



**COPPE/UFRJ**

**METODOLOGIA PARA LOCALIZAÇÃO DE TERMINAIS CONCENTRADORES  
EM REDES DE TRANSPORTE SOB GERENCIAMENTO DESCENTRALIZADO**

Adriano Dutra de Vasconcelos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientador: Carlos David Nassi

Rio de Janeiro

Março de 2009

METODOLOGIA PARA LOCALIZAÇÃO DE TERMINAIS CONCENTRADORES  
EM REDES DE TRANSPORTE SOB GERENCIAMENTO DESCENTRALIZADO

Adriano Dutra de Vasconcelos

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Aprovada por:

---

Prof. Carlos David Nassi, Dr. Ing.

---

Prof. Amaranto Lopes Pereira, Dr. Ing.

---

Prof. Marcio de Almeida D'Agosto, D. Sc.

---

Prof. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D. Sc.

---

Prof. José Eugênio Leal, Dr. Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2009

VASCONCELOS, ADRIANO DUTRA DE

Metodologia para Localização de Terminais Concentradores em Redes de Transporte sob Gerenciamento Descentralizado / Adriano Dutra de Vasconcelos – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XII, 198 p.: il. ; 29,7 cm.

Orientador: Carlos David Nassi.

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 155-160.

1. Localização de *Hub*. 2. Otimização. 3. Transporte Intermodal 4. Planejamento de Transporte. 5. Transporte de Carga I. Nassi, Carlos David. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

Dedico este trabalho ao Povo Brasileiro,  
cujos interesses tenho a honra de defender.

## AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Deus, pelo “Caminho, a Verdade e a Vida”.

Ao Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ, por ter oferecido todo o apoio necessário para a realização deste trabalho.

Ao Exército Brasileiro, por esta grande oportunidade de realização e crescimento profissionais.

Ao Prof. Dr. Ing. Carlos David Nassi, pela excelente orientação (sempre precisa, concisa e valorosa), pela liberdade proporcionada às motivações próprias deste orientando (maximizando a manifestação da criatividade), pela gentileza e principalmente pela amizade.

Ao Centro de Excelência em Engenharia de Transportes (CENTRAN), pela essencial contribuição no fornecimento de grande quantidade de dados do Sistema Viário Nacional, que possibilitaram a experimentação prática desta tese. Destacando-se aqui seu Diretor Executivo, Coronel Paulo Roberto Dias Morales (M. Sc.), e o Coordenador Técnico Eng. Saul Germano Rabello Quadros (M. Sc.).

Ao Prof. D. Sc. Luiz Antônio Silveira Lopes, por todo apoio oferecido desde o início até a fase experimental desta pesquisa.

Ao Prof. D. Sc. Altair dos Santos Ferreira Filho, cuja integridade constituiu a principal referência na aceitação deste candidato pelo Programa de Engenharia de Transportes.

A cada um dos professores da Banca Examinadora, Dr. Ing. Carlos David Nassi, Dr. Ing. Amaranto Lopes Pereira, D. Sc. Márcio de Almeida D’Agosto, D. Sc. Laura Silvia B. S. Leite, Dr. Ing. José Eugênio Leal, pela dedicação de seus preciosos tempo, atenção e competência na avaliação e crítica desta tese.

Aos professores D. Sc. Márcio de Almeida D’Agosto e D. Sc. Laura Silvia B. S. Leite, pelas orientações prestadas com exímia boa vontade em suas respectivas disciplinas.

Ao doutorando Eng. David Fernandes Cruz Moura (M. Sc.), pelo importante auxílio fornecido num momento crucial desta pesquisa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.).

## METODOLOGIA PARA LOCALIZAÇÃO DE TERMINAIS CONCENTRADORES EM REDES DE TRANSPORTE SOB GERENCIAMENTO DESCENTRALIZADO

Adriano Dutra de Vasconcelos

Março/2009

Orientador: Carlos David Nassi

Programa: Engenharia de Transportes

Esta tese propõe uma metodologia para resolver o problema de localização de terminais concentradores (*hubs*) em rede de transporte operada sob gerenciamento descentralizado. Os modelos de localização de *hubs* convencionais não são adequados a este caso, já que, em uma rede como esta, diversas empresas (oferecendo serviços a seus variados clientes) podem escolher o caminho e o modo de transporte a ser utilizado, baseando-se em critérios particulares, objetivos e subjetivos, bem diversos, o que provoca operações de padrões variáveis, as quais podem ser modeladas apenas por funções probabilísticas. Portanto foi desenvolvido um novo modelo do Problema de Localização de *Hubs* Não-Capacitado, cuja formulação de programação matemática contém parâmetros obtidos pela Teoria Comportamental aplicada ao transporte – mais especificamente, pelo método Logit. A metodologia inclui a aplicação do modelo a redes de transporte intermodal de cargas e apresenta experimento com dados do transporte inter-regional de carga geral no Brasil. Os resultados encontrados provam a viabilidade da metodologia.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

METHODOLOGY FOR HUB LOCATION  
IN TRANSPORT NETWORKS UNDER DECENTRALIZED MANAGEMENT

Adriano Dutra de Vasconcelos

March/2009

Advisor: Carlos David Nassi

Department: Transportation Engineering

This thesis proposes a methodology for solving the *hub* location problem in transport network operated *under decentralized management*. The usual *hub* location models are not suitable for this case because, in a network like this, several enterprises (offering services to them clients) may choose the transport mode and path based on several objective and subjective particular criteria, which produces variable standard operations that can be modeled only by probabilistic functions. Therefore a new model of the Uncapacitated *Hub* Location Problem was developed, whose mathematical programming formulation includes some parameters obtained by Behavioral Theory applied to transportation – more specifically, by the Logit method. The methodology presents the model application to cargo intermodal transport and shows experiment carried out with data of a Brazilian interregional network of general cargo transport. The results demonstrate the methodology's feasibility.

## ÍNDICE DO TEXTO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO E ORIGINALIDADE .....	1
1.2. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA .....	3
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	6
<b>2. OPORTUNIDADES DE DESENVOLVIMENTO DA INTERMODALIDADE .</b>	<b>7</b>
2.1. DEFINIÇÃO ANALÍTICA DA INTERMODALIDADE .....	8
2.2. VANTAGENS DA INTERMODALIDADE .....	10
2.2.1. Redução do Consumo Energético e da Poluição .....	10
2.2.2. Redução do Número de Acidentes .....	11
2.2.3. Redução de Congestionamentos Rodoviários .....	11
2.2.4. Redução do Custo das Operações Logísticas .....	11
2.2.5. Redução das Despesas de Seguro contra Roubo .....	12
2.3. DESVANTAGENS DA INTERMODALIDADE.....	12
2.3.1. Aumento do Tempo Total de Transporte .....	12
2.3.2. Redução da Flexibilidade .....	13
2.3.3. Eliminação de Postos de Trabalho.....	14
2.4. CONDIÇÕES BÁSICAS PARA ÊXITO DA INTERMODALIDADE .....	14
2.4.1. Integração Física Viável .....	16
2.4.2. Oferta Equilibrada de Infra-Estrutura Viária.....	17
2.4.3. Eficiência Gerencial .....	17
2.4.4. Modelos Eficientes de Operação Intermodal.....	17
2.4.5. Eficiência Tecnológica .....	23
2.4.6. Emprego de Mão de Obra Qualificada .....	24
2.4.7. Existência de Regulamentação Adequada.....	24
2.4.8. Associação entre Interessados no Desenvolvimento da Intermodalidade ....	24
2.5. PRINCIPAIS RESTRIÇÕES À INTERMODALIDADE NO BRASIL.....	25
2.5.1. Restrições Devidas ao Modo Rodoviário .....	26
2.5.2. Restrições no Modo Ferroviário .....	27
2.5.3. Restrições na Cabotagem.....	29
2.5.4. Restrições no Modo Hidroviário .....	29
2.5.5. Restrições Devidas aos Terminais Intermodais.....	30
2.5.6. Restrições Devidas à Burocracia .....	31



2.6. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO .....	36
<b>3. O PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE HUBS EM REDES.....</b>	<b>38</b>
3.1. GENERALIDADES .....	38
3.2. TOPOLOGIA DE REDES COM TERMINAIS CONCENTRADORES.....	39
3.3. DEFINIÇÃO BÁSICA DO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE HUBS .....	41
3.4. TIPOS DE PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE HUBS .....	43
3.5. EVOLUÇÃO DAS FORMULAÇÕES DOS PLH COM CUSTOS FIXOS.....	47
3.6. MODELOS DE SOLUÇÃO PARA PLH-CF-AM .....	62
3.7. MODELAGEM DA ECONOMIA DE ESCALA .....	68
<b>4. A METODOLOGIA E O NOVO MODELO DE PLH PROPOSTOS.....</b>	<b>72</b>
4.1. NECESSIDADE DE NOVO MODELO DE LOCALIZAÇÃO DE HUBS .....	72
4.2. O TIPO DO NOVO MODELO DE PLH PROPOSTO.....	74
4.3. O MODELO DE OTIMIZAÇÃO PROPOSTO .....	75
4.3.1. Programação Matemática com Parâmetros Probabilísticos.....	76
4.3.2. Formulação de Programação Matemática do Modelo.....	77
4.3.3. Conceitos da Modelagem de Transportes Utilizados .....	92
4.4. ETAPAS METODOLÓGICAS.....	100
4.4.1. Modelagem da Estrutura Física da Rede .....	100
4.4.2. Modelagem da Demanda e Fluxos na Rede .....	101
4.4.3. Implementação Computacional do Problema.....	102
4.4.4. Análise Poliédrica Específica da Instância Considerada.....	102
4.4.5. Execução do Algoritmo e Interpretação de Resultados.....	102
4.4.6. Fluxograma da Metodologia.....	103
<b>5. ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>105</b>
5.1. DEFINIÇÃO DA REDE OBJETO DO ESTUDO .....	105
5.1.1. Carga Considerada.....	109
5.1.2. Caracterização da Rede Escolhida.....	110
5.2. PROPOSIÇÃO DO EXPERIMENTO .....	111
5.3. INFORMAÇÕES IMPORTANTES PARA O EXPERIMENTO.....	112
5.3.1. A Cabotagem Brasileira de Carga Geral .....	112
5.3.2. Caracterização Conceitual dos Custos no Âmbito do Experimento.....	114
5.3.3. Consideração das Economias de Escala .....	115
5.4. ELABORAÇÃO DA MATRIZ OD DE CARGA GERAL DO BRASIL .....	116
5.4.1. Contagens de Tráfego de Carga .....	118

5.4.2. Matriz OD de Referência.....	127
5.4.3. Listas de Pares OD Contribuintes dos Postos de Contagens.....	127
5.4.4. O Processo de Obtenção da Matriz de Demanda Propriamente Dito.....	128
<b>5.5. FLUXOS VIA HUBS PRÉ-EXISTENTES.....</b>	<b>132</b>
5.5.1. Cálculo do Valor Total do Serviço de Transporte.....	134
5.5.2. Cálculo do Tempo Total de Transporte.....	136
5.5.3. O Programa de Cálculo dos Tempos e Valores de Frete.....	137
5.5.4. Definição dos Parâmetros das Funções de Divisão Modal.....	138
5.6. ESTIMAÇÃO DA PROBABILIDADE $P_{ijkm}$ .....	143
<b>5.7. EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO .....</b>	<b>144</b>
5.7.1. Implementação do Modelo .....	147
5.7.2. Resultados.....	148
<b>6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>152</b>
6.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	154
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>155</b>
<b>ANEXO 1 - Macro ParesODContribuintesNasContagensDeTrafego.RSC .....</b>	<b>161</b>
<b>ANEXO 2 – Programa GeracaoMatrizOD.MOS .....</b>	<b>164</b>
<b>ANEXO 3 - Macro ODMatrix_1.M .....</b>	<b>167</b>
<b>ANEXO 4 – Macro ODMatrix_2.m .....</b>	<b>170</b>
<b>ANEXO 5 – Macro Temp&amp;ValoresFreteDosParesOD_Cabot2.RSC .....</b>	<b>172</b>
<b>ANEXO 6 – Macro FuncaoDeDivisaoModal.m.....</b>	<b>182</b>
<b>ANEXO 7 – Programa NewHubsLocation.MOS .....</b>	<b>187</b>
<b>ANEXO 8 – Simplificação da Formulação de Maximização da Entropia .....</b>	<b>197</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1.1 – Exemplos de corredores de transportes no Brasil .....	4
FIG. 2.1 – Distribuição do transporte de cargas em tku .....	8
FIG. 2.2 – Congestionamento em rodovia (LIEBERT, 2008).....	11
FIG. 2.3 – Exemplos de tipos de sistemas de conexão.....	14
FIG. 2.4 – Esquema de um modelo <i>hub-and-spoke</i> .....	18
FIG. 2.5 – Esquema de um <i>Agile Port System</i> .....	21
FIG. 2.6 – Transferências de carga para trens em um EMT.....	22
FIG. 2.7 – Transferências de cargas em um IIC.....	23
FIG. 2.8 – Circuito vicioso do transporte rodoviário de carga .....	27
FIG. 2.9 - Investimentos governamentais na RFFSA.....	28
FIG. 3.1 – Exemplos de tipos de redes com terminais concentradores .....	40
FIG. 3.2 – Tipos de economia de esc. ....	70
FIG. 4.1 – Exemplo de instalação de um conjunto de novos <i>hubs</i> em uma rede .....	76
FIG. 4.2 – Fluxograma da metodologia proposta.....	104
FIG. 5.1 – Rede <i>hub-and-spoke</i> selecionada para estudo.....	106
FIG. 5.2 – Divisão do Brasil em 601 micro-regiões homogêneas.....	107
FIG. 5.3 – Linha de cabotagem n°. 1 da Log-In.....	114
FIG. 5.4 – Função de valor de frete rodoviário (distância > 1000 km .....	134
FIG. 5.5 – Função de valor de frete rodoviário (distância < 800 km).....	135
FIG. 5.6 – Áreas de influência de 12 portos considerados no experimento .....	146

## ÍNDICE DE TABELAS

TAB. 2.1 – Estimativas de Consumo de Energia no Transporte de Cargas .....	10
TAB. 2.2 – Potencial de adequação da matriz de produtos de alto valor agregado .....	16
TAB. 2.3 – Diversidade Legal no Transporte Porta a Porta .....	35
TAB. 3.1 – Sistema de Classificação de Redes com Terminais Concentradores .....	40
TAB. 3.2 – Classificação de Problemas de Localização de <i>Hubs</i> com Custos Fixos ...	45
TAB. 3.3 – Substituições de restrições propostas por Skorin-Kapov e Hamacher .....	59
TAB. 3.4 – Síntese sobre os principais modelos descritos para solução do PLH-CF ...	68
TAB. 4.1 – Comparação de quantidade de variáveis de fluxo ( $x_{ijkm}$ ) .....	85
TAB. 4.2 – Frações da demanda de $ij$ para cada caminho via <i>hubs</i> .....	90
TAB. 5.1 – Dados sobre as linhas de cabotagem de carga geral .....	113
TAB. 5.2 – Localização dos postos de contagem de tráfego do CENTRAN .....	118
TAB. 5.3 – Fluxos anuais de cargas nos arcos bases dos postos de contagem .....	123
TAB. 5.4 – Fluxos de carga geral passando pelos principais portos nacionais .....	142
TAB. 5.5 – Parâmetros $a = \{a_1, a_2\}$ das funções de probabilidade .....	143
TAB. 5.6 – Aplicações do novo modelo .....	150

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das principais metas de planejamento estratégico do Ministério dos Transportes do Brasil é o reequilíbrio da matriz modal de movimentação de cargas no País, que atualmente é 58% rodoviária, 26% ferroviária, 15% de cabotagem e menos de 1% aérea (CENTRAN, 2007). Para atingir este objetivo, algumas ações fundamentais foram planejadas, entre elas a construção de infra-estrutura de terminais intermodais. Assim, surgiu o desafio de localizar adequada e imparcialmente estes investimentos (uma das principais motivações desta tese), o que resultou na contribuição fundamental do trabalho: a criação de um novo modelo do Problema de Localização de *Hubs* (estruturado segundo a teoria da Otimização Combinatória).

Devido à referida motivação inicial, o contexto de incentivo à intermodalidade foi muito utilizado nas referências às aplicações práticas do modelo criado, principalmente nos experimentos realizados, que consistiram de análises da migração de fluxos de cargas rodoviários para os demais modos a partir da instalação de novos terminais concentradores intermodais (*hubs*). Por isso um capítulo foi inteiramente dedicado à abordagem deste tipo de transporte em seus aspectos mais relacionados ao objetivo principal desta pesquisa.

### 1.1. OBJETIVO E ORIGINALIDADE

O objetivo desta tese é composto de dois itens inter-relacionados:

- o desenvolvimento de um novo modelo para a solução do problema de localização de *hubs* em uma rede de transportes do tipo *hub-and-spoke* (detalhado em 2.4.4.1) que não possua um gerenciamento centralizado;
- a elaboração de uma metodologia que oriente a aplicação prática deste modelo fundamental.

Os modelos convencionais do Problema de Localização de *Hubs* (PLH, abordados no terceiro capítulo) são aplicáveis apenas a redes em que todo o sistema está subordinado a uma administração central, que estabelece um critério único de escolha do melhor caminho. Como exemplo destas, tem-se os sistemas de transportes de encomendas expressas (e. g., Correios, FedEx, DHL e UPS) e as grandes empresas de

transporte aéreo.

Assim sendo, estes modelos convencionais não se adequam (o que é explicado no Capítulo 4) à realidade de uma rede caracterizada por gerenciamento “descentralizado”. Para exemplificar este tipo de rede, toma-se o transporte doméstico de contêineres em um país, onde as diversas empresas (oferecendo serviços a seus variados clientes) podem escolher o caminho e o modo de transporte a ser utilizado, baseando-se em critérios bem diversos. Mesmo que este mercado livre não pareça sequer um sistema organizado, trata-se de uma rede de transportes e que ainda pode ser modelada probabilisticamente. Porém, neste caso, a solução do PLH (Problema de Localização de *Hubs*) torna-se mais complexa, o que vem a ser a inovação mais importante desta Tese.

O conjunto da metodologia reúne orientações técnicas que auxiliam planejadores na identificação e análise de oportunidades de aplicação de recursos na expansão de redes de transportes. Tais orientações de planejamento atendem a interesses tanto de gestores de recursos públicos (preocupados por exemplo em equilibrar uma matriz modal de transportes) quanto de instituições privadas (como operadoras de sistemas de transportes de grandes capacidades – ferrovias, hidrovias, etc – interessadas em atrair os clientes da concorrência, principalmente aqueles que utilizam apenas o transporte rodoviário).

O objetivo geral do trabalho (descrito no primeiro parágrafo deste item) pode ser decomposto em metas mais específicas, conforme se discriminam a seguir.

- Analisar as principais características que influenciam o crescimento da prática da intermodalidade (ênfatisando o caso do Brasil), como forma de apresentar o cenário em que a aplicabilidade do modelo criado será demonstrada; o que inclui a abordagem de histórico; vantagens e desvantagens; condições necessárias e restrições (capítulos 1 e 2).
- Identificar as técnicas de Otimização mais adequadas para a formulação e a solução dos problemas de localização de terminais concentradores com consideração dos custos fixos (PLH-CF) – métodos clássicos e heurísticos (Capítulo 3).
- Analisar os aspectos da Teoria de Modelagem de Transportes que possibilitam a aplicação de um modelo de programação matemática de localização a uma rede sob gerenciamento descentralizado (item 4.3.3).
- Propor o modelo de programação matemática objeto principal desta

pesquisa (item 4.3).

- Propor a metodologia de aplicação do modelo (item 4.4).
- Realizar um estudo de caso prático do Brasil como forma de experimentação desta tese (Capítulo 5).
- Apresentar as conclusões sobre todo trabalho desenvolvido (Capítulo 6).

## 1.2. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

A localização de *hubs* em redes é um problema de Otimização Combinatória da classe NP-Completo (*Nondeterministic Polynomial Time Complete*), na qual se enquadra um problema para o qual não se conhece algoritmo determinístico que o resolva em tempo polinomial (apenas em exponencial). Na solução destes problemas, uma rede com poucos vértices já é capaz de tornar inviável qualquer algoritmo determinístico conhecido. Ele é do tipo Completo porque, caso venha a ser resolvido por algoritmo determinístico em tempo polinomial, todos os demais problemas NP ou NP-Completo também o serão.

Assim, a alta complexidade do Problema de Localização de *Hubs* aliada a sua ampla aplicabilidade no planejamento e operação de redes de toda natureza (transportes, comunicação, etc) faz, das pesquisas para sua solução, um trabalho de grande importância.

