *leasing*; prazo de vencimento das operações de *leasing*, prazo para verificação de recebimentos futuros antes de efetuar pedido de contêineres.

Enfim, o sistema deve, na mesma unidade de tempo, tratar a movimentação dos contêineres, realocar os contêineres vazios considerando o suprimento e a demanda, recalcular as demandas não atendidas e atender as demandas de contêineres cheios. Este conjunto de atividades é bastante intrincado, exigindo testes exaustivos e avaliações periódicas de desempenho.

Ao gerar um modelo integrado e executável, e verificando sua aderência aos resultados desejados, acredita-se haver atingido os objetivos e as questões de pesquisa propostos neste trabalho. Cabe ressaltar que esta tese oferece uma contribuição teórica metodológica, indicando que tipos de informação o modelo é capaz de fornecer, não tendo esgotado seu potencial de aplicação.

7.1. Síntese das contribuições

Apesar de o problema ser combinatório, o modelo mostrou-se viável em termos práticos, principalmente ao se considerar a complexa rede de atividades envolvidas. Os fluxos relativos a contêineres vazios e cheios foram integrados, sendo que os fluxos normais e reversos são resolvidos simultaneamente. Além disso, os fluxos foram balanceados, fornecendo equilíbrio ao sistema.

Como observado na literatura, este problema apresenta grande complexidade, com restrições práticas difíceis de ser incorporadas e requerendo muito tempo computacional. Além disso, o algoritmo deve ser flexível para inclusão ou modificação de restrições e para alteração de seus critérios de apuração de custo.

Alguns procedimentos heurísticos tiveram de ser utilizados para minimizar a quantidade de variáveis do modelo e propiciar a utilização do software disponível. A partir disso, o modelo funciona como um problema de otimização (minimização de custos).

Foi possível elaborar um modelo de previsão satisfatório, computando contêineres vazios que estão chegando em datas futuras, contêineres que estão sendo esvaziados e tornando-se disponíveis. A modelagem do estoque mínimo e da margem de correção de pedidos torna o modelo mais próximo da realidade, oferecendo maior flexibilidade aos operadores.

O sistema não apenas elabora o roteamento dos contêineres baseado no mínimo custo, mas ainda provê o controle de todas as movimentações dos trechos de transporte, computando a entrada desses contêineres novamente no sistema, de forma automática para o usuário. O *leasing*, embora simplificado, mostrou sua importância na liberação de demandas e no bom andamento do fluxo do sistema.

O modelo possui um bom nível de parametrização, oferecendo grandes possibilidades para testes e análises. O modelo permite a avaliação de diferentes políticas de alocação de contêineres, identificando maneiras de reduzir os custos fixos e variáveis relativos ao comércio naval.

Quando testado com valores experimentais, o desempenho do modelo mostra-se apropriado, executando em um curto espaço de tempo e garantindo um nível de serviço adequado, com comportamento equilibrado no transcorrer do tempo.

Ao se informar demandas conhecidas, considerando os tempos de transporte, processamento e armazenagem mínimos e máximos cadastrados, o sistema permite a emissão de relatórios de previsão, antecipando a chegada dos contêineres nos destinos e a liberação desses para novos carregamentos.

Possibilitando a geração aleatória de demanda entre clientes, desde que os parâmetros sejam baseados em dados históricos, o sistema oferece uma modalidade de previsão ainda mais avançada, permitindo visualizar um horizonte de planejamento extenso, lembrando que é possível inclusive representar sazonalidade nas demandas através do uso de comandos.

A escolha do horizonte de planejamento foi arbitrária, tendo sido exploradas execuções com 20, 100, 200 e até com 1.000 unidades de tempo. A princípio, não há limite para o horizonte de planejamento, devido ao fato de o modelo conseguir absorver novas demandas entre os estágios estático e dinâmico. Cabe ressaltar que o processamento tem melhor desempenho quando há possibilidade de utilização de *leasing*. Portanto, a limitação refere-se apenas à capacidade do sistema computacional disponível e à situação a ser modelada, a qual pode incluir pontos críticos que reduzam o desempenho do sistema.

O plano de realocação em cada porto ou depósito é disponibilizado com antecedência. Entretanto, o modelo consegue assimilar de forma rápida e eficiente os desvios nas projeções. A cada unidade de tempo, a companhia de navegação pode obter um inventário de seus contêineres e sua localização em todas as entidades envolvidas no modelo.

É possível medir o desempenho econômico do modelo, utilizando várias opções de análise de custos, bem como avaliar a qualidade do serviço prestado, através de cálculos de ociosidade do sistema. O modelo possui flexibilidade para que sejam adicionados outros parâmetros julgados interessantes.

Acredita-se haver minimizado a ociosidade do sistema porque, a cada unidade de tempo, o modelo prevê onde os contêineres vazios serão necessários. Ao verificar antecipadamente contêineres que estarão sendo recebidos, evitam-se movimentos desnecessários ou o transporte de contêineres vazios apenas por precaução. Os contêineres vazios excedentes são movimentados apenas quando necessário.

Com base em todos os custos calculados durante o processamento, pode-se analisar o custo-benefício entre transporte de contêineres vazios em navio ou terra,

despesas de armazenagem ou despesas de arrendamento. Além dessas, são disponibilizadas outras informações: custo por unidade de tempo, custo por cliente, classificados por contêineres vazios e cheios, e outras combinações destes.

Enfim, provou-se ser possível unificar modelos que usualmente são tratados de forma isolada. Com o desenvolvimento de um novo modelo, integrando o fluxo de contêineres cheios com o fluxo de contêineres vazios, espera-se ter avançado no conhecimento dessa área, propiciando a implementação de um sistema de apoio a decisões com bom potencial para utilização por companhias de transporte.

7.2. Limitações

O modelo foi implementado com procedimentos heurísticos *ad hoc*, não havendo convicção de que não existam métodos mais eficientes ou mais realistas. Entretanto, foram utilizados os que apresentaram melhores resultados entre os procedimentos testados.

Por simplificação, optou-se por tratar apenas um tipo de contêiner. Da mesma forma, não foram contemplados contêineres especiais (por exemplo, refrigerados). Formalmente, a inclusão de outros tipos de contêineres não oferece dificuldades conceituais em termos de procedimento de solução, adicionando mais variáveis e restrições ao modelo, e tornando-o mais lento em tempo de resolução.

Embora os custos estejam disponíveis, não foi implementada a possibilidade de analisar decisões entre o uso de armazenagem ou de *leasing*, o que alguns autores julgam importante. Na realidade, os custos de *leasing* são classificados como financeiros, e teriam de ser comparados à parte, não exatamente no mesmo momento da minimização de custos logísticos, que foi o que se pretendeu proporcionar. Também não foi implementada multa por não atendimento de demanda. Essas características poderão ser incorporadas futuramente, devendo-se salientar que outras informações financeiras estão disponíveis para análise econômica do modelo.

O tempo de processamento nos depósitos é registrado de modo fixo por evento (carga ou descarga), independentemente do volume processado, entretanto deveria ser proporcional à quantidade de contêineres. Obviamente, maior acurácia seria obtida levando em conta que uma quantidade maior de contêineres, a partir de determinado limite, leva mais tempo para ser descarregada do que o tempo unitário cadastrado. Esse problema pode ser minimizado com a incorporação de uma função crescente côncava.

Outro aprimoramento do modelo seria a possibilidade de considerar reduções no custo de transporte quando este fosse efetuado por lotes (por exemplo, trens), devido à

economia de escala. Atualmente, o custo é fixo por unidade, não absorvendo essas peculiaridades.

Não existe, ainda, uma estrutura para repasse dos diversos custos a clientes e depósitos, o que poderia ser implementado. No momento, todos os custos são consolidados para uma companhia de navegação. Buscou-se não fugir ao escopo desta tese, embora o modelo permita diversas análises subseqüentes.

7.3. Sugestões de trabalhos futuros

Para aperfeiçoamento do modelo seria necessária, num primeiro momento, a incorporação de mais de um tamanho de contêiner. Outra característica desejável é a capacitação dos arcos do modelo (fluxos), que representariam o espaço disponível para contêineres nos navios e nos meios de transporte terrestres.

Opcionalmente, dependendo do interesse nessa alternativa, os portos poderiam ser priorizados apenas pelos seus custos de processamento (carga e descarga), sempre considerados onerosos no custo total. Outro estudo poderia focalizar em análises de custos de armazenagem em comparação a arrendamento de contêineres. Enfim, há possibilidade de novos relacionamentos entre variáveis, sendo o modelo utilizado como mecanismo de simulação.