No âmbito das redes de transportes de cargas, somente havia sido estudada a solução do problema para o subconjunto daquelas redes operadas por gerenciamento centralizado. Portanto, ao criar as condições de solução do problema para o outro grande subconjunto (de todas as demais redes que funcionam sob administração *descentralizada*), a presente pesquisa gera uma contribuição relevante para a solução dos problemas de localização de *hubs*.

Além do exposto, uma segunda justificativa para a realização da presente pesquisa é a contribuição específica para o transporte intermodal de cargas, encontrada nos itens que tratam da aplicação do modelo (principalmente os relacionados ao experimento). Estrategicamente, os avanços científicos no planejamento e operação de redes intermodais propiciam uma melhor e maior utilização deste tipo de transporte, o que tem consequentes benefícios de economias de escala, colaborando para diminuir uma das maiores **desvantagens** competitivas desta Nação: os altos gastos e desperdícios na movimentação de suas riquezas, que prejudicam seriamente seu desenvolvimento

perante o mercado mundial.

O Brasil possui corredores intermodais de transporte dotados de hidrovias, linhas de cabotagem e ferrovias (Figura 1.1), cujas capacidades de fluxo de carga não estão esgotadas e ainda podem ser expandidas, de modo que mais cargas precisam ser atraídas para tais corredores – principalmente aquelas movimentadas exclusivamente por modo rodoviário.



FIG. 1.1 – Exemplos de corredores de transportes no Brasil (Hidrov. Paraná-Paraguai, Cabotagem Mercosul e Malha Ferroviária – ALL, 2007)

A terceira justificativa é a aplicação militar do trabalho. Em casos de conflitos e



concentrações de tropas em determinadas regiões, são criadas situações em que há necessidade de se instalar toda uma nova cadeia de suprimentos, uma vez que muitas das hipóteses de emprego de tropas no País estão previstas em regiões normalmente pouco povoadas e sem uma cadeia logística à altura do Esforço de Guerra. Neste intuito a localização de novos terminais é um fator fundamental num planejamento que necessitaria ser realizado em pouco tempo. E, embora as operações de guerra estejam subordinadas a um órgão central governamental, as Forças Armadas “não” realizariam a maior parte da logística transnacional. Portanto as redes de transportes (nas cadeias de suprimentos desde os centros produtores do País até os pontos de emprego de tropas) continuariam a funcionar com empresas privadas (mobilizadas), usufruindo de considerável liberdade para planejar seus negócios, seus trajetos e modos de transporte de tal forma que a localização dos terminais concentradores seria planejada ainda com uma rede sob gerenciamento descentralizado.

Uma quarta justificativa é a realização de uma avaliação das técnicas de Otimização passíveis de serem utilizadas nos problemas de localização de terminais concentradores (incluindo-se aí os métodos clássicos e heurísticos).

Outra contribuição desta tese é a abordagem sobre valores de fretes e demais fatores que influenciam a opção modal no transporte brasileiro de cargas, considerando seus valores tangíveis e intangíveis. Atualmente, nem todos os métodos de cálculo e parâmetros médios praticados no Brasil se encontram explícitos em bibliografia acessível, principalmente os referentes aos modos ferroviário e aquaviário.

A sexta justificativa se fundamenta na Teoria de Gestão do Conhecimento, que procura tratar o *know-how* das empresas como um ativo central, produtivo e de grande importância estratégica para o sucesso dos negócios. De acordo com PERRET et al. (2004), tal gestão pode ser definida como o processo de sistematicamente administrar e desenvolver o armazenamento de conhecimento numa instituição. Uma de suas principais atividades é a identificação do conhecimento tácito dos colaboradores e a transformação do mesmo em conhecimento explícito e formalizado. No campo dos transportes, há muito conhecimento de natureza tácita a ser formalizado. E é neste ponto que se identifica mais um aspecto importante da presente pesquisa, na medida em que, ao longo da mesma, buscou-se coletar informações e experiências tácitas sobre intermodalidade e otimização, transformando-as em conhecimento formalizado. De tal forma que o produto final (o trabalho completo) constitui uma ferramenta de grande utilidade no planejamento de transportes, já que disponibiliza um conjunto extenso (e

antes disperso) de conhecimentos, de uma maneira que facilita seu acesso aos profissionais interessados; permitindo que estes se orientem de um modo rápido e prático, sem a necessidade de dedicarem tempo excessivo à verificação e seleção de ampla bibliografia.

### **1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO**

O presente trabalho está dividido em seis capítulos.

O primeiro reúne informações introdutórias, a descrição do objetivo, a justificativa do trabalho e esta própria apresentação da estrutura do texto.

No segundo capítulo, é feita uma análise das principais características que influenciam o crescimento da prática da intermodalidade (com ênfase no caso brasileiro), visando apresentar o cenário em que o objetivo desta tese se insere (o contexto de estímulo ao desenvolvimento do transporte intermodal). Entre estas características se destacam as vantagens e desvantagens da intermodalidade; as condições necessárias para seu êxito; além das principais restrições ao transporte intermodal no País.

O Capítulo 3 encerra o estado da arte do Problema de Localização de Terminais Concentradores em Redes de Transporte com Custos Fixos. Onde são abordados os seguintes tópicos: classificação, modelos de formulações matemáticas e técnicas de solução dos mesmos (métodos clássicos e heurísticos).

O quarto capítulo foi reservado para a proposição do modelo. É iniciado com uma explicação sobre a necessidade de se desenvolver tal modelo. Em seguida, descreve-se toda a formulação de programação matemática do mesmo. Por fim, é concluído com a análise das técnicas relativas à Teoria de Modelagem de Transportes que vêm possibilitar a aplicação de um modelo de programação matemática de localização a uma rede administrada de forma descentralizada.

No Capítulo 5, é relatado todo o estudo de caso prático desenvolvido em um sistema de transportes do Brasil, como forma de experimentação desta tese.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões.

## 2. OPORTUNIDADES DE DESENVOLVIMENTO DA INTERMODALIDADE

Na aplicação do modelo de otimização criado, destacou-se o contexto específico do transporte intermodal de cargas; devido à motivação original da pesquisa (referida no início do Capítulo 1). Portanto julga-se adequada a elaboração de um capítulo dedicado à análise das principais características que auxiliam ou dificultam o crescimento do transporte intermodal de cargas. Para que, conhecendo o amplo campo de possíveis ações para este progresso, seja possível identificar a área específica em que este trabalho se concentra, a fim de executá-lo da forma mais profícua para todo o conjunto e garantir sua aplicabilidade como contribuição científica.

Uma importante observação a esta altura é que a prática da intermodalidade não deve ter como objetivo o benefício de um modo específico de transporte em detrimento dos outros, já que tal conduta poderia causar prejuízos fatais aos modos secundários. Assim, a própria prática levaria ela mesma a falência.

Ao se empregar a intermodalidade, o objetivo principal do sistema deve ser a utilização do potencial máximo do conjunto de todos os modos viáveis, o que vem a ser uma meta coerente com a filosofia logística da obtenção do custo mínimo total.

Hoje, mesmo com a conscientização de agentes públicos da necessidade da intermodalidade, ainda existe uma forte cultura do mercado brasileiro de opção pelo modo rodoviário, além de uma considerável falta de conhecimento sobre as vantagens e desvantagens dos demais modos.

Alia-se a este costume, o fato de que a disponibilidade de infra-estrutura rodoviária no País (por razões já referidas) é significativamente maior do que a das outras modalidades; sendo 17,3 km de rodovias por 1000 km<sup>2</sup> de território nacional contra 3,4 km / 1000 km<sup>2</sup> no modo ferroviário e 2,0 km / 1000 km<sup>2</sup> no modo hidroviário (CEL/COPPEAD, 2002).

É importante ressaltar que não se está afirmando que haja um excesso absoluto de rodovias no Brasil, já que a densidade de rodovias (referida no parágrafo anterior) ainda é menor do que no Canadá, na China e no México (CEL/COPPEAD, 2002). O que se defende é que existiu, ao longo da História, um excesso de preferência pelo investimento no modo rodoviário em detrimento dos demais. O ideal, inclusive, é que houvesse mais rodovias do que o País possui hoje, mas também que houvesse muito mais ferrovias e hidrovias, de forma que a disponibilidade de infra-estrutura de

transportes fosse maior e principalmente mais equilibrada.

A Figura 2.1 ilustra de uma forma bastante prática estas observações sobre a distribuição da atividade de transporte de carga entre as principais modalidades (no Brasil e em outros países). No gráfico, o eixo horizontal representa a parcela transportada por modo ferroviário; já o eixo vertical se refere ao rodoviário; e o diâmetro do círculo de cada país é proporcional à utilização do modo aquaviário.

Observa-se que, pelas suas grandes dimensões, o círculo do Brasil deveria estar localizado junto aos dos países com grandes áreas territoriais, as quais justificam uma maior utilização das modalidades ferroviária e aquaviária. Contudo tem-se uma distribuição modal similar a de países com pouca extensão física, donde se pode concluir que a utilização do transporte no Brasil não está otimizada e também que a intermodalidade ainda não é satisfatoriamente praticada.

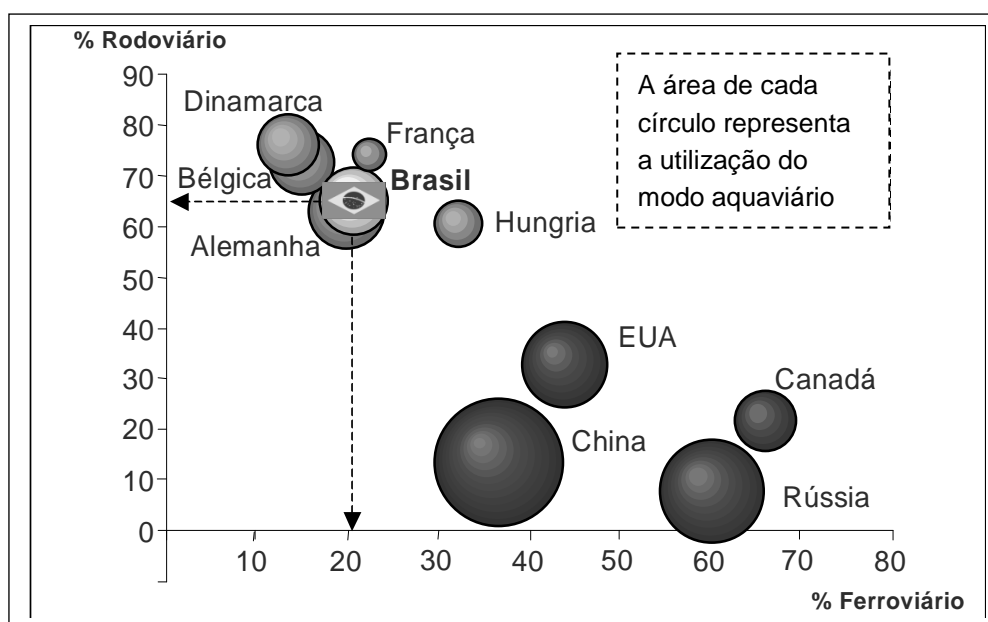


FIG. 2.1 – Distribuição do transporte de cargas em tku (CEL/COPPEAD, 2002)

## 2.1. DEFINIÇÃO ANALÍTICA DA INTERMODALIDADE

Apesar de intermodalidade e multimodalidade possuírem significados originais similares, a legislação no Brasil e em outros países estabeleceu uma importante diferença entre as mesmas.

A lei federal de número 9611 de 1998 restringiu o significado do termo multimodalidade no âmbito dos transportes do Brasil, transformando-o num caso

particular de intermodalidade (como se define no terceiro parágrafo a seguir).

O transporte intermodal é entendido como aquele que ocorre por meio de mais de uma modalidade. Uma referência é a definição de transporte intermodal publicada pela Conferência Europeia dos Ministros dos Transportes, em seu documento de 1993, intitulado *Terminology on Combined Transport*:

*“the movement of goods in one and the same loading unit or vehicle, which uses successively several modes of transport without handling the goods themselves in changes modes”.*

MULLER (1995), ao definir intermodalidade, enfatiza a necessidade de eficiente integração entre os modos, conforme se verifica a seguir:

*“intermodal transportation is the concept of transporting passengers and freight in such a way that all the parts of the transportation process, including information exchange, are efficiently connected and coordinated, offering flexibility”.*

No Brasil o transporte do tipo multimodal ficou definido como aquele intermodal que se enquadra exatamente na referida lei, atendendo a todos os seus artigos; dentre os quais o Art. 2º apresenta a restrição mais importante:

“Transporte Multimodal de Cargas é aquele que, regido por um único contrato, utiliza duas ou mais modalidades de transporte, desde a origem até o destino, e é executado sob a responsabilidade única de um Operador de Transporte Multimodal” (Lei 9611/98, Art. 2º).

A definição legal específica de multimodalidade, transformando-a num caso particular do termo intermodalidade, fez surgir um terceiro conceito para definir o transporte intermodal que não seja multimodal. Trata-se do transporte segmentado, cuja característica mais comum é que, ao longo da cadeia intermodal, cada operador se responsabiliza pela carga durante o tempo que a mesma esteja sob sua custódia, ainda que haja um coordenador geral de toda a cadeia.

## 2.2. VANTAGENS DA INTERMODALIDADE

### 2.2.1. Redução do Consumo Energético e da Poluição

O transporte intermodal, apesar do ônus de sua maior complexidade, tem como uma de suas vantagens a redução do consumo energético, já que utiliza meios com capacidades muito grandes (comboios ferroviários e aquaviários) que podem transportar cargas com menos gasto de energia.

Conseqüentemente, com menos combustão, também há menos emissão de poluentes atmosféricos e sonoros por parte destes veículos energeticamente mais eficazes.

THOMPSON (1994) realizou uma exaustiva pesquisa na literatura sobre consumo energético nos transportes e conseguiu estabelecer uma estimativa sobre as diferenças de consumo entre as diversas modalidades (conforme apresenta a Tabela 2.1). Certamente, tais valores médios não podem ser tomados como números absolutos para análises numéricas de precisão, haja vista que as operações de transporte ocorrem em condições muito variáveis que dependem dos equipamentos, da carga, das distâncias, das velocidades e de muitos outros fatores, o que gera grandes desvios padrões nas estatísticas. No entanto, a título de análise conceitual, a consolidação de dados da Tabela 2.1, oferece uma ideia bastante útil e válida para o estudo e planejamento de nível estratégico.

TAB. 2.1 – Estimativas de Consumo de Energia no Transporte de Cargas (kJ/tkm)

Modo de Transporte	Mínimo	Médio	Máximo
Aéreo	2.000	3.000	12.000
Dutoviário	200	250	2.000
Ferrovário	100	200	2.000
Rodoviário			
Caminhão Pequeno		6.000	8.000
Caminhão Médio		4.000	6.000
Caminhão Grande		1.000	2.000
Aquaviário		200	1.100

Fonte: THOMPSON, 1994.

### **2.2.2. Redução do Número de Acidentes**

Segundo CEL/COPPEAD (2002), o número de mortes por quilômetro nas estradas brasileiras é de 10 a 70 vezes maior que nos países do G-7 (grupo dos sete países mais ricos), e cerca de 62% dos leitos de traumatologia dos hospitais são ocupados por acidentados de trânsito.

O índice de acidentes no transporte rodoviário do Brasil é bastante alto devido a características específicas desta modalidade, as quais estão descritas no item 2.5.1.

Considerando os menores índices das demais modalidades, pode-se afirmar que a intermodalidade contribui para a redução destes graves problemas.

### **2.2.3. Redução de Congestionamentos Rodoviários**

A transição das cargas do transporte unimodal (quase sempre rodoviário) para o intermodal, certamente, reduz a quantidade de veículos nas rodovias; o que melhora o nível de serviço dessas estradas sem necessidade de investimentos nas mesmas, gerando também o impacto positivo da redução de congestionamentos.



FIG. 2.2 – Congestionamento em rodovia (LIEBERT, 2008)

### **2.2.4. Redução do Custo das Operações Logísticas**

Um dos maiores benefícios do transporte intermodal é a racionalização dos custos totais, garantida por certas características básicas do funcionamento do sistema, as quais

são tratadas a seguir.

A primeira é a economia de escala, obtida com o emprego de veículos de grandes capacidades de carga e de terminais concentradores (*hub*).

A segunda é (quando aplicável) a unitização da carga (uso de contêiner, *pallet* ou outro padrão), que confere grande produtividade nos deslocamentos, transferências, conferências, armazenagens, etc. Gerando economias inclusive de embalagens. De tal modo, por exemplo, que o próprio transporte ferroviário com carga geral unitizada torna-se mais produtivo que o ferroviário de carga geral tradicional, já que, no primeiro, o tempo de imobilização dos vagões nos terminais é menor.

A terceira é a possibilidade de escolha entre os distintos modos de transporte, permitindo a utilização do potencial máximo das modalidades mais adequadas em cada situação e cenário.

Outra vantagem para as operações logísticas é que os terminais intermodais podem ser compartilhados para a realização de diversas atividades logísticas de valor agregado.

Apesar de os custos das operações de transbordo serem um ônus da intermodalidade, estes custos são menores que as economias de escalas geradas pelo deslocamento nos casos em que o transporte intermodal é empregado. De modo que, quanto maior for a distância entre origem e destino, menor será o impacto dos custos das transferências e mais vantajosa será a intermodalidade.

### **2.2.5. Redução das Despesas de Seguro contra Roubo**

Segundo CEL/COPPEAD (2002), o prejuízo por roubo de cargas nas rodovias chegou a mais de 450 milhões de reais em 2001, e este número de ocorrências é quatro vezes maior que em 1994.

Com a utilização de outros modos de transportes não-rodoviários, certamente a despesa com seguro contra roubo tende a ser reduzida, uma vez que tais modos não sofrem tanto com esta ação ilícita.

## **2.3. DESVANTAGENS DA INTERMODALIDADE**

### **2.3.1. Aumento do Tempo Total de Transporte**

O tempo total de um frete por via intermodal é normalmente maior que aquele feito



exclusivamente por modo rodoviário.

Entretanto é importante observar que as novas soluções buscam reduzir cada vez mais esta diferença, como, por exemplo, os sistemas baseados em trens expressos dedicados e de horários definidos que trafegam por linhas troncos entre terminais concentradores (*hubs*). Inclusive tais composições têm número fixo de vagões, o que evita o dispêndio de tempo com reconfiguração dos comboios.

### **2.3.2. Redução da Flexibilidade**

A flexibilidade do transporte rodoviário no trajeto porta a porta (unimodal) é uma vantagem sobre o sistema intermodal. No entanto já existem duas estratégias dos operadores intermodais para reduzir sua desvantagem neste aspecto.

A primeira se refere às associações dos terminais intermodais com equipes de caminhoneiros, de modo que estes, provendo serviços com alto nível de integração e eficiência, possam realizar a coleta de carga (na área de influência do terminal para remessa via outra modalidade de maior porte, e. g. ferrovia) e também os serviços de distribuição da carga desconsolidada em outro terminal intermodal (após ser transportada numa linha de grande capacidade do sistema). Este sistema é a essência desta tese, encontrando-se descrito no item 2.4.4.1 e modelado nos capítulos 3, 4 e 5.

A segunda estratégia (ilustrada na figura a seguir) é a criação de terminais intermediários que conectem as linhas tronco do sistema, pois uma rede com terminais concentradores apresenta maiores frequência, regularidade e flexibilidade que um sistema sem terminais intermediários de transbordo. Para compreender esta vantagem, considere o exemplo de uma composição ferroviária partindo de um terminal representado por um círculo pequeno na Figura 2.3. No primeiro sistema, a referida composição só poderia oferecer frete para um único terminal de destino. Por outro lado, no segundo sistema (dotado de terminais de transbordo, *hubs*), poderia ser oferecido serviço para quaisquer dos outros sete terminais, o que potencializa a frequência, a regularidade e a flexibilidade do serviço.