Um exemplo de resultado reverso seria o desenvolvimento de um plano de localização de depósitos para armazenagem de contêineres, definindo suas áreas de serviço logístico, de forma a facilitar a redistribuição de contêineres vazios para a companhia de navegação e seus clientes, visando minimizar os custos totais.

A flexibilidade do modelo permite que o sistema possa ser adaptado para privilegiar a minimização de tempo ao invés de custo. Também os critérios de priorização podem ser alternados entre data do pedido mais antiga (*due date*), menor tempo ou menor custo, para análise do desempenho de cada alternativa.

Futuramente, após coleta de dados históricos, o sistema será capaz de oferecer métodos de previsão para as principais fontes de aleatoriedade da alocação dinâmica de contêineres (demanda, suprimento e capacidade dos navios para contêineres vazios), incorporando também os tempos de transporte de contêineres desde os depósitos até os clientes, e desde os clientes até os depósitos.

Portanto, apesar de julgar-se que este trabalho tenha produzido avanço significativo na modelagem do problema de alocação e movimentação de contêineres, esse campo continua promissor para aperfeiçoamentos e novas pesquisas.

ANEXO 1 – EXEMPLO DE ARQUIVO PARA ENTRADA NO SOFTWARE LINDO® API

MINIMIZE

+7. C0000000
+4. C0000001
+1. C0000002
+2. C0000003
+7. C0000004
+3. C0000005
+2. C0000006
+4. C0000007
+3. C0000008
+3. C0000009
+5. C0000010
+3. C0000011
+3. C0000012
+2. C0000013
+5. C0000014
+7.299999999999998 C0000015
+8.3000000000000007 C0000016
+4.299999999999998 C0000017
+7.299999999999998 C0000018
+9.4000000000000004 C0000019
+8.4000000000000004 C0000020
+5.4000000000000004 C0000021
+9.4000000000000004 C0000022
+12.6 C0000023
+9.599999999999996 C0000024
+9.599999999999996 C0000025
+11.6 C0000026
+5. C0000027
+6. C0000028
+7. C0000029
+9. C0000030
+5. C0000031
+7. C0000032
+8. C0000033
+4. C0000034
+10.300000000000001 C0000035
+5.4000000000000004 C0000036
+8.599999999999996 C0000037
+7. C0000038
+10. C0000039
+3. C0000040
+2. C0000041
+4. C0000042
+3. C0000043
+3. C0000044
+7.299999999999998 C0000045
+8.3000000000000007 C0000046
+4.299999999999998 C0000047
+7.299999999999998 C0000048
+9.4000000000000004 C0000049
+8.4000000000000004 C0000050
+5.4000000000000004 C0000051
+9.4000000000000004 C0000052
+12.6 C0000053
+9.599999999999996 C0000054
+9.599999999999996 C0000055
+11.6 C0000056
+5. C0000057
+6. C0000058
+7. C0000059
+9. C0000060
+5. C0000061
+7. C0000062

+8. C0000063
+4. C0000064
+4.2999999999999998 C0000065
+6.4000000000000004 C0000066
+8.5999999999999996 C0000067
+7. C0000068
+4. C0000069

SUBJECT TO
R0000000)

+1. C0000000
+1. C0000001
+1. C0000002
+1. C0000003
+1. C0000004
< +5.

R0000001)

+1. C0000005
+1. C0000006
+1. C0000007
+1. C0000008
+1. C0000009
< +0.

R0000002)

+1. C0000010
+1. C0000011
+1. C0000012
+1. C0000013
+1. C0000014
< +0.

R0000003)

+1. C0000035
+1. C0000036
+1. C0000037
+1. C0000038
+1. C0000039
> +5.

R0000004)

+1. C0000040
+1. C0000041
+1. C0000042
+1. C0000043
+1. C0000044
< +10.

R0000005)

+1. C0000065
+1. C0000066
+1. C0000067
+1. C0000068
+1. C0000069
> +10.

R0000006)

+1. C0000000
+1. C0000005
+1. C0000010
-1. C0000015
-1. C0000016
-1. C0000017
-1. C0000018
+1. C0000019
+1. C0000023
+1. C0000027
+1. C0000031
-1. C0000035
= +0.

R0000007)

+1. C0000001
+1. C0000006
+1. C0000011
+1. C0000015
-1. C0000019
-1. C0000020
-1. C0000021
-1. C0000022
+1. C0000024
+1. C0000028
+1. C0000032
-1. C0000036
= +0.
R0000008)
+1. C0000002
+1. C0000007
+1. C0000012
+1. C0000016
+1. C0000020
-1. C0000023
-1. C0000024
-1. C0000025
-1. C0000026
+1. C0000029
+1. C0000033
-1. C0000037
= +0.
R0000009)
+1. C0000003
+1. C0000008
+1. C0000013
+1. C0000017
+1. C0000021
+1. C0000025
-1. C0000027
-1. C0000028
-1. C0000029
-1. C0000030
+1. C0000034
-1. C0000038
= +0.
R0000010)
+1. C0000004
+1. C0000009
+1. C0000014
+1. C0000018
+1. C0000022
+1. C0000026
+1. C0000030
-1. C0000031
-1. C0000032
-1. C0000033
-1. C0000034
-1. C0000039
= +0.
R0000011)
+1. C0000040
-1. C0000045
-1. C0000046
-1. C0000047
-1. C0000048
+1. C0000049
+1. C0000053
+1. C0000057
+1. C0000061
-1. C0000065
= +0.

R0000012)
+1. C0000041
+1. C0000045
-1. C0000049
-1. C0000050
-1. C0000051
-1. C0000052
+1. C0000054
+1. C0000058
+1. C0000062
-1. C0000066
= +0.

R0000013)
+1. C0000042
+1. C0000046
+1. C0000050
-1. C0000053
-1. C0000054
-1. C0000055
-1. C0000056
+1. C0000059
+1. C0000063
-1. C0000067
= +0.

R0000014)
+1. C0000043
+1. C0000047
+1. C0000051
+1. C0000055
-1. C0000057
-1. C0000058
-1. C0000059
-1. C0000060
+1. C0000064
-1. C0000068
= +0.

R0000015)
+1. C0000044
+1. C0000048
+1. C0000052
+1. C0000056
+1. C0000060
-1. C0000061
-1. C0000062
-1. C0000063
-1. C0000064
-1. C0000069
= +0.

END

ANEXO 2 – EXEMPLO DE ARQUIVO DE ENTRADA NO SOFTWARE LINDO®

MINIMIZE

! Vazios, de Clientes para Depósitos

+ 7 c1d1p00 + 4 c1d2p00 + 1 c1d3p00 + 2 c1d4p00 + 7 c1d5p00
 + 3 c3d1p00 + 2 c3d2p00 + 4 c3d3p00 + 3 c3d4p00 + 3 c3d5p00
 + 5 c4d1p00 + 3 c4d2p00 + 3 c4d3p00 + 2 c4d4p00 + 5 c4d5p00

! Vazios, de Depósitos para Depósitos

+ 7,30 d1d2p00 + 8,30 d1d3p00 + 4,30 d1d4p00 + 7,30 d1d5p00
 + 9,40 d2d1p00 + 8,40 d2d3p00 + 5,40 d2d4p00 + 9,40 d2d5p00
 + 12,60 d3d1p00 + 9,60 d3d2p00 + 9,60 d3d4p00 + 11,60 d3d5p00
 + 5 d4d1p00 + 6 d4d2p00 + 7 d4d3p00 + 9 d4d5p00
 + 5 d5d1p00 + 7 d5d2p00 + 8 d5d3p00 + 4 d5d4p00

! Vazios, de Depósitos para Clientes

+ 10,30 d1c2p00 + 5,40 d2c2p00 + 8,60 d3c2p00 + 7 d4c2p00 + 10 d5c2p00

! Cheios, de Clientes para Depósitos

+ 3 c3d1p35 + 2 c3d2p35 + 4 c3d3p35 + 3 c3d4p35 + 3 c3d5p35

! Cheios, de Depósitos para Depósitos

+ 7,30 d1d2p35 + 8,30 d1d3p35 + 4,30 d1d4p35 + 7,30 d1d5p35
 + 9,40 d2d1p35 + 8,40 d2d3p35 + 5,40 d2d4p35 + 9,40 d2d5p35 + 12,60 d3d1p35
 + 9,60 d3d2p35 + 9,60 d3d4p35 + 11,60 d3d5p35 + 5 d4d1p35 + 6 d4d2p35 + 7 d4d3p35
 + 9 d4d5p35 + 5 d5d1p35 + 7 d5d2p35 + 8 d5d3p35 + 4 d5d4p35