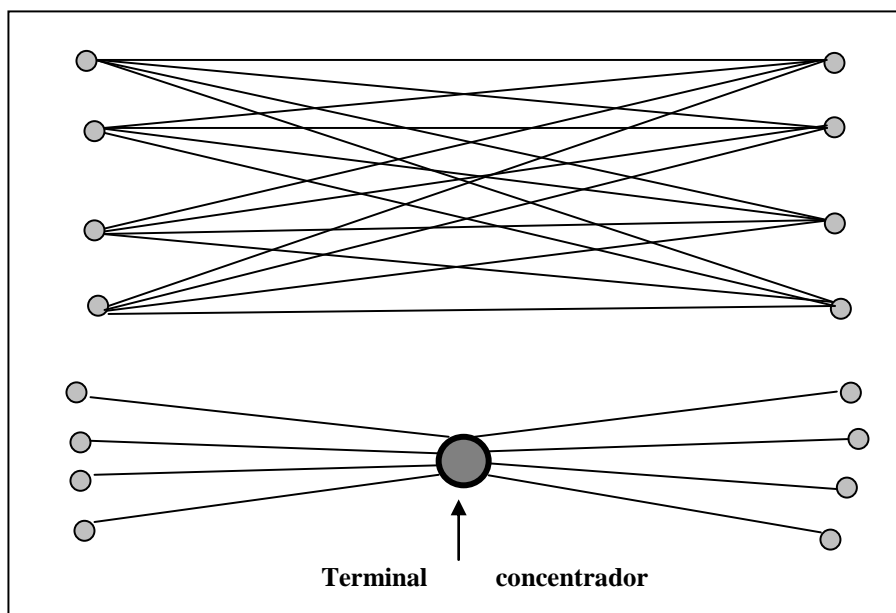


FIG. 2.3 – Exemplos de tipos de sistemas de conexão

### 2.3.3. Eliminação de Postos de Trabalho

Como cada caminhão precisa de um motorista, obviamente, a substituição de vários caminhões por um único comboio de grande capacidade gera uma quantidade considerável de desemprego. Ainda que sejam considerados os trabalhadores dos terminais intermodais.

## 2.4. CONDIÇÕES BÁSICAS PARA ÊXITO DA INTERMODALIDADE

Ao longo deste item, são apresentadas as condições fundamentais com as quais um sistema intermodal de transportes se torna atraente na visão do usuário (UNCTAD, 1996):

- suficiente integração física;
- oferta equilibrada de infra-estrutura viária;
- eficiência gerencial;
- modelos eficientes de operação intermodal;
- eficiência tecnológica;
- emprego de mão-de-obra qualificada;
- existência de regulamentação adequada;
- associação entre interessados no desenvolvimento da intermodalidade.

Estas oito condições fundamentais detalhadas em seus respectivos subitens constituem uma base sólida com a qual um sistema intermodal pode atingir altos níveis nos atributos considerados mais importantes pelos clientes quando elegem uma cadeia logística a ser utilizada.

Segundo FLEURY (2002), estes atributos são os seguintes (nesta ordem de prioridade):

- confiabilidade, isto é, capacidade de cumprir aquilo que foi contratado, como prazos de entrega, níveis de serviço, segurança, informações, etc;
- preço;
- flexibilidade operacional e comercial, ou seja, capacidade de se adaptar operacional e financeiramente às particularidades e inovações dos clientes;
- saúde financeira, que mostra a capacidade do transportador de acompanhar o crescimento de cada cliente (tanto no volume de negócios quanto nos avanços tecnológicos);
- qualidade do pessoal operacional, isto é, a educação fundamental, a capacitação técnica e habilidade comportamental, compondo o conjunto de valores que permitem o funcionário contribuir para a qualidade do serviço e conseguir acompanhar o crescente desenvolvimento tecnológico;
- disponibilidade de informações sobre as operações, de modo que os clientes possam monitorar sua carga e acompanhar o desempenho dos serviços contratados.

Da mesma maneira, MONTENEGRO (2006) também apresenta sua análise sobre as características que garantem “a eficiência do sistema como um todo” (listadas a seguir), as quais são bastante coerentes com os critérios de seleção dos clientes (definidos por FLEURY, no parágrafo anterior):

- confiabilidade do serviço (*on time in full*, OTIF);
- custo competitivo;
- flexibilidade, capacidade de recuperação de falhas e atrasos, bem como adaptabilidade a oscilações;
- segurança na execução e, principalmente, nas transições entre modalidades;
- visibilidade da carga em todas as etapas do processo;
- precisão e portabilidade documental;
- abrangência global.

Como forma de ressaltar a importância de se criar as condições básicas para êxito da intermodalidade no Brasil (objetivo deste item 2.4), relata-se os resultados de um estudo realizado pela ANTT e UFSC (ANTT, 2003), que confirma o potencial de desenvolvimento do transporte intermodal no Brasil quando as condições para o seu sucesso forem atendidas.

Este estudo mostrou através de pesquisas de preferências declaradas de embarcadores que, em um determinado cenário de investimento em melhorias na qualidade dos serviços prestados pelos transportadores ferroviários e aquaviários (cabotagem), a matriz de transporte brasileira para cargas de alto valor agregado poderia ser modificada conforme a Tabela 2.2 – o que aumentaria bastante a racionalização das soluções logísticas.

TAB. 2.2 – Potencial de adequação da matriz modal de produtos de alto valor agregado

Modalidades	Situação Atual	Situação Potencial (com melhorias)
Cabotagem	4,5 %	54,3 %
Ferroviário	8,2 %	24,5 %
Rodoviário	87,0 %	21,0 %

Fonte: ANTT, 2003.

Os valores desta tabela são referentes a apenas 15% do universo de produtos de alto valor agregado produzidos no Brasil. Além disso, dentro dessa amostra, vários trechos apresentaram fluxos incompatíveis com a adoção da intermodalidade. De modo que os números da Situação Potencial representam, dentro dos 15% do mercado pesquisado, cerca de doze rotas intermodais com maior quantidade de movimentação as quais se mostraram economicamente viáveis para os investimentos sugeridos no referido estudo.

#### **2.4.1. Integração Física Viável**

Intermodalidade não existe sem a integração física garantida por adequados terminais de transferência. Portanto a instalação de novos terminais, assim como o desenvolvimento daqueles já existentes, é condição fundamental para o incentivo do transporte intermodal.

### **2.4.2. Oferta Equilibrada de Infra-Estrutura Viária**

Não é possível optar por um transporte intermodal quando as localidades de origem e destino estão conectadas apenas por um tipo de via de transporte. Apesar de esta situação ocorrer frequentemente (principalmente em trajetos entre localidades próximas), existem corredores de transporte de carga, com grande demanda de fretes ferroviários e aquaviários, que oferecem apenas infra-estrutura rodoviária como opção. Como é o caso, por exemplo, da ligação entre o estado de Goiás e os estados do Pará e Maranhão. Trata-se obviamente de um caso de oferta “desequilibrada” de infra-estrutura viária.

Portanto o investimento na construção de vias de transporte não rodoviário equilibraria a oferta entre os modos e certamente incentivaria a prática da intermodalidade no País.

### **2.4.3. Eficiência Gerencial**

Além da existência de um conjunto adequado e bem distribuído de vias e terminais, é preciso que essa infra-estrutura seja operada de forma eficaz e competitiva. E quatro fatores administrativos são de fundamental importância para este sucesso:

- eficiência gerencial;
- modelos eficientes de operação intermodal;
- tecnologias adequadas (equipamentos, veículos e informatização);
- emprego de mão-de-obra qualificada.

Nos subitens 2.4.4, 2.4.5 e 2.4.6 são abordados respectivamente os três últimos fatores. Quanto ao primeiro, julga-se importante citar alguns exemplos de eficientes métodos e de conceitos de gestão que, nas últimas duas décadas do século XX, tornaram-se amplamente utilizados em grandes empreendimentos: gerência de qualidade total, *supply chain management*, globalização, reengenharia, multimodalidade (item 2.1), SIG (sistema de informações gerenciais) e comércio eletrônico

### **2.4.4. Modelos Eficientes de Operação Intermodal**

A utilização de métodos especializados para operar os sistemas intermodais

também é uma forma melhorar seus desempenhos nas cadeias logísticas.

Existem modelos de operação intermodal bastante utilizados em todo o Mundo devido à eficiência que normalmente proporcionam aos sistemas.

Neste item, são apresentados dois destes modelos consagrados e também um terceiro que se destaca por se tratar de uma técnica recém desenvolvida e com vantagens muito interessantes para alguns casos de aplicação. São eles:

- modelo *hub-and-spoke* (baseado em terminais concentradores);
- trens expressos;
- terminal de contêineres do tipo *Agile Port System* (FRANKE, 2001).

#### 2.4.4.1. Modelo *hub-and-spoke*

A estratégia principal deste modelo é procurar agrupar, em veículos com grandes capacidades, as cargas que costumam ser transportadas por longas distâncias em diversos veículos de pouca capacidade.

Um exemplo deste processo é a construção de uma ferrovia ou hidrovia ao longo de um corredor de transportes atendido apenas pelo modo rodoviário. Obviamente, após a conclusão da obra, as cargas serão atraídas para o novo eixo tronco de transporte. E, então, o transbordo será realizado em terminais concentradores do referido eixo, os quais são conhecidos por terminais *hub*. Sendo assim, algum trajeto de transporte secundário é necessário entre os terminais concentradores (*hub*) e a “porta” do cliente (a não ser quando o terminal encontra-se dedicado a um cliente específico). Este trajeto secundário é conhecido como *spoke* e, nele, trafegam os veículos chamados *feeders*.

O esquema da Figura 2.4 ilustra o modelo *hub-and-spoke* do transporte intermodal.

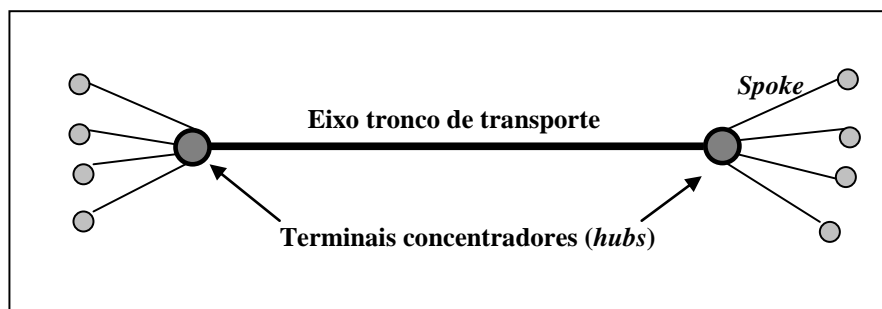


FIG. 2.4 – Esquema de um modelo *hub-and-spoke*

Na maioria dos casos, o maior benefício deste sistema é a economia de escala, enquanto a desvantagem principal é o tempo de transporte mais longo.

Não é difícil perceber que algumas condições (discriminadas a seguir) influenciam bastante na garantia de viabilidade de um sistema *hub-and-spoke* intermodal.

- Uma distância grande entre os pontos de origem e destino das cargas faz com que o frete via *hubs* seja suficientemente mais barato que o do transporte direto (unimodal).
- Uma demanda grande por transporte na área de influência do terminal distribui melhor os custos fixos intermodais.
- A existência de tipos de cargas características de modalidades de grande capacidade – as cargas de maior densidade, as containerizáveis, as não urgentes, as de valor não excessivo (custo de estoque em trânsito), etc – pode assegurar uma fatia de mercado cativa do sistema.
- Também é importante o *hub* atender o conceito de Plataforma Logística, dispondo de áreas especializadas (para recebimento, consolidação, desconsolidação, armazenagem, processamento de pedidos, expedição, embalagem e outras atividades de valor agregado), integração eficiente entre modalidades (com bons sistemas de gerenciamento, de transbordo e de informações) e uma frota bem dimensionada de veículos de coleta e distribuição.

As características mais apropriadas para uma classificação “descritiva” de sistemas *hub-and-spoke* intermodais<sup>1</sup> são: a organização espacial da rede de transporte, as modalidades envolvidas, o tipo de unidade de carga a ser processada, os tipos dos equipamentos de transferência e o nível de sincronização entre os veículos.

O sincronismo, por exemplo, quase não é utilizado entre o modo rodoviário e as demais modalidades; como se pode observar nos portos (onde os contêineres costumam permanecer dias aguardando a retirada rodoviária) e nos terminais rodo-ferroviários. Entretanto estão surgindo novas estratégias de transferências entre veículos de grande capacidades (e. g., de aquaviário para comboio ferroviário, ou mesmo entre composições ferroviárias) que dependem completamente do sincronismo, cujo benefício é a eliminação de pátios de armazenagem. Este sistema encontra-se bem apresentado em FRANKE (2001).

Apesar de o modelo *hub-and-spoke* já ter sido amplamente estudado no transporte

---

<sup>1</sup> Grifou-se o tipo de classificação acima porque no Capítulo 3 há uma classificação aparentemente similar mas que se destina a outro propósito: a análise do “problema” de localização de *hubs*.

aéreo, a pesquisa intensa sobre sua aplicação no transporte intermodal de cargas é relativamente recente e se concentra nas seguintes áreas: corredores internacionais de transporte marítimo, terminais rodo-ferroviários e consolidação e desconsolidação de carga fracionada. Atualmente, tem-se estudado também a viabilidade dos terminais *hub* ferroviários unimodais, como é o caso do estudo de BONTEKONING (2006), que avalia as performances de quatro tipos destes terminais.

#### **2.4.4.2. Trens expressos de carga**

Segundo MONTENEGRO (2006), os trens expressos constituem a modalidade principal de um sistema de transporte de carga porta a porta baseado em composições ferroviárias regulares (com horários de partida e chegada pré-definidos) complementadas com pontas rodoviárias (ou mesmo ferroviárias) de distribuição e recolhimento de cargas nas áreas de influência dos terminais, os quais são estrategicamente localizados em centros concentradores e distribuidores de mercadorias e oferecem também serviços logísticos diversos.

O principal diferencial deste sistema em relação a outros serviços ferroviários é a certeza que o cliente tem da regularidade dos horários e rotas, o que possibilita mais segurança e melhor planejamento e controle dos fretes, gerando maior confiabilidade no serviço.

As principais características do trem expresso são as seguintes (ALL, 2007):

- horários e rotas pré-estabelecidos;
- rapidez (com velocidades de projeto de 80 km/h, sem paradas intermediárias);
- não modificação na configuração dos trens, evitando perda de tempo em pátios de manobras;
- tempos reduzidos de manuseio da carga;
- elevada capacidade de transporte;
- integração efetiva entre modalidades de transporte;
- valores de fretes atrativos;
- segurança.

Normalmente, as cargas mais frequentes nos trens expressos são os produtos industrializados consolidados em contêineres e também alguns não containerizáveis,



como os siderúrgicos.

No Brasil, as empresas MRS Logística, ALL (América Latina Logística) e Log-In da CVRD (Cia. Vale do Rio Doce) operam este tipo de combinação rodo-ferroviária.

#### 2.4.4.3. Terminal de contêineres do tipo *Agile Port System*

Devido à necessidade de absorver as diferenças de tempo e de quantidades entre o modo aquaviário e os modos terrestres, bem como pela não rara falta de informações prévias para planejamento, os terminais de contêineres normalmente apresentam amplos pátios de armazenagem e, conseqüentemente, uma quantidade grande de equipamentos de movimentação e veículos rodoviários para o tráfego interno.

Na medida em que os navios ficam cada vez maiores, estes pátios são levados a crescerem incessantemente até seus limites máximos. O que vem a ser um sério problema quando a cidade se estende em torno do terminal e portanto não existe muito espaço disponível.

Sendo assim, uma pesquisa realizada nos EUA por FRANKE (2001) foi concluída com a proposta de um terminal aquaviário de contêineres separado em duas partes: uma à beira do cais e outra em uma área em terra com ampla possibilidade de expansão (distante da primeira). A ligação das duas áreas seria feita por um sistema dedicado de trens. A primeira área foi denominada *Efficient Marine Terminal* (EMT); a segunda, *Intermodal Interface Center* (IIC); e o sistema completo, *Agile Port System* (FIG. 2.5).

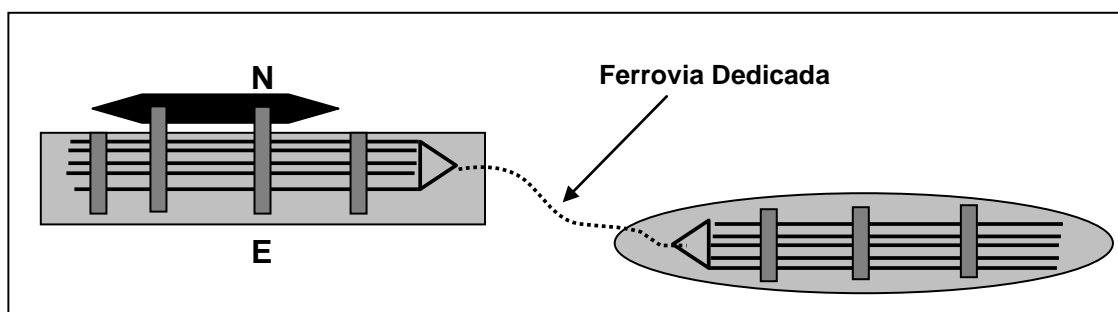


FIG. 2.5 – Esquema de um *Agile Port System*

O sistema funciona por meio das seguintes diretrizes.

- a. Movimentar a maior quantidade de contêineres possível entre a embarcação e os trens, evitando armazenar unidades no EMT.

- b. Transportar imediatamente os contêineres do EMT para o IIC, liberando espaço para outros trens no EMT.
- c. Intercambiar contêineres entre os trens no IIC, organizando as cargas de acordo com o destino final das composições na área de influência.
- d. Permitir o carregamento de caminhões com contêineres somente no IIC.

A presteza das transferências de contêineres entre os veículos é garantida por guindastes do tipo pórtico que transferem as unidades sem necessidade de mudanças na constituição das composições ferroviárias (conforme as figuras 2.6 e 2.7).

Não se deve confundir o IIC com os portos secos de interior (localizados às vezes a centenas de quilômetros do cais), já que o primeiro não pode ser localizado tão distante do EMT.

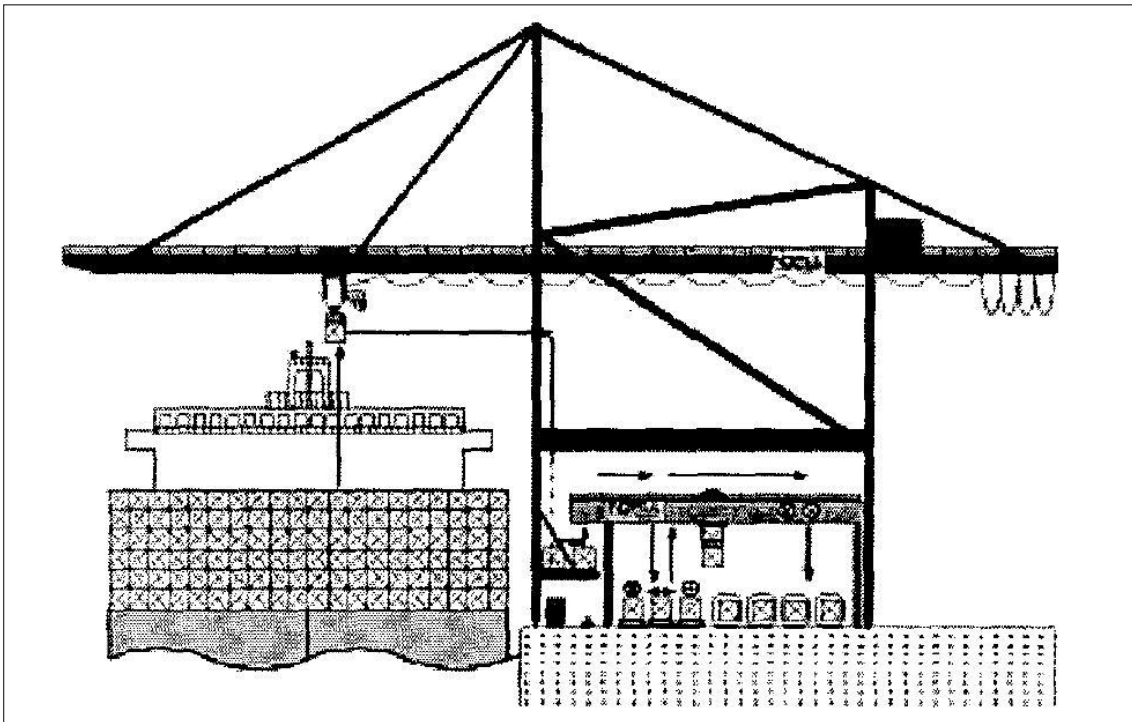


FIG. 2.6 – Transferências de carga para trens em um EMT (*Efficient Marine Terminal*)



FIG. 2.7 – Transferências de cargas em um IIC (*Intermodal Interface Center*)

#### 2.4.5. Eficiência Tecnológica

Outro fator importante para o êxito do transporte intermodal é o aumento de sua eficiência por meio da utilização de tecnologia adequada e eficaz.

Estas tecnologias podem ser classificadas em três grandes áreas:

- tecnologias de equipamentos;
- tecnologias de veículos;
- tecnologias da informação.

Cabe neste item registrar uma importante observação sobre a padronização tecnológica. Segundo BONTEKONING (2006), apesar de toda a padronização já definida e utilizada no âmbito das tecnologias de transporte intermodal, ainda existe uma considerável variação nas características das unidades de cargas, dos vagões ferroviários e das estruturas dos semi-reboques rodoviários. A tal ponto que uma maior padronização pode resultar em um considerável desenvolvimento da eficiência dos sistemas e, conseqüentemente, em mais economias de recursos. Betak et al. (1998, apud BONTEKONING, 2006) identifica um número de questões não resolvidas sobre a

padronização de contêineres e sobre a interoperabilidade entre tecnologias da informação.

#### **2.4.6. Emprego de Mão de Obra Qualificada**

Tanto no setor privado quanto no público, a educação fundamental e a capacitação técnica para as peculiaridades das operações intermodais, bem como a habilidade comportamental pessoal do trabalhador, compõem um conjunto de valores que permitem tal funcionário realizar adequada e eficientemente seu serviço e conseguir acompanhar o crescente desenvolvimento tecnológico.

#### **2.4.7. Existência de Regulamentação Adequada**

Medidas governamentais regulatórias de transporte multimodal, “quando adequadas”, homogeneízam as condições (operacionais, fiscais, securitárias, etc) para todos os operadores, tornando justa a concorrência no mercado por meio de uma estrutura legal, o que vem a ser uma grande motivação para a prática e o desenvolvimento da intermodalidade.

#### **2.4.8. Associação entre Interessados no Desenvolvimento da Intermodalidade**

Os operadores intermodais, ao se associarem entre si e com órgãos públicos, tomando o objetivo comum do desenvolvimento do seu tipo de negócio, podem gerar uma sinergia capaz de realizar mudanças efetivas no aumento da prática da intermodalidade.

UNCTAD (1996) especifica as seguintes metas a serem perseguidas por estas associações.

- a. Organizar fóruns para revisão e discussão das regulamentações governamentais com vistas a criar propostas de modificação de procedimentos e formalidades, simplificando e racionalizando as operações.
- b. Acompanhar e criticar os investimentos públicos em infra-estrutura de transportes e sistemas de informação, reivindicando soluções consideradas mais adequadas.
- c. Facilitar parcerias entre empresas, bem como público-privadas, para a

- realização de projetos de interesse.
- d. Fomentar e coordenar pesquisas para o desenvolvimento intermodal.
  - e. Propor e coordenar a adoção de padronizações tanto de equipamentos e materiais quanto de processos.
  - f. Realizar o *marketing* do transporte intermodal, promovendo o conhecimento de seus benefícios e sua importância econômica.
  - g. Distribuir notícias e informações técnicas aos interessados do setor.

## **2.5. PRINCIPAIS RESTRIÇÕES À INTERMODALIDADE NO BRASIL**

No Brasil, uma série de práticas tradicionais costuma restringir a eficiência dos sistemas intermodais. MONTENEGRO (2006) classifica estas práticas, ou vícios, conforme suas origens, destacando as de maior importância:

- origem na própria empresa (conexões falhas, infra-estrutura física e rodante insuficientes e/ou ineficientes, falta de conhecimento dos operadores, emprego de técnicas inadequadas, abrangência insuficiente da área de atuação);
- origem na interface entre competidores em concorrência plena (não compartilhamento de terminais, não consolidação de movimentações com ganhos de escala);
- origem externa às empresas de transporte (oscilações da demanda, regulamentação ineficiente, procedimentos de fiscalização inadequados, aspectos monopolistas em determinadas regiões, incentivos cruzados e antieconômicos, oscilações institucionais).

A seguir, são analisadas tais restrições de uma forma mais objetiva e detalhada, buscando classificá-las nos seguintes temas:

- restrições devidas ao modo rodoviário;
- restrições no modo ferroviário;
- restrições na cabotagem;
- restrições no modo hidroviário;
- restrições devidas aos terminais intermodais;
- restrições devidas à burocracia.

### 2.5.1. Restrições Devidas ao Modo Rodoviário

Uma das maiores restrições à prática da intermodalidade no País é o paradigma de utilização do transporte rodoviário – culturalmente firmado e, atualmente, apoiado pela desequilibrada superioridade da infra-estrutura rodoviária.

Além deste paradigma, agrega-se o fato de que o mercado brasileiro de fretes rodoviários funciona com preços muito baixos e praticamente nenhuma regulamentação governamental. Chega a ser possível, muitas vezes, contratar fretes abaixo do próprio custo.

A situação chegou a tal ponto devido a um longo tempo de práticas errôneas e inconsequentes, que levaram o transporte rodoviário a um ciclo vicioso e degradante (que será apresentado a seguir). Entre as referidas práticas que conduziram a tal ciclo, destacam-se as seguintes:

- redução da manutenção do veículo,
- pouca renovação da frota,
- jornada excessiva de trabalho,
- carregamento acima do peso máximo e
- inadimplência fiscal.

Em consequência destes maus costumes, o sistema rodoviário sofre com sérios resultados:

- altos índices de acidentes e mortes;
- emissão excessiva de poluentes;
- degradação das estradas;
- engarrafamentos e
- consumo excessivo de combustível.

Trata-se de um mercado selvagem de concorrência predatória. Os valores baixos de frete tornam a competição desfavorável inclusive para outras modalidades tradicionalmente mais eficientes em distâncias maiores.

O esquema da figura a seguir, mostra o referido ciclo vicioso de degradação do transporte rodoviário no Brasil, que tem como alimentação os seguintes motivos:

- é fácil ingressar na profissão de caminhoneiro autônomo (basta uma habilitação e o veículo);
- é difícil desistir da mesma (o profissional tem pouca educação formal e

formação técnica para se recolocar no mercado);

- existe bastante motivação para entrar, devido ao alto índice de desemprego no País e uma ilusão de que o negócio é rentável, haja vista que é possível um faturamento mensal médio de aproximadamente R\$ 3.000,00 por mês, o qual normalmente não é corretamente comparado com os pesados custos associados (manutenção, combustível, pneus, depreciação, etc).

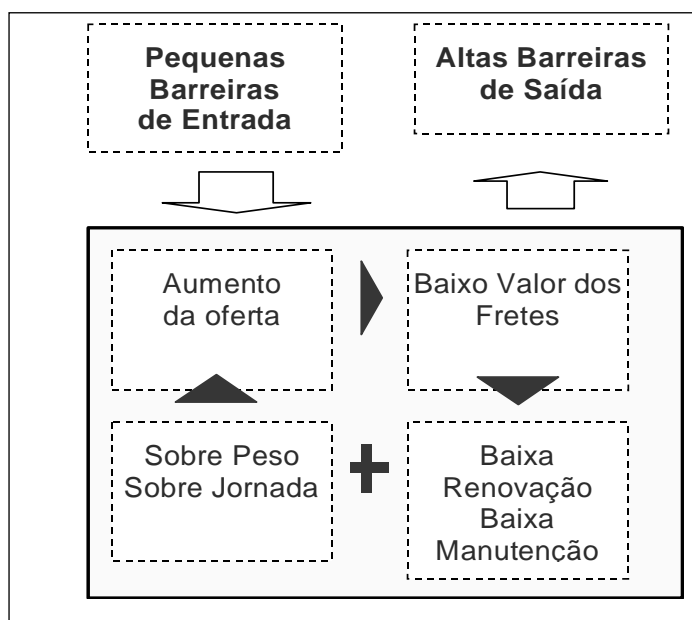


FIG. 2.8 – Circuito vicioso do transporte rodoviário de carga (CEL/COPPEAD, 2002).

### 2.5.2. Restrições no Modo Ferroviário

Apesar de o País hoje contar com empreendimentos calcados em vultosas iniciativas (como as da ALL, MRS e outras), antes do início do processo de privatização da malha ferroviária brasileira, o Governo vinha diminuindo gradativamente seus investimentos neste setor, como mostra a Figura 2.9.

Assim, as concessionárias que assumiram o controle do Sistema Ferroviário tiveram que lidar com sérios problemas de conservação da infra-estrutura e do seu material rodante. MONTENEGRO (2006) afirma que alguns especialistas estimam uma necessidade de investimentos da ordem de R\$ 15.000.000.000,00 para que as ferrovias brasileiras alcancem patamares semelhantes ao de países desenvolvidos. A disponibilidade de infra-estrutura, por exemplo, é quase nove vezes menor que a dos EUA e a produtividade 30% menor.

Outro problema é que originalmente as ferrovias tinham o propósito do escoamento

da produção agrícola do País (principalmente do café) e, como os pólos de produção daquela época são diferentes dos atuais, as trajetórias das vias férreas já não são as mais adequadas para atender a demanda corrente.

Outra questão é a diferença de bitolas de nossas malhas. A falta de uniformização prejudica a utilização da modalidade em distâncias transnacionais. Também colabora neste impedimento (para longas distâncias) a falta de definição prévia (nos processos de concessão) de níveis mínimos de serviço e de valores máximos de tarifa, o que permitiu (“na prática”) o excesso de restrição ao direito de passagem entre as concessionárias.

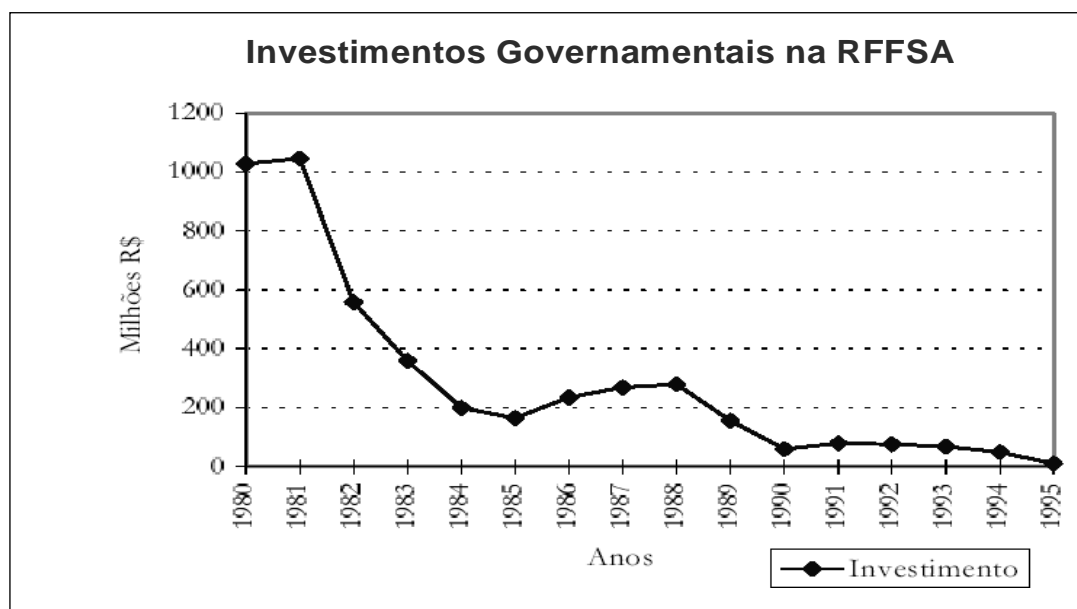


FIG. 2.9 - Investimentos governamentais na RFFSA (CEL/COPPEAD, 2002)

Outro entrave do desenvolvimento ferroviário é a velocidade média das composições, que está em torno de 23 km/h, o que se deve aos excessos de passagens em nível e de invasões às faixas de domínio nas proximidades de grandes cidades, tal como acontece no acesso ao Porto de Santos.

No campo financeiro, as altas taxas de juros do Brasil (lembre-se que nos EUA são cerca de apenas 6,6% a.a.) prejudicam o negócio ferroviário, já que as principais características destes empreendimentos são a baixa rentabilidade e a alta dependência de capital (haja vista a enorme quantidade de ativos empenhados na construção, manutenção e operação dos sistemas).

Muito se fala em aproveitar o retorno vazio nas operações ferroviárias como forma de aumentar o rendimento do sistema, entretanto para as empresas nem sempre é viável



perseguir esta meta, devido aos seguintes motivos:

- aumento do tempo das composições nos terminais;
- interferência na rotina operacional dos trens unitários;
- inadequação dos vagões para todos os tipos de cargas;
- falta de carga para o aproveitamento de boa parte do retorno vazio;
- limitações do *marketing* para reunir clientes geradores de fluxos opostos.

### **2.5.3. Restrições na Cabotagem**

As empresas de navegação marítima do país (da mesma forma que as concessionárias ferroviárias) têm procurado adotar estratégias para atrair os clientes de fretes domésticos, contudo existem questões que estão fora da capacidade de atuação dos empresários.

O primeiro destes problemas é a produtividade dos portos brasileiros, cujas médias de embarque e desembarque (CEL/COPPEAD, 2002) giram em torno de 20 TEU por hora (considerando os 10 maiores portos brasileiros). Esse número é 50% inferior ao *benchmark* mundial (40 TEU/hora).

Uma das razões da baixa produtividade nos portos nacionais é atribuída a um excesso de mão-de-obra exigido pelos órgãos responsáveis – política que onera bastante o sistema e ainda age contra as atuais tendências de automatização das operações.

Outra questão importante é que a frota da cabotagem nacional necessita ser renovada e também ampliada, a fim de se manter e aumentar o fluxo de cargas nesta modalidade de transporte, já que, nas atuais condições, esta frota não é capaz de garantir a frequência e a regularidade das linhas de cabotagem suficientes para conquistar uma credibilidade maior dos clientes.

Também é uma restrição o fato de muitos portos estarem sem área disponível para ampliação, como é o caso das cidades do Rio de Janeiro e Manaus. Tal condição obriga à solução do problema por meio da construção de novos terminais, o que significa grandes montantes de investimentos.

### **2.5.4. Restrições no Modo Hidroviário**

O potencial do modo hidroviário brasileiro é muito amplo, no entanto, segundo

CEL/COPPEAD (2002), somente 35 % das vias interiores navegáveis do País são utilizadas para transporte.

A maior limitação é a falta de infra-estrutura básica – tanto de terminais quanto de obras para adequação dos trechos críticos das hidrovias – pois esta modalidade é a que menos recebe investimentos do Governo Federal.

Outra limitação atual foi causada por ações do passado, quando algumas obras foram realizadas sem a preocupação com o aproveitamento múltiplo dos recursos hídricos. Alguns destes exemplos são as pontes com pequenos vãos estreitando canais navegáveis e as barragens de usinas hidrelétricas construídas sem eclusas, que bloqueiam o fluxo de transporte. Sendo assim, o aproveitamento total das vias navegáveis exige também obras de adaptação para correção deste tipo de problema.

Ainda no que se refere ao gerenciamento do uso múltiplo das águas, é importante ressaltar que existe uma tendência dos governos no Brasil de priorizar a produção da energia elétrica em detrimento da navegação e outras atividades; conforme ocorreu na crise energética de 2001, quando foi considerada razoável a hipótese de restrição do uso da água para o transporte no sistema Tietê-Paraná.

Este tipo de descaso aliado a outros, como por exemplo, a falta de garantia de investimentos na manutenção de calados mínimos nas hidrovias, gera uma insegurança grande nos empreendedores que venham a considerar a hipótese de investir no transporte hidroviário brasileiro, dando a sensação de que o risco do empreendimento é alto. O que desestimula a prática da intermodalidade baseada no modo hidroviário.

Finalmente, destaca-se também, como uma restrição, as ações judiciais movidas por instituições nacionais e internacionais (ONG), que têm conseguido embargar alguns projetos de infra-estruturas viárias no Norte do País, como foi o caso das Hidrovias do Tapajós-Telles-Pires e do Tocantins-Araguaia. Este problema vem a ser importante pelo fato de que tais processos jurídicos levam muito tempo para serem concluídos, haja vista que os argumentos das referidas ações são de cunho ambiental, cuja a análise é extremamente subjetiva e “delicada”.

#### **2.5.5. Restrições Devidas aos Terminais Intermodais**

Apesar de já ter sido destacada a insuficiência de terminais intermodais no Brasil, cabe aqui ressaltar os números. CEL/COPPEAD (2002) estima que a quantidade destes terminais no País esteja em torno de 250 (no total de aquaviários e ferroviários)

enquanto nos EUA são cerca de 3.000.

Uma outra comparação importante entre os dois países é a citada por MONTENEGRO (2006), que afirma haver um excesso de estoque nos armazéns brasileiros, cuja razão é a ineficiência do transporte de carga nacional. As empresas no País mantêm seus produtos armazenados por um período 50% maior que as dos Estados Unidos, com o objetivo de garantir a entrega normalmente prejudicada por atrasos, acidentes e roubos.

### **2.5.6. Restrições Devidas à Burocracia**

Com relação às condições burocráticas (tributárias, securitárias, documentais, etc), é preciso considerar o fato de que as transferências de responsabilidades durante uma operação intermodal (por exemplo, a passagem da carga do caminhoneiro autônomo para o operador ferroviário) agregam custos operacionais, administrativos e burocráticos no total do frete. Custo este não existente nas operações unimodais.

Os custos operacionais obviamente são inevitáveis e sua redução se baseia na melhoria da eficiência do sistema por meio do uso de melhores infra-estruturas, tecnologias e modelos de gestão (conforme aludido no item 2.4).

Contudo a redução dos custos burocráticos e de alguns custos administrativos fica muitas vezes impedida devido à própria legislação e às ações de governo – ainda não suficientemente adequadas.

No Brasil, a comunidade logística já identificou uma série destes entraves, cuja eliminação certamente proporcionaria melhores condições para o incentivo e o aumento da prática da intermodalidade.

Um dos primeiros passos no sentido da criação de condições burocráticas ideais para o transporte intermodal no País foi a promulgação da Lei nº. 9611/98, que iniciou o processo de regulamentação deste tipo de transporte, definindo o novo arcabouço de responsabilidades dos operadores deste sistema, onde o principal agente é o OTM (operador de transporte multimodal) – legalmente estabelecido como o responsável pela carga e pelas operações em todo o trajeto intermodal contratado pelo cliente. Com esta regulamentação, a nomenclatura Transporte Multimodal passa a ser, no Brasil, exclusiva para o caso específico definido pela referida lei.

Outro grande progresso burocrático foi a instituição do Conhecimento de Transporte Multimodal de Cargas – o documento fiscal utilizado pelo OTM (aprovado

pelo CONFAZ, em 10 de outubro de 2003, no Ajuste SINIEF-06/03) – que solucionou alguns importantes problemas tributários.

Apesar da constante evolução da legislação em vigor nesta última década, ainda existem pontos que podem ser melhorados, com vistas a atingir o precípua objetivo de estimular a utilização do transporte intermodal.

O tempo e os recursos gastos com o cumprimento de normas e controles podem significar perdas na eficiência do OTM. É necessário promover estudos que possam mapear os processos dos operadores logísticos em suas relações com o governo e identificar as maiores dificuldades, bem como as duplicidades, propondo soluções de racionalização.

A seguir tratar-se-á de algumas destas oportunidades de melhorias nos campos tributários, securitários e documentais.

#### **2.5.6.1. Falta de Racionalização Tributária**

Um dos tributos mais complexos no Brasil é o ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços). Suas alíquotas aplicadas em operações dentro de um mesmo estado são definidas pela respectiva lei estadual, porém, no caso de transações entre pessoas jurídicas de estados diferentes, a cobrança é regida por resolução do Senado Federal.

Sendo assim, observa-se uma grande variação das normas de determinação das alíquotas nos diferentes estados. Até mesmo dentro da própria resolução do Senado (que legisla em âmbito nacional) existem considerações distintas entre os chamados estados ricos (Região Sul e Sudeste, exceto o ES) e estados pobres (os outros).

Além da não uniformidade das alíquotas, nem sempre os prazos para o pagamento do imposto são unificados entre os estados. Uma integração positiva seria o recolhimento na mesma data, em todo o Brasil.

Outro problema é o caso de dupla cobrança, referente às operações intermediárias do transporte intermodal, tais como armazenagem, consolidação e outras. Há estados que as consideram parte do transporte intermodal e, portanto, as taxam com ICMS. No entanto há municípios que não as consideram parte do transporte e então taxam estas atividades como serviços executados somente dentro do território municipal, onde incide o ISS. Assim sendo, ocorre uma dupla cobrança de impostos que não deveriam ser aplicados a um mesmo serviço, haja vista que um se destina ao recolhimento sobre

atividades municipais e outro sobre atividades intermunicipais, isto é, estaduais.

Deste modo, a exigência de ICMS sobre as atividades citadas acima resultaria em uma dupla cobrança de impostos quando um OTM as terceirizasse em um determinado município.