! Cheios, de Depósitos para Clientes

+ 4,30 d1c5p35 + 6,40 d2c5p35 + 8,60 d3c5p35 + 7 d4c5p35 + 4 d5c5p35

SUBJECT TO

! Vazios, de Clientes para Depósitos: menor que o suprimento do cliente

+ 1 c1d1p00 + 1 c1d2p00 + 1 c1d3p00 + 1 c1d4p00 + 1 c1d5p00 < 5
 + 1 c3d1p00 + 1 c3d2p00 + 1 c3d3p00 + 1 c3d4p00 + 1 c3d5p00 < 0
 + 1 c4d1p00 + 1 c4d2p00 + 1 c4d3p00 + 1 c4d4p00 + 1 c4d5p00 < 0

! Vazios, de Depósitos para Clientes: maior que a demanda do cliente

+ 1 d1c2p00 + 1 d2c2p00 + 1 d3c2p00 + 1 d4c2p00 + 1 d5c2p00 > 5

! Cheios, de Clientes para Depósitos: menor que o suprimento do cliente

+ 1 c3d1p35 + 1 c3d2p35 + 1 c3d3p35 + 1 c3d4p35 + 1 c3d5p35 < 10

! Cheios, de Depósitos para Clientes: maior que a demanda do cliente

+ 1 d1c5p35 + 1 d2c5p35 + 1 d3c5p35 + 1 d4c5p35 + 1 d5c5p35 > 10

! Balanceamento de Vazios de Depósitos: entradas e saídas devem ser iguais

+ 1 c1d1p00 + 1 c3d1p00 + 1 c4d1p00 - 1 d1d2p00 - 1 d1d3p00 - 1 d1d4p00 - 1 d1d5p00 + 1
 d2d1p00 + 1 d3d1p00 + 1 d4d1p00 + 1 d5d1p00 - 1 d1c2p00 = 0
 + 1 c1d2p00 + 1 c3d2p00 + 1 c4d2p00 + 1 d1d2p00 - 1 d2d1p00 - 1 d2d3p00 - 1 d2d4p00 - 1
 d2d5p00 + 1 d3d2p00 + 1 d4d2p00 + 1 d5d2p00 - 1 d2c2p00 = 0
 + 1 c1d3p00 + 1 c3d3p00 + 1 c4d3p00 + 1 d1d3p00 + 1 d2d3p00 - 1 d3d1p00 - 1 d3d2p00 -
 1 d3d4p00 - 1 d3d5p00 + 1 d4d3p00 + 1 d5d3p00 - 1 d3c2p00 = 0
 + 1 c1d4p00 + 1 c3d4p00 + 1 c4d4p00 + 1 c4d4p00 + 1 d1d4p00 + 1 d2d4p00 + 1 d3d4p00 - 1 d4d1p00 -
 1 d4d2p00 - 1 d4d3p00 - 1 d4d5p00 + 1 d5d4p00 - 1 d4c2p00 = 0
 + 1 c1d5p00 + 1 c3d5p00 + 1 c4d5p00 + 1 d1d5p00 + 1 d2d5p00 + 1 d3d5p00 + 1 d4d5p00 -
 1 d5d1p00 - 1 d5d2p00 - 1 d5d3p00 - 1 d5d4p00 - 1 d5c2p00 = 0

! Balanceamento de Cheios de Depósitos: entradas e saídas devem ser iguais

+ 1 c3d1p35 - 1 d1d2p35 - 1 d1d3p35 - 1 d1d4p35 - 1 d1d5p35 + 1 d2d1p35 + 1 d3d1p35 + 1
 d4d1p35 + 1 d5d1p35 - 1 d1c5p35 = 0
 + 1 c3d2p35 + 1 d1d2p35 - 1 d2d1p35 - 1 d2d3p35 - 1 d2d4p35 - 1 d2d5p35 + 1 d3d2p35 + 1
 d4d2p35 + 1 d5d2p35 - 1 d2c5p35 = 0
 + 1 c3d3p35 + 1 d1d3p35 + 1 d2d3p35 - 1 d3d1p35 - 1 d3d2p35 - 1 d3d4p35 - 1 d3d5p35 + 1
 d4d3p35 + 1 d5d3p35 - 1 d3c5p35 = 0

$$\begin{aligned} &+ 1 c3d4p35 + 1 d1d4p35 + 1 d2d4p35 + 1 d3d4p35 - 1 d4d1p35 - 1 d4d2p35 - 1 d4d3p35 - 1 \\ &d4d5p35 + 1 d5d4p35 - 1 d4c5p35 = 0 \\ &+ 1 c3d5p35 + 1 d1d5p35 + 1 d2d5p35 + 1 d3d5p35 + 1 d4d5p35 - 1 d5d1p35 - 1 d5d2p35 - \\ &1 d5d3p35 - 1 d5d4p35 - 1 d5c5p35 = 0 \end{aligned}$$

GIN 70

END

ANEXO 3 – EXEMPLO DE RESULTADO GERADO PELO SOFTWARE LINDO® API

SOLUTION LP (OPTIMAL)
 PROBLEM NAME
 OBJECTIVE VALUE 1.1500000000e+002

NUMBER	COLUMNS.....	AT ...ACTIVITY...
16	LL	0.0000000000e+000
17	LL	0.0000000000e+000
18	LL	0.0000000000e+000
19	BS	5.0000000000e+000
20	LL	0.0000000000e+000
21	LL	0.0000000000e+000
22	LL	0.0000000000e+000
23	LL	0.0000000000e+000
24	LL	0.0000000000e+000
25	LL	0.0000000000e+000
26	LL	0.0000000000e+000
27	LL	0.0000000000e+000
28	LL	0.0000000000e+000
29	LL	0.0000000000e+000
30	LL	0.0000000000e+000
31	LL	0.0000000000e+000
32	LL	0.0000000000e+000
33	LL	0.0000000000e+000
34	LL	0.0000000000e+000
35	LL	0.0000000000e+000
36	LL	0.0000000000e+000
37	LL	0.0000000000e+000
38	LL	0.0000000000e+000
39	LL	0.0000000000e+000
40	LL	0.0000000000e+000
41	LL	0.0000000000e+000
42	LL	0.0000000000e+000
43	LL	0.0000000000e+000
44	LL	0.0000000000e+000
45	LL	0.0000000000e+000
46	LL	0.0000000000e+000
47	LL	0.0000000000e+000
48	LL	0.0000000000e+000
49	LL	0.0000000000e+000
50	LL	0.0000000000e+000
51	LL	0.0000000000e+000
52	LL	0.0000000000e+000
53	LL	0.0000000000e+000
54	BS	5.0000000000e+000
55	LL	0.0000000000e+000
56	LL	0.0000000000e+000
57	LL	0.0000000000e+000
58	LL	0.0000000000e+000
59	LL	0.0000000000e+000
60	BS	1.0000000000e+001
61	LL	0.0000000000e+000
62	LL	0.0000000000e+000
63	LL	0.0000000000e+000
64	LL	0.0000000000e+000
65	LL	0.0000000000e+000
66	LL	0.0000000000e+000
67	LL	0.0000000000e+000
68	LL	0.0000000000e+000
69	LL	0.0000000000e+000
70	LL	0.0000000000e+000
71	LL	0.0000000000e+000
72	LL	0.0000000000e+000
73	LL	0.0000000000e+000
74	LL	0.0000000000e+000

75	LL	0.000000000e+000
76	LL	0.000000000e+000
77	LL	0.000000000e+000
78	LL	0.000000000e+000
79	LL	0.000000000e+000
80	LL	0.000000000e+000
81	LL	0.000000000e+000
82	LL	0.000000000e+000
83	LL	0.000000000e+000
84	LL	0.000000000e+000
85	BS	1.000000000e+001

ANEXO 4 – DADOS DE ENTRADA DE UMA INSTÂNCIA DO MODELO

TABELA 7.1 – DADOS DE CLIENTES

Cliente	Quantidade de contêineres vazios inicial	Quantidade de contêineres vazios atual	Tempo de carga (UT)	Tempo de descarga (UT)
1	40	20	1	1
2	20	20	1	1
3	10	25	1	1
4	45	50	1	1
5	5	5	1	1

TABELA 7.2 – DADOS DE DEPÓSITOS

Depósito	Custo de processamento (\$)	Custo de armazenagem (\$)	Tempo de processamento (UT)	Tempo de armazenagem (UT)
1	1,10	1,20	0	1
2	2,20	2,20	0	1
3	3,30	3,30	0	1
4	2,00	2,00	0	1
5	1,00	1,00	0	1

TABELA 7.3 – DEMANDA POR CONTÊINERES CHEIOS

UT	Cliente de demanda	Cliente de suprimento	Quantidade de contêineres
1	1	2	20
1	1	3	10
1	1	4	5
1	2	1	10
1	2	3	15
1	2	4	20
1	3	1	5
1	3	2	5
1	3	4	5
1	4	1	10
1	4	2	5
1	4	3	5
1	1	5	5
1	2	5	5
1	3	5	15
1	4	5	10
1	5	1	10
1	5	2	5
1	5	3	15
1	5	4	5