Um outro fator complicador é que uma operação só pode ser considerada interestadual (normalmente com menor alíquota de ICMS) se o destinatário da carga for contribuinte do ICMS, isto é, se possuir inscrição estadual no respectivo estado de destino.

Há também duas questões relacionadas ao ICMS no âmbito das exportações. A Lei Kandir estabelece que o transporte das mercadorias que se destinam ao exterior não é tributado, seguindo o princípio de aumentar a competitividade dos produtos nacionais no exterior. A primeira polêmica ocorre no entendimento dos estados quanto ao trecho de transporte realizado desde o produtor até o terminal exportador, ainda no País.

Há estados que consideram este transporte como uma parte do processo de exportação feita inicialmente em território nacional, portanto não tributam tal operação. Porém há outros que consideram a operação como do tipo exportação, somente a partir do despacho no último terminal dentro do País; conseqüentemente cobram o tributo referente ao trecho em território nacional.

Esse fato prejudica as exportações a partir de áreas do interior do Brasil, que costumam ser mais oneradas pela cobrança de ICMS no trecho de transporte de exportação feito em território nacional.

A segunda questão sobre a Lei Kandir é o fato de alguns estados entenderem que ela desonera a incidência de impostos somente sobre a mercadoria exportada, mas não sobre a prestação de serviços de transporte para exportar a carga, neste caso o ICMS é cobrado inevitavelmente sobre o serviço de transporte para exportação, contrariando um princípio básico da referida lei, pois o custo deste transporte é computado no custo do produto exportado. Entre os estados com esse entendimento, alguns permitem uma exceção para as empresas de transportes claramente caracterizadas como executoras de serviço porta a porta com destino no exterior.

Um outro conflito conceitual se refere ao transporte de contêineres vazios. O ICMS não incide sobre as embalagens, mas tributa o seu transporte. E é comum que as fiscalizações estaduais entendam que o contêiner é uma embalagem, apesar de a lei do transporte multimodal (9.611/98) considerá-lo como equipamento do veículo de transporte e não uma embalagem (analogamente ao caso de um caminhão do tipo baú).

O entendimento de que o contêiner vazio seja uma embalagem, faz com que, o tráfego de um veículo com o contêiner vazio seja taxado por ICMS.

Toda esta complexidade legal, juntamente com outras, levam ao aumento dos custos administrativos das empresas de transporte, pois exige, além das inscrições estaduais, equipes de especialistas em regras e em tratamento tributário de cada estado.

A emissão do CTMC (Conhecimento de Transporte Multimodal de Cargas) pelo OTM (operador de transporte multimodal registrado na ANTT) resolve uma parte destes problemas, na medida em que garante que todos os trechos da cadeia multimodal fazem parte de um único serviço, principalmente nos referidos casos das exportações e também na questão de manter o ICMS não cumulativo quando o OTM terceiriza alguns trechos do trajeto total.

Um trabalho conjunto entre o BNDES e o IPEA (BNDES, 1998), ressalta a necessidade de alterar as regras de tributação do ICMS aplicáveis às transações interestaduais, afirmando que elas estimulam guerras fiscais e sonegação, criam redistribuições injustificadas de receita entre os estados e dificultam a introdução de aprimoramentos, como redução de incidência sobre a exportação.

#### **2.5.6.2. Falta de Racionalização Securitária**

Um recente estudo da European Commission (1999), intitulado Transporte Internacional e a Responsabilidade do Portador, conclui que a atual estrutura legal que determina a responsabilidade do portador consiste em um confuso quebra-cabeças de convenções internacionais (elaboradas para regular transporte multimodal), além de diversas leis nacionais e termos padronizados para contratos.

Obviamente, se a convenção internacional da UNCTAD sobre o transporte multimodal já tivesse sido adotada pela maioria dos países, a questão das responsabilidades estariam mais simplificadas, pois cada país signatário procuraria adaptar suas leis ao consenso geral. Infelizmente tal intenção não logrou sucesso; segundo a UNCTAD, até 1999, somente 9 países haviam ratificado a convenção: Burundi, Chile, Geórgia, Malawi, México, Marrocos, Ruanda, Senegal e Zâmbia.

Atualmente, o que existe na prática é uma série de legislações nacionais nos diversos países (ou blocos econômicos) com especificações para cada modalidade de transporte.

Segundo ZUIDWIJK (2002), a diversidade das bases, limites de responsabilidade e

documentos com valores legais variados, acabam por não estimular qualquer operador logístico a executar um transporte multimodal regido por um único contrato e que passe por vários sistemas legais divergentes.

Para compreensão desta dificuldade, imagine-se um exemplo de transporte de um contêiner com couro de Goiás a Frankfurt, na Alemanha. O contêiner sai de uma fazenda em Goiás, segue por rodovia até o Porto Seco de Anápolis, onde embarca em trem expresso até o terminal de Vila Velha, no Espírito Santo. De lá, segue de navio até o porto de Rotterdam, na Holanda, em seguida, por ferrovia até um terminal intermodal em Colônia, na Alemanha e, finalmente, por rodovia até Frankfurt. Aplicando as diversas regras a este contêiner, a despeito de possíveis pequenas variações, teremos o exposto na Tabela 2.3.

TAB. 2.3 – Diversidade Legal no Transporte Porta a Porta

Trecho do Transporte Porta a Porta	Lei aplicável
Transporte de caminhão em Goiás	Desregulamentado
Transporte ferroviário de Anápolis para Vitória	Regulamento de Transporte Ferroviário (RTF)
Transporte marítimo de Vitória a Rotterdam	Regras de Haia/Visby
Transporte ferroviário de Rotterdam a Colônia	CIM/COTIF
Transporte rodoviário na Alemanha	CMR

Fonte: MONTENEGRO, 2006.

Como toda operação intermodal é feita por estágios unimodais, existem diversos regimes legais internacionais mandatários aplicáveis a cada modalidade. Em consequência podem ocorrer situações que prejudicam a contratação de um seguro único para a cadeia completa de um transporte multimodal.

É o caso em que não seja possível identificar o ponto exato em que ocorreu o sinistro à carga – situação em que o dano ocorre gradualmente ao longo da cadeia multimodal, ou então não se pode concluir em que trecho (modalidade) ocorreu tal sinistro. Neste caso, em primeiro lugar, não é possível identificar sob que legislação (Tabela 2.3) a responsabilidade do OTM (operador de transporte multimodal) estava submetida e como será tratada sua parte nas indenizações (a ser paga pela seguradora). Em segundo lugar, mesmo que o OTM tenha direito de regresso contra transportadores subcontratados para determinados trechos, não poderá provar qual dos seus terceirizados causou o dano e, portanto, não poderá regressar. Desta forma, ainda que terceirize uma operação, de alguma forma o seguro do OTM terá que cobrir a operação

total e conseqüentemente a parte da operação terceirizada. Assim sendo, o seguro desta parte terceirizada será pago em dobro, já que o transportador do trecho subcontratado também fará seu próprio seguro.

As incertezas quanto à legislação que rege o sinistro numa operação de transporte multimodal, bem como a falta de capacidade do OTM de utilizar o direito de regresso, encarecem bastante os prêmios de seguros do transporte multimodal. Adiciona-se a esta situação o fato de ainda não existir uma quantidade razoável de dados históricos confiáveis e consolidados a cerca de sinistros em operações multimodais, o que não permite a elaboração de estatísticas precisas que conduziram a custos securitários otimizados. Por isso, a tendência é a de fixar taxas elevadas em relação às do transporte unimodal ou do segmentado (uma apólice para cada trecho); o que diminui a vantagem competitiva do OTM.

Enquanto não se tem dados razoáveis para um justo cálculo de risco do OTM e enquanto não se visualiza uma solução para a questão da capacidade de aplicar o direito de regresso do OTM, pode-se trabalhar sobre a terceira oportunidade de melhoria, que vem a ser a harmonização da legislação nacional e internacional sobre a multimodalidade.

## **2.6. CONCLUSÃO DO CAPÍTULO**

A metodologia e o modelo de localização propostos nesta tese auxiliam o planejamento de ações para o desenvolvimento do transporte intermodal, as quais em sua maioria se enquadram nos seguintes objetivos (definidos no início do item 2.4):

- aumento da infra-estrutura suporte da integração entre os modos de transporte e melhoria de suas condições operacionais;
- aumento da eficiência gerencial;
- desenvolvimento de modelos eficientes de operação intermodal.

O modelo de otimização proposto colabora com o primeiro objetivo porque define o emprego ótimo dos recursos, possibilitando a realização da maior quantidade de trabalhos dentro do orçamento existente e garantindo o maior retorno possível dos investimentos, o que também valoriza o transporte intermodal entre as demais opções, motivando sua maior utilização. Antes deste modelo, não havia uma maneira de realizar tal processo de otimização nas redes intermodais para as quais o mesmo foi criado.

Quanto ao segundo objetivo, pode-se afirmar que a gerência do sistema de



transportes modelado torna-se mais fácil e eficaz em muitos de seus processos por meio da utilização de um produto da metodologia proposta. Trata-se do mapeamento dos trajetos utilizados nos transportes entre cada par origem-destino da rede considerada (fornecido pelas variáveis de fluxo,  $x_{ijkm}$ , definidas em 4.3.2). Pois, com o conhecimento completo dos hábitos dos usuários e suas intenções futuras (em relação a vias e *hubs* mais utilizados), o planejamento e a coordenação da operação são mais adequados, precisos e profícuos.

A metodologia também satisfaz o terceiro objetivo para o caso específico do modelo de operação *hub-and-spoke*, fornecendo subsídios teóricos para implantação prática deste modelo.

Além desses campos em que o trabalho realizado claramente contribui para a melhoria da intermodalidade, não se pode desconsiderar totalmente a contribuição indireta e secundária nas demais oportunidades de desenvolvimento, devido ao próprio inter-relacionamento das ações nestas áreas.

Com essa noção clara dos efeitos que o trabalho pode produzir, elaborou-se a metodologia e o modelo de otimização apresentados respectivamente nos itens 4.4 e 4.3.

### 3. O PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE *HUBS* EM REDES

O presente capítulo encerra o estado da arte do Problema de Localização de *Hubs* em Redes de Transporte com Custos Fixos; incluindo classificação, modelos de formulações matemáticas e técnicas de solução dos mesmos. Durante sua elaboração foram consultados sessenta e três artigos científicos (de periódicos de referência internacional) sobre o PLH, dos quais trinta e oito foram citados, sendo a maioria publicada a menos de sete anos.

#### 3.1. GENERALIDADES

Na literatura científica sobre otimização de fluxos em redes, um *hub* (ou nó concentrador) vem a ser um vértice intencionalmente selecionado para receber a confluência de diversos fluxos e/ou para proporcionar a divergência destes fluxos. Na primeira função, o objetivo é reunir elementos transportados por meios de menores capacidades, de modo que se possa passar a transportá-los (por um meio de maior capacidade) até outro *hub* ou distribuí-los por meios de menores capacidades diretamente a vértices comuns (não *hub*). Já na segunda função (análoga, porém inversa), a meta é distribuir elementos oriundos de um meio de grande capacidade (e/ou de diversos meios de menores capacidades) a serem transportados até vértices comuns da rede. Para um melhor esclarecimento, recomenda-se a observação da figura do item 2.4.4.1.

Quando a rede possui *hubs* conectados entre si, o meio de ligação de grande capacidade entre cada par de *hubs* é conhecido, no campo dos transportes, como *shuttle service*, e os fluxos reunidos neste meio são beneficiados com consideráveis economias de escala. Entretanto há redes em que um *hub* não se encontra ligado a outro através de uma via tronco, sendo conectado a apenas terminais comuns. Nestes casos, o *hub* servirá apenas como um nó central para proporcionar conexões entre vias de menores capacidades (como apresentado no item 2.3.2). Obviamente nesta situação, as economias de escala são menos significativas, porém continuam importantes os ganhos de frequência, regularidade e flexibilidade do sistema (explicitados no referido item 2.3.2).

Inicialmente, os estudos sobre redes do tipo *hub-and-spoke* foram aplicados mais

especificamente no transporte de passageiros, de serviço postal e de encomendas expressas. Por isso, entre os primeiros conjuntos de dados publicados na validação dos trabalhos científicos sobre o assunto, estão o do Civil Aeronautics Board (O'KELLY, 1987) e o do Austrália Post (KRISHNAMOORTHY et al., 1994, apud ERNEST e KRISHNAMOORTHY, 1996). A razão de se destacar aqui estas coletâneas de dados é que elas vêm sendo utilizadas por muitos dos pesquisadores, por cerca de duas décadas, como bases consagradas para a validação de trabalhos nesta área, haja vista a credibilidade que adquiriram no meio científico.

Atualmente, a teoria sobre a localização de *hubs* vem sendo empregada de forma mais ampla ainda, seja no planejamento e operação de sistemas de transportes, de telecomunicações ou de informática. Apesar da grande utilidade dos conhecimentos apresentados neste capítulo em todas estas áreas, utilizar-se-ão predominantemente termos e exemplos práticos relacionados ao contexto geral desta pesquisa – o da Engenharia de Transportes.

### **3.2. TOPOLOGIA DE REDES COM TERMINAIS CONCENTRADORES**

A diversificação das pesquisas sobre localização de *hubs* despertou nos cientistas a necessidade de se elaborar um sistema de classificação capaz de organizar estas linhas de investigações sobre os cada vez mais variados tipos de problemas.

Assim, a primeira iniciativa formal e consistente publicada propôs um padrão de classificação topológica das redes *hub-and-spoke*. Neste trabalho, de autoria de O'KELLY e MILLER (1994), foram criadas oito classes (denominadas protocolos) baseadas na combinação de três parâmetros – o tipo de alocação dos terminais comuns ao *hub*, a permissão de comunicação direta entre nós comuns e a conectividade entre *hubs* – tendo cada parâmetro duas variantes (conforme detalhado no texto, tabela 3.1 e figura 3.1).

Sobre o primeiro parâmetro, a alocação de um nó comum a um *hub* é dita única ou simples quando o primeiro é permitido se conectar a apenas um *hub* da rede (como na maioria dos sistemas postais); enquanto, na alocação múltipla, há permissão para que um nó roteie cada fluxo por meio de qualquer *hub* (normalmente o que integra o caminho de menor custo).

O segundo parâmetro define se é permitido ou não o roteamento direto entre vértices comuns da rede sem a obrigação de passar por *hubs*. O primeiro caso é

exemplificado pelo transporte de carga geral dentro de um país e o segundo pelo transporte marítimo intercontinental de contêineres, que atualmente só encontra viabilidade com a concentração dos fluxos por meio de pelo menos um porto *hub* em cada um dos continentes origem e destino. SUNG e JIN (2001) denominaram o primeiro caso como rede *hub-and-spoke* sob política não restritiva.

O terceiro parâmetro define se existe ou não um grafo completo entre os terminais *hub* da rede. No serviço postal, por exemplo, normalmente existe ligação total entre todos os *hubs*.

TAB. 3.1 – Sistema de Classificação de Redes com Terminais Concentradores

Classes	Alocação de nó comum a <i>hub</i>	Ligações diretas entre nós comuns	Conectividade entre <i>hubs</i>
Protocolo A	Única	Não Permitida	Total
Protocolo B	Única	Não Permitida	Parcial
Protocolo C	Única	Permitida	Total
Protocolo D	Única	Permitida	Parcial
Protocolo E	Múltipla	Não Permitida	Total
Protocolo F	Múltipla	Não Permitida	Parcial
Protocolo G	Múltipla	Permitida	Total
Protocolo H	Múltipla	Permitida	Parcial

Fonte: O'KELLY e MILLER (1994).

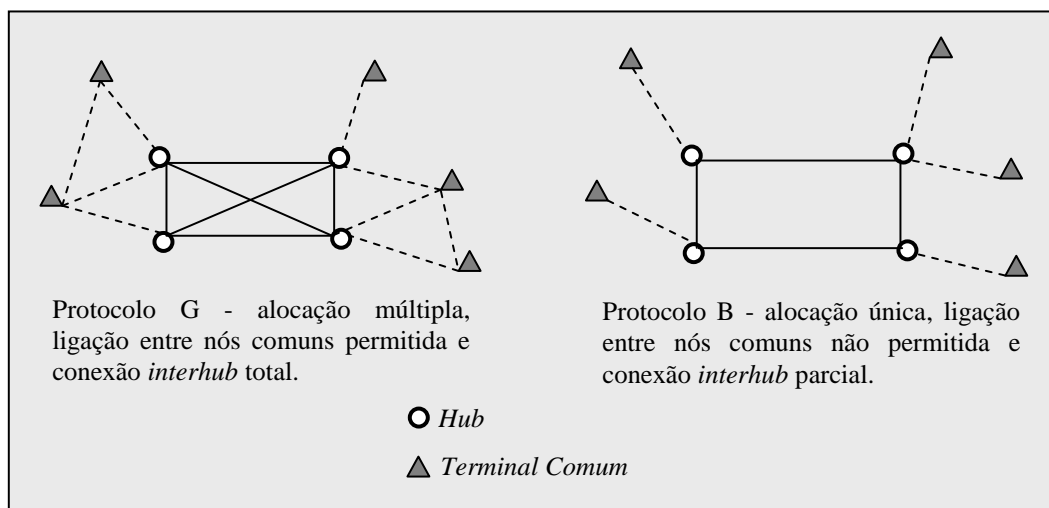


FIG. 3.1 – Exemplos de tipos de redes com terminais concentradores

Nos estudos (sobre localização de terminais concentradores) publicados após esta proposta de padronização de O'KELLY e MILLER (1994), não é percebida uma utilização ampla desta classificação, o que caracteriza a não adoção efetiva do sistema pela comunidade científica até o momento. Acredita-se que isto se deve ao fato de que esta classificação tem perdido sua utilidade na medida em que o estudo do problema vem se diversificando e, portanto, agregando outras características que vão bastante além dos três parâmetros utilizados pelos autores (já referidos anteriormente), conforme se verifica na seção 3.4.

De qualquer modo, neste campo de pesquisa, este continua sendo o único sistema publicado até o momento que encerra uma classificação organizada, lógica e adequada para a “época” de sua criação.

### 3.3. DEFINIÇÃO BÁSICA DO PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE HUBS

GOLDMAN (1969) é conhecido como o primeiro trabalho publicado sobre o Problema de Localização de Terminais Concentradores. Ele apresenta matematicamente a “ideia” de otimização do problema e realiza algumas demonstrações formais. Entretanto O'KELLY (1987) é reconhecido como o introdutor da primeira formulação matemática canônica do problema.

Este problema (objeto deste capítulo) consiste em se localizar terminais concentradores em uma rede e também em se atribuir a estes *hubs* os demais vértices (terminais comuns), de modo a proporcionar o roteamento ótimo dos fluxos de transporte entre os diversos pares de nós, origens-destinos (ALUMUR e KARA, 2007).

Para se definir matematicamente o problema é preciso entender a rede de transportes em estudo como sendo representada por um grafo  $G = (N, A)$ , em que cada vértice do conjunto  $N$  corresponde a um ponto de origem e destino dos fluxos (que pode vir a ser selecionado para a instalação de um *hub*), enquanto os arcos do conjunto  $A$  constituem os caminhos.

Define-se  $H \subset N$  como o subconjunto dos vértices considerados passíveis de receberem a instalação de um novo terminal *hub*. Tal subconjunto é normalmente determinado arbitrariamente e, conforme sua própria definição, pode ser o próprio  $N$ .

$W = / w_{ij} /$  é definida como a matriz de demanda de fluxos  $w_{ij}$  de um nó  $i$  para outro nó  $j$  qualquer (sendo  $i \in N$  e  $j \in N$ ), e tal fluxo pode passar por um ou dois nós *hub*

intermediários  $k \in H$  e  $m \in H$ , compondo-se um caminho  $i \rightarrow k \rightarrow m \rightarrow j$ , (mais frequentemente representado pela sequência  $ijkm$ ). Note que, apesar de possível, em geral na Engenharia de Transportes, não se considera a utilização de mais de dois *hubs* no trajeto entre um par origem-destino, pois, tendo em vista que todos os *hubs* concentram muitos fluxos, quase sempre é possível configurar a rede de modo que a desigualdade triangular seja respeitada nas ligações entre *hubs*.

O custo de transporte da demanda  $w_{ij}$  por um caminho  $ijkm$  é dado por  $C_{ijkm}$ , que é calculado da seguinte forma:

$$C_{ijkm} = w_{ij} (\chi c_{ik} + \alpha c_{km} + \delta c_{mj}), \text{ onde}$$

- $c_{ik}$ ,  $c_{km}$  e  $c_{mj}$  são custos unitários de transporte referentes a cada subtrecho e
- $\chi$ ,  $\alpha$ ,  $\delta$  são fatores de desconto devido a economias de escala.