TABELA7.4 – RELACIONAMENTO ENTRE DEPÓSITOS

Deposito de origem	Deposito de destino	Custo transporte de contêineres vazios (\$)	Custo transporte de contêineres cheios (\$)	Tempo de transporte (UT)
1	2	5,00	5,00	1
1	3	6,00	6,00	1
1	4	2,00	2,00	1
1	5	5,00	5,00	1
2	1	5,00	5,00	1
2	3	4,00	4,00	1
2	4	1,00	1,00	1
2	5	5,00	5,00	1
3	1	6,00	6,00	1
3	2	3,00	3,00	1
3	4	3,00	3,00	1
3	5	5,00	5,00	1
4	1	1,00	1,00	1
4	2	2,00	2,00	1
4	3	3,00	3,00	1
4	5	5,00	5,00	1
5	1	3,00	3,00	1
5	2	5,00	5,00	1
5	3	6,00	6,00	1
5	4	2,00	2,00	1

TABELA7.5 – RELACIONAMENTO ENTRE CLIENTES E DEPÓSITOS

Cliente	Depósito	Origem	Custo transporte de contêineres vazios (\$)	Custo transporte de contêineres cheios (\$)	Tempo de transporte (UT)
1	1	Cliente	7,00	7,00	1
1	1	Depósito	4,00	4,00	1
1	2	Cliente	4,00	4,00	3
1	2	Depósito	1,00	1,00	3
1	3	Cliente	1,00	1,00	2
1	3	Depósito	5,00	5,00	2
1	4	Cliente	2,00	2,00	2
1	4	Depósito	1,00	1,00	2
1	5	Cliente	7,00	7,00	1
1	5	Depósito	4,00	4,00	1
2	1	Cliente	1,00	1,00	3
2	1	Depósito	8,00	8,00	3
2	2	Cliente	5,00	5,00	2
2	2	Depósito	1,00	1,00	2
2	3	Cliente	2,00	2,00	1
2	3	Depósito	2,00	2,00	1
2	4	Cliente	1,00	1,00	1
2	4	Depósito	3,00	3,00	1
2	5	Cliente	1,00	1,00	3
2	5	Depósito	8,00	8,00	3
3	1	Cliente	3,00	3,00	2
3	1	Depósito	4,00	4,00	2
3	2	Cliente	2,00	2,00	1
3	2	Depósito	1,00	1,00	1
3	3	Cliente	4,00	4,00	2
3	3	Depósito	5,00	5,00	2
3	4	Cliente	3,00	3,00	2
3	4	Depósito	2,00	2,00	2
3	5	Cliente	3,00	3,00	2
3	5	Depósito	4,00	4,00	2
4	1	Cliente	5,00	5,00	5
4	1	Depósito	6,00	6,00	5
4	2	Cliente	3,00	3,00	3
4	2	Depósito	2,00	2,00	3
4	3	Cliente	3,00	3,00	3
4	3	Depósito	3,00	3,00	3
4	4	Cliente	2,00	2,00	3
4	4	Depósito	1,00	1,00	3
4	5	Cliente	5,00	5,00	5
4	5	Depósito	6,00	6,00	5
5	1	Cliente	1,00	1,00	1
5	1	Depósito	2,00	2,00	1
5	2	Cliente	1,00	1,00	1
5	2	Depósito	2,00	2,00	1
5	3	Cliente	1,00	1,00	1
5	3	Depósito	2,00	2,00	1
5	4	Cliente	1,00	1,00	1
5	4	Depósito	3,00	3,00	1
5	5	Cliente	1,00	1,00	1
5	5	Depósito	2,00	2,00	1