$x_{ijkm}$  é definida como a variável referente à fração de  $w_{ij}$  que passa pelos *hubs*  $k$  e  $m$ .

$y_k$  é a variável binária que define se um *hub* será instalado ou não em  $k$  (sendo igual a 1 ou 0) e  $C_k$  o custo desta possível instalação.

Além de haver mais de um tipo de problema de localização de *hubs*, também já foram propostas diferentes formulações para cada tipo (conforme se verificará nas seções a seguir). Entretanto, para que se possa mostrar um exemplo da forma de programação matemática deste problema, será apresentada a seguir uma formulação do Problema de Localização de *Hubs* Não-Capacitado e com Alocação Múltipla (*UMAHLP – Uncapacitated Multiple Allocation Hub Location Problem* – apresentado no item 3.5.1). Esta é baseada na primeira formulação “linear” de um problema de localização de *hubs* (elaborada por CAMPBELL, 1994), que já foi melhorada por SKORIN-KAPOV et al. (1996) e HAMACHER et al. (2004).

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} C_{ijkm} x_{ijkm} + \sum_{k \in N} C_k y_k \quad (1a)$$

sujeita a

$$\sum_{k \in N} \sum_{m \in N} x_{ijkm} = 1, \forall i \in N, \forall j \in N; \quad (1b)$$

$$\sum_{m \in H} x_{ijkm} + \sum_{m \in H, m \neq k} x_{ijmk} - y_k \leq 0, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in H; \quad (1c)$$

$$y_k \in \{0,1\}, \forall k \in H; \quad (1d)$$

$$0 \leq x_{ijkm} \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in H, \forall m \in H. \quad (1e)$$

A função objetivo 1a orienta a busca do mínimo custo total da rede – somando-se custos de transporte e custos fixos (instalação de terminais, etc). As restrições 1b asseguram que todos os fluxos sejam realizados entre todos os pares de nós, enquanto as 1c garantem que os fluxos ocorram apenas por meio de *hubs* realmente instalados.

### 3.4. TIPOS DE PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE HUBS

Dada a diversidade dos tipos de problemas de localização de *hubs*, bem como dos modelos já desenvolvidos para cada caso, é conveniente analisar criteriosamente as características principais destes, a fim de se orientar o desenvolvimento de estudos sobre os mesmos e também para facilitar a escolha e o emprego do método existente mais adequado em cada situação real cabível.

Como cada tipo de problema é definido por uma combinação de algumas das características básicas destes sistemas *hub-and-spoke*, então o primeiro passo nesta análise é descrever cada uma destas características. Começando por aquelas que dizem respeito à topologia da rede do problema, já descritas na seção 3.2:

- o tipo de alocação dos vértices comuns aos *hubs* (única ou múltipla);
- a permissão ou não de comunicação direta entre nós comuns e
- a conectividade entre *hubs* (total ou parcial).

A quarta característica é a existência de restrições de capacidade em vértices ou arcos, o que limita o fluxo máximo no caminho que inclui o elemento “capacitado”. Assim, o problema é dito capacitado quando há restrição em algum elemento e não-capacitado no caso contrário.

Outra característica é o tipo de objetivo da otimização:

- localização de *p-hub* medianas (mínima soma),
- localização de *hub* com custos fixos (mínima soma),
- localização de *p-hub* centros (mínimo máximo caminho) e
- localização de *hubs* para cobertura de rede (mínimo máximo caminho).

CAMPBELL (1994) sugeriu a utilização desta característica como a fundamental na classificação dos problemas de localização de *hubs*. ALUMUR e KARA (2007) publicaram uma das últimas revisões bibliográficas sobre o assunto e conseguiram classificar quase a totalidade das formulações conhecidas de acordo com seus objetivos de otimização, organizando-as em quatro conjuntos, referentes aos problemas

discriminados no parágrafo anterior, os quais serão detalhados ao final deste item. Outra observação interessante destes autores é que, para quase todos os modelos de formulação para localização de *hubs*, existem versões análogas de modelos de localização clássicos.

A sexta característica identificada nestes problemas é o modo de determinação do número de *hubs* na rede, que pode ser exógeno ou endógeno (O’KELLY, 1992). No primeiro caso, o número de *hubs* é definido arbitrariamente pelo analista por razões específicas (e. g., falta de recursos para investimento), então tal número se torna mais uma restrição na formulação do programa de otimização, que costuma ser denominado problema de localização de *p-hubs*. No segundo caso, o número de *hubs* é uma variável do problema sendo definido pelo próprio processo de otimização.

Apesar de receber menor destaque que as anteriores, o “método de cálculo das economias de escala” também é uma característica básica do problema. Há casos em que se consideram estas economias apenas nos trajetos *interhubs* e há outros em que se leva em conta também nos *spokes* (arcos entre *hubs* e nós comuns). Nestes últimos casos, a consideração da economia na distribuição é mais comum do que na coleta. Estas economias são computadas por meio de um fator de desconto fracionário que multiplica o custo por unidade transportada num arco. Este fator também representa mais um ponto de divergência entre as formulações dos problemas de localização, já que, em alguns trabalhos, as economias são computadas por meio de um fator de desconto constante para cada arco da rede (ERNST e KRISHNAMOORTHY, 1998 e SKORIN-KAPOV et al., 1996); mas, em outros, utiliza-se um fator que depende da quantidade de fluxo no trecho considerado e que varia de acordo com uma função quadrática (normalmente crescente côncava, O’KELLY e BRYAN, 1998; RACUNICA e WYNTER, 2005).

Utilizando estas sete características básicas, os problemas de localização de *hubs* têm sido denominados e classificados satisfatoriamente na literatura científica. Obviamente, esta afirmação não tem intenção de desvalorizar trabalhos que proponham melhorias neste campo tipológico.

Para fins de ilustração, vale destacar outro exemplo (Tabela 3.2), também de ALUMUR e KARA (2007), na classificação dos trabalhos publicados sobre o problema de maior interesse desta pesquisa – o de Localização de *Hubs* com Custos Fixos.



TAB. 3.2 – Classificação de Problemas de Localização de *Hubs* com Custos Fixos

	Alocação Única	Alocação Múltipla
Não-Capacitado	O’Kelly (1992a) Campbell (1994) Abdinnour-Helm e Venkataramanam (1998) Abdinnour-Helm (1998) Labbé e Yaman (2004) Topcuoglu et al. (2005) Cunha and Silva (2007) Chen (2007)	Campbell (1994) Klincewicz (1996) Mayer e Wagner (2002) Boland et al. (2004) Hamacher et al. (2004) Marín (2005b) Marín et al. (2006) Cánovas et al. (2007)
Capacitado	Campbell (1994) Aykin (1994) Aykin (1995a) Ernst and Krishn. (1999) Labbé et al. (2005) Costa et al. (2007)	Campbell (1994) Ebery et al. (2000) Sasaki e Fukushima (2003) Boland et al. (2004) Marín (2005a)

Fonte: revisão bibliográfica de ALUMUR e KARA, 2007

Tendo em vista que a classificação dos problemas pelo tipo de função objetivo tem recebido grande atenção na literatura científica, descrever-se-ão a seguir, sucintamente, as propriedades mais importantes de cada um dos quatro tipos principais de otimização. Vale ressaltar que a publicação de CAMPBELL (1991, apud CAMPBELL, 1994) foi a primeira a introduzir uma formulação “linear” inteira para o problema de localização de *p-hub* medianas, e o mesmo autor, em outra publicação (CAMPBELL, 1994), apresentou também originalmente as formulações “lineares” inteiras dos três outros tipos.

- Problema de Localização de *p-Hub* Medianas – Consiste em se determinar os locais numa rede para a instalação de um número *p* (pré-determinado) de *hubs* e em se atribuir cada fluxo entre dois vértices (origem-destino) a um caminho que passe ou não por *hubs*, de modo que os fluxos de transportes na rede tenham o menor custo total possível. No início das pesquisas sobre terminais concentradores, este era o tipo de problema mais investigado. Para maiores detalhes, deve-se consultar ALUMUR e KARA (2007), SKORIN-KAPOV et al. (1996) e O’KELLY, M. E. et al. (1996).
- Problema de Localização de *Hubs* com Custos Fixos – É muito similar ao de *p-Hub* Medianas e, em termos de formulação, difere deste basicamente em dois aspectos: na computação do custo total (onde são incluídos os custos fixos e não apenas os de transporte) e a na determinação do número

de *hubs* que é quase sempre endógena (5º§ deste item 3.4). Atualmente, tem sido o problema de localização de *hubs* com maior número de publicações e é o tipo em que se enquadra o modelo proposto nesta tese, por isso será detalhado nas seções seguintes.

- Problema de Localização de p-*Hub* Centros – Trata-se de um problema do tipo mínimo máximo custo. CAMPBELL (1994) define as três classes mais comuns destes problemas: minimização do máximo custo de transporte entre todos os pares origem-destino; minimização do máximo custo de transporte entre todos os arcos da rede; e minimização do máximo custo de transporte entre todos os pares *hub*-origem ou *hub*-destino. O referido autor também apresentou exemplos em que os três casos se aplicam respectivamente: transporte de cargas urgentes ou perecíveis, transporte de cargas que dependem de apoio no terminal (e. g., refrigeração), sistemas em que é necessário evitar longas viagens para os motoristas dos veículos de coleta e distribuição. No Problema de Localização de p-*Hub* Centros, é muito comum a utilização do tempo no lugar do custo. Para maiores detalhes, ver também KARA e TANSEL (2000).
- Problema de Cobertura com *Hubs* – Nos problemas clássicos de cobertura, um ponto de demanda é dito coberto por um ponto de distribuição se aquele está a menos de uma distância crítica deste (ou de um custo crítico, ou de um intervalo de tempo crítico, etc). Na cobertura com *hubs*, CAMPBELL (1994) define três casos em que um par origem-destino ( $i, j$ ) está coberto por um par de *hubs* ( $k, m$ ): o custo de transporte de  $i$  para  $j$  por meio dos *hubs*  $k$  e  $m$  não excede determinado limite; o custo em qualquer arco do caminho  $ijkm$  não excede o limite; o custo nos arcos origem-*hub* ou *hub*-destino não excedem o limite. Estes três casos podem ser ilustrados respectivamente pelos mesmos três exemplos apresentados para o problema de p-Centros. É importante ressaltar que os problemas de cobertura se dividem em dois grupos principais: o problema de cobertura da rede, cujo objetivo é cobrir com *hubs* todos os fluxos origem-destino, minimizando o custo de instalação do total de *hubs* necessários para isto; e o problema de máxima cobertura, onde se busca cobrir o máximo de fluxos, utilizando um número pré-estabelecido de *hubs*. Para maiores detalhes deve-se recorrer também a KARA e TANSEL (2003).

### 3.5. EVOLUÇÃO DAS FORMULAÇÕES DOS PLH COM CUSTOS FIXOS

Neste item aborda-se o processo de desenvolvimento por que vem passando as formulações matemáticas para Problemas de Localização de *Hubs* com Custos Fixos – tratados neste trabalho por PLH-CF e conhecidos na literatura científica por *HLP* (*Hub Location Problems* apenas, já que, nos textos em Inglês é comum suprimir a expressão custos fixos). A atenção especial que se dedica a este problema específico (PLH “com Custos Fixos”) em detrimento dos demais (descritos em 3.4) se deve ao fato de que este é o tipo de PLH em que se enquadra o modelo proposto nesta tese.

#### 3.5.1. Primeiras Formulações

A primeira formulação deste tipo foi proposta por O’KELLY (1992) para o PLH-CF Não-Capacitado e com Alocação Única, tendo sido concebida na forma de programação inteira quadrática, conforme se verifica a seguir.

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} x_{ik} c_{ik} (O_i + D_i) + \sum_{j \in N} \sum_{m \in N} x_{jm} \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} x_{ik} \alpha (w_{ij} c_{km}) + \sum_{k \in N} y_k C_k \quad (2a)$$

sujeita a

$$\sum_{k \in N} x_{ik} = 1, \forall i \in N; \quad (2b)$$

$$y_k - \sum_{i \in N} x_{ik} \leq 0, \forall k \in N; \quad (2c)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\}, \forall i \in N, \forall k \in N; \quad (2d)$$

$$y_k \in \{0,1\}, \forall k \in N. \quad (2e)$$

Os parâmetros  $\alpha$ ,  $C_k$ ,  $c_{ij}$  e  $w_{ij}$  (conforme já definidos no item 3.3) representam, respectivamente:

- o fator de desconto devido a economias de escala nos trechos entre *hubs*;
- o custo fixo de um *hub* instalado no nó  $k$ ;
- o custo de transporte entre dois vértices  $i$  e  $j$  quaisquer; e
- a demanda de fluxo de um nó  $i$  para outro nó  $j$  qualquer.

As variáveis binárias  $x_{ik}$  definem se um vértice  $i$  será alocado a um *hub*  $k$  (sendo igual a 1 neste caso e igual a zero em caso contrário).  $y_k$  define se um *hub* será instalado

ou não em  $k$  (sendo respectivamente igual a 1 ou 0).

$$O_i = \sum_{j \in N} w_{ij} \text{ e } D_j = \sum_{i \in N} w_{ij}.$$

A função objetivo 2a orienta a busca do mínimo custo total da rede – somando-se custos de transporte e custos fixos (instalação de terminais, etc). Cada restrição 2b assegura que cada vértice da rede esteja alocado a exatamente um nó *hub*, enquanto as restrições do tipo 2c garantem que os nós não sejam alocados a *hubs* que não venham a ser instalados.

Nota-se que, nesta formulação, não há variável e parâmetro tetraindexados (dos tipos  $x_{ijkm}$  e  $C_{ijkm}$  definidos em 3.3) que reúnam os custos de cada subtrecho  $x_{ik}$  em uma única rota, por isso o termo que representa a demanda ( $w_{ij}$ ) tem que aparecer na função objetivo, o que não acontece nas formulações tetraindexadas, como em 1a-1f do item 3.3, por exemplo.

CAMPBELL (1994) elaborou a primeira formulação “linear” do PLH-CF (ou *HLP*), cuja ideia geral ainda vem sendo utilizada, apesar de já contar com alguns aprimoramentos introduzidos por outros pesquisadores. Aquele autor apresentou formulações para os quatro casos básicos do Problema de Localização de *Hubs* com Custos Fixos – cada caso caracterizado por uma combinação das duas características fundamentais deste problema: capacidade (capacitado ou não-capacitado) e alocação (única ou múltipla), já detalhadas no item 3.4.

A primeira destas formulações (apresentada a seguir) é a do PLH-CF Não-Capacitado e com Alocação Múltipla – conhecido na literatura científica como *UMAHLP* (*Uncapacitated Multiple Allocation Hub Location Problem*).

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} C_{ijkm} x_{ijkm} + \sum_{k \in N} C_k y_k \quad (3a)$$

sujeita a

$$\sum_{k \in N} \sum_{m \in N} x_{ijkm} = 1, \forall i \in N, \forall j \in N; \quad (3b)$$

$$x_{ijkm} \leq y_k, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in N, \forall m \in N; \quad (3c)$$

$$x_{ijkm} \leq y_m, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in N, \forall m \in N; \quad (3d)$$

$$y_k \in \{0,1\}, \forall k \in N; \quad (3e)$$

$$0 \leq x_{ijkm} \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in N, \forall m \in N. \quad (3f)$$

As variáveis são as mesmas apresentadas no item 3.3 e, conforme já descrito também naquele item, a função objetivo 3a (analogamente à 1a de 3.3 e à 2a deste item) orienta a busca do mínimo custo total da rede – somando-se custos de transporte e custos fixos. As restrições do tipo 3b asseguram que todos os fluxos sejam realizados entre todos os pares de nós, enquanto as 3c e 3d garantem que os fluxos ocorram apenas por meio de *hubs* realmente instalados. É importante notar que a determinação do número total de terminais concentradores é endógena, conforme já explicado no item 3.4.

Para se obter a formulação de CAMPBELL (1994) da versão “capacitada” do PLH-CF com Alocação Múltipla, basta adicionar à formulação 3a-3f a seguinte restrição:

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_{ij} \left[ \sum_{m \in N} (x_{ijkm} + x_{ijmk}) - x_{ijkk} \right] \leq \Gamma_k y_k, \forall k \in N; \quad (3g)$$

onde  $\Gamma_k$  é a capacidade máxima de um *hub* localizado no vértice  $k$ . Esta desigualdade garante que, caso haja um *hub* instalado em  $k$ , o somatório de todos os fluxos que passam por tal *hub* não excederá a sua capacidade  $\Gamma_k$ .

Por outro lado, caso se deseje manter o PLH-CF como não-capacitado porém alterar o tipo de alocação (transformando-o no tipo Alocação Única), são necessárias duas alterações na formulação 3a-3f: a substituição das restrições 3c e 3d pela restrição 3h e a inserção das restrições 3i e 3j (apresentadas a seguir). A variável binária  $z_{ik}$  determina se o vértice  $i$  está alocado ao *hub*  $k$  (sendo igual a 1 neste caso e zero em caso contrário).

$$z_{ik} \leq y_k, \forall i \in N, \forall k \in N. \quad (3h)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{m \in N} (w_{ij} x_{ijkm} + w_{ji} x_{ijmk}) = \sum_{j \in N} (w_{ij} + w_{ji}) z_{ik}, \forall i \in N, \forall k \in N. \quad (3i)$$

$$z_{ik} \in \{0,1\}, \forall i \in N, \forall k \in N. \quad (3j)$$

A restrição 3h garante que um vértice  $i$  somente pode ser alocado a um *hub* em  $k$  caso este último seja instalado. E a desigualdade 3i obriga que todos os fluxos que cheguem ou saiam de  $i$  o façam pelo *hub* em  $k$ , ao qual  $i$  está alocado.

Finalizando as formulações de CAMPBELL (1994) para o PLH-CF, descreve-se aqui a modificação necessária para, a partir do terceiro caso exposto (PLH-CF “Não-

Capacitado” e com Alocação Única), chegar ao PLH-CF “Capacitado” e com Alocação Única. Para tanto, basta que se adicione ao problema não-capacitado a restrição a seguir, a qual garante que, caso um vértice  $i$  esteja alocado a um *hub* instalado em  $k$ , o somatório de todos os fluxos que chegam e saem de  $i$  não excederá a capacidade daquele *hub*,  $\Gamma_k$ .

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} (w_{ij} + w_{ji}) z_{ik} \leq \Gamma_k y_k, \forall k \in N. \quad (3k)$$

### 3.5.2. Modificações Propostas para as Primeiras Formulações

Tendo sido abordadas as formulações originais dos quatro casos principais do Problema de Localização de *Hubs* com Custos Fixos (PLH-CF), a partir deste ponto, o texto será dedicado ao estudo da evolução das formulações para os casos de alocação “múltipla”, haja vista que o modelo a ser desenvolvido pela presente pesquisa fundamentar-se-á nestes casos e, nas aplicações práticas para as quais o modelo está sendo elaborado, não será conveniente configurar a rede na situação de alocação única.

SKORIN-KAPOV et al. (1996), estudando o Problema de *p-Hub* Medianas, descobriram desigualdades mais fortes (*tighter*) que as restrições dos tipos 3c e 3d de CAMPBELL (1994). Apesar de se tratar de um problema um pouco diferente do PLH-CF, as melhorias obtidas também são aplicáveis a este último.

Segundo aqueles autores, a formulação original de Campbell, com seu número elevado de variáveis e restrições –  $(n + n^4)$  variáveis e  $(1 + n^2 + 2n^4)$  restrições (sendo  $n$  o número de nós da rede) – não é adequada para instâncias grandes do problema. Além disso, a relaxação linear da mesma leva a um alto número de variáveis inteiras com resultados fracionários.

Assim, eles substituíram as referidas restrições (conforme Tab. 3.3), obtendo uma nova formulação mais apertada (restringida), com a vantagem de que esta modificação não implicou em um aumento do número de variáveis no problema, e ainda reduziu o número de restrições para  $(2n^4 - 2n^3)$ .

Esta modificação aplicada ao Problema de *p-Hub* Medianas Não-Capacitado com Múltipla Alocação fez com que a relaxação linear deste quase sempre gerasse variáveis  $y_k$  (de localização dos terminais) inteiras (em 97% dos casos testados pelos autores). E, mesmo quando não se chegava a uma solução inteira, os valores relaxados da função

objetivo são excelentes limites inferiores, ficando cerca de 0,1% abaixo do ótimo; o que permitia terminar de resolver o problema de modo rápido e exato por meio de um algoritmo simples de *branch-and-bound* sobre as variáveis inteiras, já que o limite inferior obtido (próximo do ótimo) faz com que a árvore de enumeração implícita tenha poucos ramos.

Dado este sucesso no Problema de *p-Hub* Medianas, os pesquisadores passaram a utilizar tais modificações de SKORIN-KAPOV et al. (1996) em todos os demais problemas de localização de *hubs*.

TAB. 3.3 - Substituições de restrições propostas por Skorin-Kapov, Hamacher et al.

Restrição	CAMPBELL (1994)	SKORIN-KAPOV et al. (1996)	HAMACHER et al. (2004)
3c	$x_{ijkm} \leq y_k$	$\sum_m x_{ijkm} \leq y_k$	$\sum_{m \in N} x_{ijkm} + \sum_{m \in N \setminus m=k} x_{ijmk} \leq y_k$
3d	$x_{ijkm} \leq y_m$	$\sum_k x_{ijkm} \leq y_m$	

HAMACHER et al. (2004), a partir de uma análise poliédrica do problema clássico de localização de facilidades (PLF) Não-Capacitado, descobriram facetas do espaço de solução do PLH Não-Capacitado e, também, as dimensões destas. O inverso também foi conseguido, isto é, determinaram facetas para o PLF a partir do estudo do Problema de Localização de *Hubs*. Esta inovação propiciou mais uma modificação nas restrições 3c e 3d, permitindo a fusão das mesmas em uma única (conforme Tabela 3.3) e tornando a formulação ainda mais apertada (*tighter*). Assim, a formulação original 3a-3f de CAMPBELL (1994) passou a ser utilizada por outros pesquisadores na forma mais restringida, como apresentado no “item” 3.3, na formulação 1a-1e.

MARÍN et al. (2006), seguindo um outro caminho de demonstração, também chegaram à restrição forte de HAMACHER et al. (2004), exposta na Tabela 3.3. Mas, antes de tratar deste êxito, descrever-se-á uma outra proposta daqueles autores.

MARÍN et al. (2006) criticam a formulação 3a-3f (do PLH-CF Não-Capacitado e com Alocação Múltipla) proposta por CAMPBELL (1994) e alterada por SKORIN-KAPOV et al. (1996). Afirmam que esta formulação “não” garante que uma rota (definida por quatro índices, *ijkm* – origem, *hub1*, *hub2* e destino) possuirá no máximo dois *hubs* (limite usual nestes problemas) e propõem a inclusão das duas restrições 4g e 4h (a seguir) para assegurar tal limitação. Assim, 4g garante que, se a origem do fluxo já é um *hub*, então tal fluxo não será coletado por outro *hub*, mas será enviado diretamente

ao *hub* que irá distribuir tal fluxo, formando um caminho do tipo *kjkm*. A restrição 4h, analogamente, assegura que, se o destino de um fluxo já é um *hub*, então não haverá outro *hub* intermediando a distribuição final, e o fluxo será enviado da origem para o *hub* coletor *e*, em seguida, diretamente ao *hub* destino, formando um caminho do tipo *imkm*. Deste modo, o problema passa a ser formulado da seguinte forma:

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} C_{ijkm} x_{ijkm} + \sum_{k \in N} C_k y_k \quad (4a = 3a)$$

sujeita a

$$\sum_{k \in N} \sum_{m \in N} x_{ijkm} = 1, \forall i \in N, \forall j \in N; \quad (4b = 3b)$$

$$\sum_{m \in N} x_{ijkm} \leq y_k, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in N; \quad (4c)$$

$$\sum_{k \in N} x_{ijkm} \leq y_m, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall m \in N; \quad (4d)$$

$$y_k \in \{0,1\}, \forall k \in N; \quad (4e = 3e)$$

$$0 \leq x_{ijkm} \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in N, \forall m \in N. \quad (4f = 3f)$$

$$\sum_{m \in N, k \in N \wedge k \neq i} x_{ijkm} + y_i \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N \quad (4g)$$

$$\sum_{k \in N, m \in N \wedge m \neq j} x_{ijkm} + y_j \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N \quad (4h)$$

As restrições 4c e 4d encontram-se nas formas agregadas, com as quais SKORINKAPOV et al. (1996) substituíram as restrições 3c e 3d da formulação de CAMPBELL (1994).

É importante observar que pode haver casos reais em que esta modificação proposta por MARÍN et al. (2006) não seja conveniente, isto é, quando for interessante utilizar rotas de quatro pontos com mais de dois *hubs*, principalmente nos casos em que a ligação entre *hubs* é parcial (ver Figura 3.1).

Volta-se agora a tratar do já referido êxito de MARÍN et al. (2006) em conseguirem fortalecer a formulação 3a-3f de CAMPBELL (1994), chegando à restrição apertada também apresentada por HAMACHER et al. (2004).

MARÍN et al. (2006) procuraram gerar uma nova formulação (para o PLH-CF Não-Capacitado e com Múltipla Alocação) baseada em restrições de cobertura de conjunto (*set packing constraints*), nas quais a soma de uma série de variáveis é menor ou igual a



1. Para isso, contaram também com o fato de que as variáveis  $x_{ijkm}$  são binárias no tipo de problema não-capacitado.

O primeiro passo dos autores foi reescrever a formulação 4a-4h conforme a formulação 5a-5i. As restrições 4b foram separadas nas 5b e 5c. Um novo grupo de variáveis  $Y_k$  foi criado (sendo  $Y_k = 1 - y_k, \forall k \in N$ ) e foi introduzido na formulação por meio das desigualdades 5j e 5k, para atender à referida forma de restrições de cobertura de conjunto. Além disso, as restrições 4c e 4d foram modificadas pela substituição  $y_k = 1 - Y_k$ , gerando as desigualdades 5d e 5e. As restrições 5h e 5i são as mesmas de 4g e 4h, respectivamente.

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} C_{ijkm} x_{ijkm} + \sum_{k \in N} C_k y_k \quad (5a = 4a)$$

sujeita a

$$\sum_{k \in N} \sum_{m \in N} x_{ijkm} \geq 1, \forall i \in N, \forall j \in N; \quad (5b \sim 4b)$$

$$\sum_{k \in N} \sum_{m \in N} x_{ijkm} \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N; \quad (5c \sim 4b)$$

$$\sum_{m \in N} x_{ijkm} + Y_k \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in N; \quad (5d = 4c)$$

$$\sum_{k \in N} x_{ijkm} + Y_m \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall m \in N; \quad (5e = 4d)$$

$$Y_k, y_k \in \{0,1\}, \forall k \in N; \quad (5f = 4e)$$

$$0 \leq x_{ijkm} \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in N, \forall m \in N; \quad (5g = 4f)$$

$$\sum_{m \in N, k \in N \wedge k \neq i} x_{ijkm} + y_i \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N; \quad (5h = 4g)$$

$$\sum_{k \in N, m \in N \wedge m \neq j} x_{ijkm} + y_j \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N; \quad (5i = 4h)$$

$$y_k + Y_k \leq 1, \forall k \in N; \quad (5j)$$

$$y_k + Y_k \geq 1, \forall k \in N. \quad (5k)$$

Baseando-se nesta formulação 5a-5i, MARÍN et al. (2006) puderam criar as restrições que definem facetas do espaço de solução do problema, por meio do seguinte raciocínio:

- elaboraram o grafo de interseção de todas as variáveis ( $x_{ijkm}, y_k$  e  $Y_k$ );
- encontraram as maiores *cliques* (subgrafos “completos”) deste grafo;

- a maior *clique* contém o maior subconjunto de variáveis incompatíveis;
- então conseguiram agrupar numa restrição o máximo número de variáveis incompatíveis (var. binárias A e B são incompatíveis quando  $A + B \leq 1$ );
- PADBERG (1973, apud MARÍN et al. 2006) demonstrou que restrições geradas desta forma são facetas.

As restrições facetas desenvolvidas a partir de 5a-5i são as 6a-6h.

$$\sum_{k \in N} \sum_{m \in N} x_{ijkm} \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N; \quad (6a)$$

$$y_i + Y_i + \sum_{\substack{k \in N: \\ k \neq i}} x_{ijki} \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N, j \neq i; \quad (6b)$$

$$y_i + Y_i + \sum_{\substack{k \in N: \\ k \neq j}} x_{ijjk} \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N, j \neq i; \quad (6c)$$

$$y_i + Y_i + \sum_{\substack{k \in N: \\ k \neq i}} (x_{iiki} + x_{iik}) \leq 1, \forall i \in N; \quad (6d)$$

$$y_i + \sum_{\substack{k \in N: m \in N \\ k \neq i}} x_{ijkm} \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N, j \neq i; \quad (6e)$$

$$y_j + \sum_{\substack{k \in N: m \in N \\ k \neq j}} x_{ijmk} \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N, j \neq i; \quad (6f)$$

$$y_i + \sum_{\substack{(k,m) \in A: \\ (k,m) \neq (i,i)}} x_{iikm} \leq 1, \forall i \in N; \quad (6g)$$

$$y_k + \sum_{\substack{l \in N \wedge m \in N: \\ l=k \vee m=k}} x_{ijlm} \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in N. \quad (6h)$$

Assim sendo, substituem-se as restrições 5b-5i pelas 6a-6h e também se substitui a variável  $Y_i$  por  $1 - y_i$ , obtendo-se a formulação final 7a-7j.

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} C_{ijkm} x_{ijkm} + \sum_{k \in N} C_k y_k \quad (7a = 4a)$$

sujeita a

$$\sum_{k \in N} \sum_{m \in N} x_{ijkm} = 1, \forall i \in N, \forall j \in N; \quad (7b = 4b)$$

$$\sum_{\substack{k \in N \\ \wedge k \neq i}} \sum_{m \in N} x_{ijkm} + y_i \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N; \quad (7c = 4g)$$

$$\sum_{k \in N} \sum_{\substack{m \in N \\ \wedge m \neq j}} x_{ijkm} + y_j \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in N; \quad (7d = 4h)$$

$$y_i + \sum_{\substack{(k,m) \in A: \\ (k,m) \neq (i,i)}} x_{iikm} \leq 1, \forall i \in N; \quad (7e = 6g)$$

$$x_{ijkk} + \sum_{\substack{m \in N: \\ m \neq k}} x_{ijkm} + \sum_{\substack{m \in N: \\ m \neq k}} x_{ijmk} \leq y_k, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in N; \quad (7f)$$

$$x_{kkkm} = x_{kkmk} = 0, \forall k \in N, \forall m \in N, m \neq k; \quad (7g)$$

$$x_{kjmk} = x_{jkkm} = 0, \forall k \in N, \forall m \in N, \forall j \in N, m \neq k \wedge j \neq k; \quad (7h)$$

$$y_k \in \{0,1\}, \forall k \in N; \quad (7i = 4e)$$

$$0 \leq x_{ijkm}, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in N, \forall m \in N. \quad (7j = 4f)$$

Esta formulação apresenta somente  $(n^3 + 3n^2 - n)$  restrições (sendo  $n$  o número de vértices da rede), o que é bastante inferior à formulação original de CAMPBELL (1994), mesmo melhorada por SKORIN-KAPOV et al. (1996), que ainda possui  $(2n^4 - 2n^3)$  restrições.

Segundo ALUMUR e KARA (2007), com esta formulação 7a-7j, MARÍN et al. (2006) generalizaram as formulações existentes do PLH-CF Não-Capacitado e com Múltipla Alocação e relaxaram a restrição de que a estrutura de custos da rede tenha que satisfazer a desigualdade triangular. Além disso, utilizando algumas técnicas de pré-processamento (descritas no item 3.5.5), eles produziram uma formulação mais forte (mais apertada, *tighter*) que superou em desempenho todas as anteriormente publicadas.

### 3.5.3. Formulações com Variáveis Tri-Indexadas

As formulações apresentadas em 3.5.1 e 3.5.2 utilizam variáveis bi-indexadas ou tetraindexadas (por exemplo,  $x_{ij}$  ou  $x_{ijkm}$ ) para a definição do roteamento dos fluxos.

Nesta seção 3.5.3, serão abordadas formulações com variáveis de alocação tri-indexadas ( $x_{imj}$ ) e bi-indexadas. Esta organização em seções distintas foi preferida para evitar a falta de clareza e a confusão que causam estas mudanças de indexação; principalmente quando representam elementos similares porém desiguais num mesmo problema.

EBERY et al. (2000) e BOLAND et al. (2004) elaboraram formulações para o PLH-CF com Alocação Múltipla (tanto capacitado quanto não-capacitado), utilizando

variáveis bastante diferentes das anteriormente citadas. No entanto a maior parte desta inovação foi concebida em ERNST e KRISHNAMOORTHY (1998), que encerra uma formulação original para o Problema de “p-Hub” Medianas Não-Capacitado e com Alocação Múltipla, cujo arcabouço matemático foi utilizado em EBERY et al. (2000) e BOLAND et al. (2004) para a elaboração das formulações (apresentadas a seguir) dos PLH-CF com Alocação Múltipla Capacitado e Não-Capacitado. Assim (da mesma forma que ERNST e KRISHNAMOORTHY, 1998), EBERY et al. (2000) e BOLAND et al. (2004) obtiveram uma considerável redução do número de variáveis e restrições.

As variáveis e parâmetros utilizados são:

- $x_{imj}$  – a quantidade de fluxo do nó  $i$  para o nó  $j$  distribuído pelo *hub*  $m$ ;
- $y_{ikm}$  – a quantidade de fluxo enviado por  $i$  que passa pelos *hubs*  $k$  e  $m$ ;
- $z_{ik}$  – a quantidade de fluxo enviado por  $i$  que é coletado pelo *hub*  $k$ ;
- $h_k$  – a variável binária que define se um *hub* será instalado ou não em  $k$ ;
- $c_{ij}$  – o custo unitário de transporte do nó  $i$  para o  $j$ ;
- $\chi, \delta, \alpha$  – fatores de desconto dos custos de coleta, transferência e distribuição;
- $O_i$  – o somatório de todos os fluxos enviados pelo nó  $i$ , igual a  $\sum_{j \in N} w_{ij}$  ;
- $D_i$  – o somatório de todos os fluxos coletados pelo nó  $i$ , igual a  $\sum_{j \in N} w_{ji}$  .

Formulação do PLH-CF Não-Capacitado e com Alocação Múltipla:

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \left[ \chi \sum_{k \in N} c_{ik} z_{ik} + \alpha \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} c_{km} y_{ikm} + \delta \sum_{m \in N} \sum_{j \in N} c_{mj} x_{imj} \right] + \sum_{k \in N} f_k h_k \quad (8a)$$

sujeita a

$$\sum_{k \in N} z_{ik} = \sum_{j \in N} w_{ij} = O_i, \forall i \in N, \quad (8b)$$

$$\sum_{m \in N} x_{imj} = w_{ij}, \forall i \in N, \forall j \in N, \quad (8c)$$

$$\sum_{m \in N} y_{ikm} + \sum_{j \in N} x_{ikj} - \sum_{m \in N} y_{imk} - z_{ik} = 0, \forall i \in N, \forall k \in N, \quad (8d)$$

$$z_{ik} \leq O_i h_k, \forall i \in N, \forall k \in N, \quad (8e)$$

$$\sum_{i \in N} x_{imj} \leq D_j h_m, \forall m \in N, \forall j \in N, \quad (8f)$$

$$x_{imj}, y_{ikm}, z_{ik} \geq 0, \forall i \in N, \forall j \in N, \forall k \in N, \forall m \in N, \quad (8g)$$

$$h_k \in \{0,1\}, \forall k \in N. \quad (8h)$$

As restrições do tipo 8b garantem que todo o fluxo oriundo do nó  $i$  seja transportado. As da classe 8c asseguram que todos os fluxos entre os pares  $ij$  serão transportados através de *hubs*, ainda que um *hub* seja o próprio nó  $i$  ou o  $j$ . Cada equação do tipo 8d vincula todos os fluxos oriundos de um nó  $i$  que passam por um *hub*  $k$ . As restrições 8e e 8f asseguram que os fluxos sejam respectivamente coletados e distribuídos apenas por *hubs* que venham a ser realmente instalados.

Esta formulação tem apenas  $(2n^3 + n^2 + n)$  variáveis e  $(4n^2 + n)$  restrições (sendo  $n$  o número de vértices da rede), enquanto a formulação original de CAMPBELL (1994), mesmo melhorada por SKORIN-KAPOV et al. (1996), ainda possui  $(n^4 + n)$  variáveis e  $(2n^4 - 2n^3)$  restrições.

Para transformar a formulação “não-capacitada” 8a-8h em uma formulação capacitada, é necessário inserir a restrição a seguir (8i) proposta por EBERY et al. (2000); a fim de assegurar que o somatório de todos os fluxos que cheguem em  $k$  não exceda a capacidade daquele *hub*,  $\Gamma_k$ . É importante observar que a restrição proposta por Ebery, ao limitar o fluxo máximo em um determinado *hub*, computa apenas os fluxos oriundos de vértices comuns e não aqueles providos de outros *hubs*. Esta configuração é muito comum na modelagem de serviços postais e deve ser alterada nos casos em que os fluxos não considerados sejam tão importantes quanto os demais.

$$\sum_{i \in N} z_{ik} \leq \Gamma_k h_k \quad \forall i \in N, \quad (8i)$$

EBERY et al. (2000) substituíram as variáveis  $z_{ik}$  (por meio da equação  $z_{ik} = \sum_{m \in N} y_{ikm}$ ) para obter uma formulação com número ainda menor de variáveis e restrições. Assim, na formulação capacitada, que inclui a restrição 8i, estes números foram reduzidos de  $(2n^3 + n^2 + n)$  variáveis e  $(4n^2 + 2n)$  restrições para respectivamente  $(2n^3 + n)$  e  $(2n^2 + 2n)$ .

MARÍN (2005) e MARÍN et al. (2006) afirmam que a formulação 8a-8i possui as vantagens do menor tamanho e do tempo de solução muito mais curto em relação às formulações tetraindexadas (como as 7a-7j e anteriores), porém apresentam a desvantagem de os limites encontrados na relaxação linear serem mais folgados, isto é, piores.

MARÍN et al. (2006) destacam que a formulação 8a-8i falha quando a configuração

da rede não satisfaz a desigualdade triangular, já que, neste caso, a formulação não garante que cada rota entre origem e destino possuirá no máximo dois *hubs* (limite usual nestes problemas) e, além disso, pode permitir que, em algumas rotas, certos vértices não-*hubs* sejam atravessados. Para resolver tais questões, MARIN et al (2006) propuseram a inclusão de outras restrições, conforme também o fizeram para as formulações tetraindexadas do item 3.5.2.

MARÍN (2005) desenvolveu uma formulação tri-indexada específica para um PLH-CF-AM Capacitado que permite o particionamento de cada fluxo entre dois vértices ( $w_{ij}$ ). Este problema foi denominado pelo autor como *Splittable Capacitated Multiple Allocation Hub Location Problem*. Este particionamento significa separar cada fluxo  $w_{ij}$  em diversas rotas (sendo pelo menos uma obrigatoriamente) da seguinte forma:

- se  $i$  e  $j$  não são *hubs*, todas as rotas vão de  $i$  para algum *hub* e depois seguem diretamente para  $j$  ou passam por um segundo *hub* e vão para  $j$ ;
- se  $i$  é um *hub* mas  $j$  não,  $w_{ij}$  pode ir diretamente de  $i$  para  $j$  ou passar por apenas um *hub* adicional;
- se  $j$  é um *hub* mas  $i$  não,  $w_{ij}$  pode ir diretamente de  $i$  para  $j$  ou passar por apenas um *hub* adicional;
- se  $i$  e  $j$  são *hubs*,  $w_{ij}$  deve ir diretamente de  $i$  para  $j$ .

Não será detalhada neste trabalho a formulação de MARÍN (2005) por ser muito específica e pelo fato de seu trabalho ser acessível.

#### 3.5.4. Formulação Baseada nos Arcos da Rede

RODRÍGUEZ-MARTÍN e SALAZAR-GONZÁLEZ (2008) estudaram um problema de localização de *hubs* com custos fixos e capacitado; ao qual deram o nome *Capacitated Hub Location Problem (CHLP)*. Os autores definem que, neste tipo de problema, cada fluxo  $w_{uv}$  entre dois nós  $u$  e  $v$  pode ser particionado em diversos caminhos, como no problema (apresentado por MARÍN, 2005) intitulado *Splittable Capacitated Multiple Allocation Hub Location Problem* (descrito no final de 3.5.3).