Referências bibliográficas

- Barco, B.L. *A logística do contêiner vazio*. Dissertação de mestrado (resumo CAPES), Universidade de São Paulo, 1998.
- CAPES. *Banco de teses*. Site: <http://www.capes.gov.br/Scripts/index.idc?pagina=/servicos/indicadores/TesesDissertacoes.htm>, 25 de junho de 2003.
- Caus, M. Gargalos nos portos atrasam embarques. *Jornal Zero Hora*, Porto Alegre: p.19, 10 de julho, 2004.
- Cheung, R.K., Chen, C. A two-stage stochastic network model and solution methods for the dynamic empty container allocation problem. *Transportation Science* 32(2), 142-162, 1998.
- Choong, S.T., Cole, M.H., Kutanoglu, E. Empty container management for intermodal transportation networks. *Transportation Research Part E* 38(6), 423-438, 2002.
- Crainic, T.G., Gendreau, M., Dejax, P. Dynamic and stochastic models for the allocation of empty containers. *Operations Research* 41(1), 102-126, 1993.
- Dejax, P.J., Crainic, T.G. A review of empty flows and fleet management models in freight transportation. *Transportation Science* 21, 227-247, 1987.
- Del Castillo, E., Cochran, J.K. Optimal short horizon distribution operations in reusable container systems. *Journal of the Operational Research Society* 47, 48-60, 1996.
- Eck, R.D. *Operations research for business*. Belmont, California: Wadsworth, 1976.
- Ertel, L. No guindaste, Seção Informe Econômico. *Jornal Zero Hora*, Porto Alegre: p.23, 12 de julho, 2004.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J.M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J.A.E.E, Van Wassenhove, L.N. Quantitative models for reverse logistics: a review. *European Journal of Operational Research* 103(1), 1-17, 1997.
- Goldberg, M.C. *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*. Rio de Janeiro: Campus, 2000.
- Graphviz. *Graph Visualization Software (open source)*. Site: <http://www.graphviz.org>, 2004-2005.
- Jansen, B., Swinkels, P.C.J., Teeuwen, G.J.A. Fluiter, B.A., Fleuren, H.A. Operational planning of a large-scale multi-modal transportation system, *European Journal of Operational Research* 156(1), 41-53, 2004.

- Kelle, P., Silver, E.A. Purchasing policy of new containers considering the random returns of previously issued containers. *IIE Transactions* 21(4), 349-354, 1989.
- Kim K.H., Egbelu P.J. Scheduling in a production environment with multiple process plans per job. *International Journal of Production Research* 37(12), 2725-2753, AUG 15, 1999.
- Kroon, L. Vrijens, G. Returnable containers: an example of reverse logistics. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 25(2), 56-68, 1995.
- Lai, K.K., Lam, K., Chan, W.K. Shipping container logistics and allocation. *Journal of the Operational Research Society* 46(6), 687-697, 1995.
- Melo, D. Falta contêiner para exportar no porto de Rio Grande. *Jornal Zero Hora*, Porto Alegre: p.19, 5 de junho, 2004.
- Patury, F. Colapso nos portos. *Revista Veja, Seção Radar*, São Paulo: Abril, ed. 1872, 22 de setembro, 2004b.
- Pereira Júnior, P.F. *Avaliação de políticas de estoque e movimentação de contêineres vazios utilizados no transporte marítimo*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.
- Preston, P., Kozan, E. A tabu search technique applied to scheduling container transfers. *Transportation Planning and Technology* 24(2), 135-153, 2001.
- Sampaio, L.M.D. *Alocação de contêineres vazios para a logística reversa do transporte de carga*. Dissertação de mestrado (resumo CAPES), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.
- Shen, W.S., Khoong, C.M. A DSS for empty container distribution planning. *Decision Support Systems* 15(1), 75-82, 1995.
- Souza, F.C.G. *Procedimentos para a alocação de contêineres vazios no transporte*. Dissertação de mestrado (resumo CAPES), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2001.
- Taleb-Ibrahimi, M., Castilho, B., Daganzo, C.F. Storage space vs handling work in container terminals. *Transportation Research Part B-Methodological* 27(1), 13-32, 1993.
- Torma, C. Porto de Rio Grande bate recorde de movimentação. *Jornal Zero Hora*, Porto Alegre: p.19, 22 de janeiro, 2004.

- Torma, C, Melo, D. Falta de contêineres onera exportação. *Jornal Zero Hora*, Porto Alegre: p.18, 31 de julho, 2004.
- VEJA. O gargalo no mar. *Revista Veja, Seção Contexto*, São Paulo: Abril, ed. 1861, 7 de julho, 2004a.
- Wagner, H.M. *Pesquisa operacional*. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1986.
- White, W.W. Dynamic transshipment networks: an algorithm and its application to the distribution of empty containers. *Networks* 2(3), 211-236, 1972.
- Wilson, I.D., Roach, P.A. Container stowage planning: a methodology for generating computerised solutions. *Journal of the Operational Research Society* 51(11), 1248-1255, 2000.