RODRÍGUEZ-MARTÍN e SALAZAR-GONZÁLEZ (2008) afirmam que o *CHLP (Capacitated Hub Location Problem)* generaliza o PLH-CF-MA Capacitado, isto é, este é um caso particular daquele. A formulação que estes autores criaram é bastante diferente das formulações tetra e tri-indexadas apresentadas nos itens 3.5.1, 3.5.2 e

3.5.3, já que estas se baseiam nas quantidades de fluxos em cada “rota” (representadas por variáveis do tipo  $x_{ijkm}$ ) e aquela se baseia apenas nas quantidades de fluxos em cada “arco” da rede (representadas por variáveis do tipo  $x_a$ ). Além disso, também são significativas as diferenças entre as restrições das referidas formulações.

Os autores destacam, como uma das principais vantagens de sua formulação, a não exigência de que a conectividade entre os *hubs* seja completa (característica tratada no item 3.2). A seguir, apresenta-se matematicamente o problema (*CHLP*).

Parâmetros e variáveis:

- $G = (N, A)$ , conforme em 3.3, é o grafo que representa a rede;
- $H \subset N$ , conforme em 3.3, é o subconjunto de nós candidatos a *hubs*;
- $K = \{(u, v) : u \in N, v \in N\}$  é o conjunto dos pares origem-destino  $k = (u, v)$ ;
- $d_k$  (correspondente ao  $w_{uv}$  de 3.3) é a demanda entre os nós  $u$  e  $v$  do par  $k$ ;
- $\delta^+(S) = \{(u, v) \in A : u \in S, v \in N \setminus S\}, \forall S \subset N$ ;
- $\delta^-(S) = \{(u, v) \in A : u \in N \setminus S, v \in S\}, \forall S \subset N$ ;
- $c_h$  – o custo de instalação de um *hub* no vértice  $h$ ;
- $c_a$  – o custo unitário do transporte no arco  $a \in A$ ;
- $y_h$  – a variável binária que define se um *hub* será instalado ou não em  $h$ ;
- $x_a$  – a quantidade total de fluxo que passa pelo arco  $a \in A$ ;
- $f_a^k$  – a quantidade de fluxo do par  $k = (u, v)$  que passa pelo arco  $a \in A$ .

Formulação:

$$\text{Min} \sum_{a \in A} c_a x_a + \sum_{h \in H} c_h y_h \quad (9a)$$

sujeita a

$$x_a \leq q_a, \forall a \in A; \quad (9b)$$

$$\sum_{a \in \delta^+(h)} x_a \leq q_h y_h, \forall h \in H; \quad (9c)$$

$$y_h \in \{0,1\}, x_a \geq 0, \forall h \in H, \forall a \in A; \quad (9d)$$

$$x_a = \sum_{k \in K} f_a^k, \forall a \in A; \quad (9e)$$

$$0 \leq f_a^k \leq x_a, \forall a \in A; \quad (9f)$$

$$\sum_{a \in \delta^+(j)} f_a^k - \sum_{a \in \delta^-(j)} f_a^k = \begin{cases} d_k, & \text{se } j = u_k \\ -d_k, & \text{se } j = v_k \end{cases} \quad \forall j \in N \quad (9g)$$

As restrições 9f e 9g determinam a execução do transporte de toda a demanda  $d_k$  entre cada par de nós  $k = (u, v)$ . Cada equação do tipo 9e totaliza os fluxos de todos os pares  $k$  que passam em um determinado arco  $a$ , e este fluxo total deve satisfazer a respectiva restrição de arco do tipo 9b, do mesmo modo que o somatório dos fluxos nos arcos que emanam de um vértice  $h$  deve satisfazer a correspondente restrição do tipo 9c.

Nota-se que, nesta formulação, não há variável e parâmetro tri ou tetraindexados (dos tipos  $x_{ijkm}$  e  $C_{ijkm}$  definidos em 3.3) que reúnam os custos de cada arco  $x_a$  em uma única rota, por isso o termo que representa a demanda ( $d_k$ ) tem que aparecer na formulação (desigualdade 9g), o que não acontece na maioria das formulações anteriormente apresentadas.

### 3.5.5. Análise Poliédrica e Pré-Processamento das Formulações

Neste item não serão abordadas características poliédricas que sejam exclusivas do caso de “alocação única” dos problemas de localização de *hubs* com custos fixos. Apenas tratar-se-á do caso dos PLH-CF com “Alocação Múltipla” (capacitado ou não-capacitado), pois é neste último que se enquadra o objetivo da presente pesquisa e, além disso, análise poliédrica já é um assunto muito específico em cada tipo de problema.

BOLAND et al. (2004) identificaram nove importantes propriedades das soluções ótimas dos problemas de localização de *hubs* com alocação múltipla. De posse destas, eles elaboraram um modelo de pré-processamento, criando novas desigualdades que proporcionam formulações mais justas para os problemas. A seguir, estão resumidas aquelas propriedades aplicáveis ao modelo específico que será desenvolvido nesta pesquisa. É importante observar que todas estas propriedades aplicam-se ao PLH-CF com Múltipla Alocação e “Não-Capacitado”, porém, no caso “Capacitado”, as alíneas **a** e **c** não são válidas.

- a.** Os fluxos originados em um nó *hub* serão coletados por ele mesmo, isto é, nenhum outro *hub* captará fluxos gerados em um nó que já seja um *hub*. Portanto, para qualquer *hub*  $h$ , tal que  $h \neq k$ ,  $x_{hijk} = 0$ , para todo  $k$  e  $m$  pertencentes ao conjunto dos nós *hubs*.
- b.** Da mesma maneira, os fluxos destinados a um nó *hub* serão distribuídos por ele mesmo, isto é, nenhum outro *hub* distribuirá fluxos a um nó que já é um *hub*. Assim, para qualquer *hub*  $h$ , tal que  $h \neq m$ ,  $x_{ihkm} = 0$ , para todo  $m$  e  $k$  pertencentes ao conjunto dos nós *hubs*.



- c. Nenhum fluxo será enviado de um nó  $i$  para um *hub*  $m$  via outro *hub*  $k$ , se for mais econômico enviar diretamente de  $i$  para  $m$ . Deste modo, para os nós  $i$ ,  $k$  e  $m$ , se  $\chi \cdot c_{ik} + \alpha \cdot c_{km} > \chi \cdot c_{im}$ , então  $x_{ijkm} = 0$  para todo  $j$ .
- d. Da mesma maneira, nenhum fluxo será enviado de um nó *hub*  $k$  para um nó não-*hub*  $j$  via outro *hub*  $m$ , se for mais econômico enviar diretamente de  $k$  para  $j$ . Assim, para os nós  $k$ ,  $m$  e  $j$ , se  $\alpha \cdot c_{km} + \delta \cdot c_{mj} > \delta \cdot c_{kj}$ , então  $x_{ijkm} = 0$  para todo  $i$ .
- e. Não se considera fluxo de um nó para ele mesmo que passe por dois *hubs*, portanto  $x_{iikm} = 0$  para todo  $i$ ,  $k$  e  $m$ , tal que  $k \neq m$ . Entretanto pode haver determinados modelos em que seja interessante considerar fluxos de um nó para ele mesmo que passe por apenas um *hub* ( $x_{iikk}$ ), principalmente quando há algum tipo de processamento no *hub*.

Outra interessante contribuição em pré-processamento de BOLAND et al. (2004) são as restrições de cobertura geradas a partir de uma desigualdade mais ampla:

$$\sum_{k \in N} \Gamma_k y_k \geq \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_{ij},$$

que determina que o somatório das capacidades de todos os *hubs* instalados tem que ser maior que o total de fluxo na rede. A partir desta desigualdade, podem ser deduzidas várias restrições de cobertura (de problemas da mochila) já que, se  $J \subseteq N$  com  $\sum_{k \in N \setminus J} \Gamma_k \leq \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_{ij}$ , então  $\sum_{k \in J} y_k \geq 1$  é uma restrição válida.

MARIN et al (2006), com base em HAMACHER et al. (2004), também apresentaram algumas técnicas de pré-processamento para as formulações tetraindexadas do PLH-CF Não-Capacitado e com Múltipla Alocação (item 3.5.2). A primeira, que pode reduzir o número de variáveis aproximadamente pela metade, consiste em determinar (para cada combinação de  $i$ ,  $j$ ,  $k$ ,  $m$ ) um  $\hat{C}_{ijkm} = \min\{C_{ijkm}, C_{ijmk}, C_{ijkk}, C_{ijmm}\}$  e então definir  $x_{ijkm} = 0$  para todo  $C_{ijkm} > \hat{C}_{ijkm}$ .

MARIN et al (2006) também sugeriram outras duas técnicas de pré-processamento aplicáveis a instâncias dos problemas cuja matriz de custos possui uma estrutura especial. A primeira aplica-se aos casos em que esta matriz é simétrica, isto é,  $C_{ijkm} = C_{jimk}, \forall i, j, k, m \in N$ . Em decorrência disto, em pelo menos uma solução ótima, tem-se  $x_{ijkm} = x_{jimk}, \forall i, j, k, m \in N$ . Isto permite que uma das variáveis seja eliminada, sendo necessário considerar apenas as variáveis que correspondam aos caminhos

pertencentes a  $S$ , tal que

$$S = \{(i, j, k, m) : (i < j) \wedge [(k = i) \vee (k \neq i \wedge k = m = j) \vee (k \neq i \wedge k \neq j \wedge m \neq i)]\}.$$

É importante ressaltar que esta propriedade permanece válida mesmo que a simetria só aconteça para alguns caminhos específicos.

Os autores também provaram que, se custos existentes entre cada trinca de vértices  $i, j, k$  atenderem às desigualdades triangulares, então, algumas restrições poderão ser retiradas da formulação 7a-7i, pois elas sempre serão satisfeitas por uma solução ótima. É o caso das restrições dos tipos 7c, 7d, 7e, 7g e 7h, que totalizam  $(n^2 + n)$  restrições. Como era de se esperar, há o *trade-off* de que esta redução no tamanho piora os limites obtidos por relaxação linear do problema.

### 3.6. MODELOS DE SOLUÇÃO PARA PLH-CF-AM

Nesta seção apresentam-se, sucintamente, os métodos mais eficientes encontrados na literatura científica destinados à solução do Problema de Localização de *Hubs* com Custos Fixos e Alocação Múltipla, a que doravante se referirá como PLH-CF-AM.

Nota-se que, em relação às seções anteriores, o escopo da pesquisa está sendo ainda mais restringido, já que, além de se excluir os demais tipos de PLH (descritos em 3.4), também não se preocupará em abordar os PLH-CF com alocação “única” (apesar de serem feitas algumas referências a estes últimos). A razão disto é que o modelo proposto nesta tese enquadra-se no caso de alocação “múltipla” e esta seção ficaria desnecessariamente muito extensa, caso fossem abordados ambos os tipos de alocação.

Desde O’KELLY (1987), o primeiro trabalho publicado que elaborou uma formulação matemática reconhecida e um método de solução para um PLH, diversas heurísticas eficientes vêm sendo propostas para resolver estes problemas. E, no início destas pesquisas, era nítida a preferência por heurísticas que forneciam apenas uma boa aproximação da solução ótima, sendo pouco investigados os métodos ditos exatos, que, embora mais demorados, podem encontrar a solução ótima.

Esta tendência inicial (observável nas descrições a seguir) se deve provavelmente a duas características do problema: sua alta complexidade (NP-Completo) e a existência

de pouco conhecimento sobre o mesmo na época.

Atualmente, conforme mostra CAMARGO et al. (2008), a pesquisa por métodos exatos é mais frequente e tem base no argumento destes autores de que o planejamento e projeto de redes *hub-and-spoke* cria decisões sobre a aplicação de grande quantidades de recursos, as quais têm considerável impacto nos custos totais destas redes. O que justifica o gasto de algumas horas para resolver um problema localização de *hubs* até a determinação de uma solução ótima.

O’KELLY (1992), o primeiro artigo sobre o problema “com custos fixos”, apresenta um procedimento composto por três passos principais: uma rotina para determinação de um limite superior (uma solução viável não necessariamente ótima), um segundo procedimento para cálculo de um limite inferior justo e um passo final de melhoria do limite superior com base no inferior.

AYKIN (1994), para o PLH-CF-AM Capacitado, criou uma heurística e um algoritmo de *branch-and-bound* e, a partir destes, obteve os limites inferiores por relaxação lagrangeana com otimização de subgradientes.

AYKIN (1995), para o PLH-CF-AM Não-Capacitado, também utilizou um algoritmo de *branch-and-bound* e o combinou com uma heurística gulosa baseada na meta-heurística *Simulated Annealing*.

Vale ressaltar que estes últimos dois métodos de Aikin, apesar de serem aplicados em PLH-CF, apresentam modelos com um número pré-determinado de *hubs* a serem instalados – exceções entre os PLH com custos fixos cuja determinação do número de *hubs* é normalmente endógena (item 3.4).

KLINCEWICZ (1996) identificou uma estreita relação existente entre o Problema de Localização de Facilidade apresentado por ERLINKOTTER (1978) e o PLH-CF-AM Não-Capacitado (objeto desta pesquisa). Sendo assim, ele propôs um modelo baseado no Método Dual Ascendente que pode ser entendido como uma analogia (para *hubs*) do algoritmo de Erlenkotter. Klinecicz compôs seu método em três partes. A primeira é um algoritmo dual ascendente que busca aumentar sempre o valor da função objetivo, por meio de incrementos nas principais variáveis. O segundo procedimento é um ajuste dual que tenta reduzir o valor de algumas destas referidas variáveis, para que outras delas possam ser aumentadas. A terceira parte do método é um algoritmo de *branch-and-bound* que organiza por enumeração implícita as iterações dos dois procedimentos duais anteriores. O artigo apresenta resultados de testes computacionais com redes de até 25 vértices, que chegaram a soluções ótimas ou próximas delas (95%).

MAYER e WAGNER (2002) desenvolveram importantes modificações para a metodologia de KLINCEWICZ (1996) e apresentaram um artigo mais elucidativo que o original deste último autor. O algoritmo modificado, denominado HubLocator, também apresentou desempenho bastante superior ao de Klineciewicz.

SUNG e JIN (2001) também utilizaram o Método Dual Ascendente para resolver um problema de localização de *hub* não-capacitado com a particularidade de que a rede deveria ser dividida em *clusters* (conjuntos fechados de vértices) e que houvesse exatamente um *hub* em cada *cluster*. Sendo assim, o problema, por natureza, já toma a forma de Alocação Única. Outro detalhe importante é que eles consideraram a possibilidade de ocorrer fluxos diretos entre origem e destino sem passar por *hubs*.

Este método de SUNG e JIN (2001) é composto por um procedimento dual ascendente e outro de ajustamento dual. O primeiro tem o objetivo de encontrar uma solução viável para o problema dual e, a partir desta, construir uma solução viável primal; enquanto o segundo tem a função de reduzir as violações na complementaridade de folgas.

CÁNOVAS et al. (2007) também criaram uma heurística baseada no Método Dual Ascendente e propuseram um algoritmo original para resolver o PLH-CF-AM Não-Capacitado. Antes das iterações do algoritmo base, é realizado um pré-processamento que, segundo os autores, melhora bastante a eficiência do método. O algoritmo que coordena todas as funções é do tipo *branch-and-bound* e, em cada nó desta enumeração implícita, uma rotina heurística dual ascendente é executada como a ferramenta fundamental do processo. Uma observação interessante dos autores é que as instâncias de problemas mais difíceis são aquelas em que há simetria nos custos de transporte e baixos valores de  $\alpha$  (coeficiente de desconto para custos *interhub*).

É importante destacar que, até o momento, entre todos os métodos publicados, este método de CÁNOVAS et al. (2007) é o segundo com o melhor desempenho computacional para o PLH-CF-AM, resolvendo instâncias de até 120 vértices em cerca de 4.700 segundos para problemas assimétricos e 20.600 segundos para casos simétricos. O método que o supera em eficácia é o de CAMARGO et al. (2008), que será descrito adiante.

Aqui, o texto volta à ordem cronológica das publicações, que foi interrompida porque os três últimos artigos comentados têm relação direta com o tema abordado por KLINCEWICZ (1996, Método Dual Ascendente).

ERNST e KRISHNAMOORTHY (1999) resolveram um modelo do PLH-CF

Capacitado e com Alocação Única. Eles propuseram um método gerenciado por um algoritmo de *branch-and-bound* que utiliza a relaxação linear como base das iterações e uma combinação das meta-heurísticas *Simulated Annealing* e *Random Descent* para obter limites superiores e buscar a solução de forma mais rápida. Os autores também criaram três técnicas específicas de pré-processamento da formulação.

EBERY et al. (2000), para a solução do PLH-CF-AM Capacitado, criaram uma heurística que utiliza um eficiente algoritmo (baseado na técnica do caminho mais curto – *shortest path*) de ERNST e KRISHNAMOORTHY (1998) para gerar soluções iniciais. Como tal algoritmo foi desenvolvido para problemas não-capacitados, ele acaba gerando soluções que não atendem às restrições de capacidade do problema de EBERY et al. (2000). Assim, estes últimos autores incluíram uma rotina para, a cada solução inicial, redistribuir os fluxos que estiverem violando restrições de capacidade. Então, havendo uma solução inicial válida, é aplicada uma rotina gulosa de busca na vizinhança desta solução para encontrar melhoras, isto é, uma rotina tenta iterativamente trocar a localização de algum *hub* da solução corrente, verificando a melhora da função objetivo. Em caso de melhora, a nova solução encontrada passa a ser a inicial e uma nova iteração é processada, até que se atinja algum critério de parada.

WAGNER, B. (2007) estudou o mesmo problema de SUNG e JIN (2001) – o Problema de Localização de *Hubs* Não-Capacitado com *Clusters* (consequentemente, de alocação única). O método exato que propôs superou em desempenho a heurística dual ascendente de Sung e Jin, não somente no aspecto de produzir soluções exatas mas principalmente por utilizar um tempo de processamento significativamente menor. Além do algoritmo desenvolvido, Wagner conseguiu alterar a formulação do problema, reduzindo o número de variáveis, e também aplicou técnicas de pré-processamento à formulação.

CAMARGO et al. (2008) criaram o algoritmo que, atualmente, apresenta o melhor desempenho na solução do PLH-CF-AM Não-Capacitado e, além disso, é um método de otimização exato. O procedimento é baseado na clássica Decomposição de Benders e é capaz de resolver instâncias de até 200 vértices em menos de 10.000 segundos de processamento. Os autores também avaliaram mais duas versões do algoritmo de Benders (não elaboradas pelo próprio Benders), uma que implementa a geração de múltiplos cortes a cada iteração do problema mestre e outro que consiste na resolução parcial do problema mestre, chamado Benders  $\varepsilon$ -Ótimo. Os resultados indicaram que o procedimento clássico superou os demais, especialmente nas instâncias de maior porte,

onde o algoritmo de múltiplos cortes nem obteve soluções ótimas dentro de 36.000 segundos de processamento.

RODRÍGUEZ-MARTÍN e SALAZAR-GONZÁLEZ (2008) estudaram um problema de localização de *hubs* com custos fixos e capacitado, a que deram o nome *Capacitated Hub Location Problem (CHLP)*, o qual generaliza o PLH-CF-AM Capacitado, isto é, este é um caso particular daquele; já que cada fluxo  $w_{uv}$  entre dois nós  $u$  e  $v$  pode ser particionado em diversos caminhos (descrito no item 3.5.4), como no problema (apresentado por MARÍN, 2005) intitulado *Splittable Capacitated Multiple Allocation Hub Location Problem* (descrito no final do item 3.5.3).

Para a solução do Problema (*CHLP*), Rodríguez-Martín e Salazar-González testaram quatro métodos distintos:

- um algoritmo de *branch-and-cut* baseado no Método de Decomposição de Benders original;
- um algoritmo de *branch-and-cut* baseado numa Decomposição de Benders Dupla (que superou em desempenho o anterior);
- o pacote comercial CPLEX (que superou em desempenho os dois primeiros algoritmos); e
- uma heurística baseada na combinação da meta-heurística *VNS (Variable Neighborhood Search)* com a relaxação linear do problema (que foi capaz de tratar instâncias grandes e fora do alcance dos três métodos anteriores, apesar de nem sempre atingir a solução ótima).

Os três primeiros métodos foram testados na resolução de instâncias do problema (*CHLP*) que possuíam uma rede com demanda em apenas 25 pares de vértices e que consideravam, como candidatos a *hubs*, somente 10 vértices. Em instâncias maiores estes métodos apresentaram grande limitação, de modo que foi necessário recorrer ao último método baseado na meta-heurística *VNS*.

Tendo em vista o sucesso de CAMARGO et al. (2008, descrito anteriormente) na aplicação do Método de Decomposição de Benders (original) ao PLH-CF-AM Não-Capacitado, tem-se a impressão de que, ou o *CHLP* de RODRÍGUEZ-MARTÍN e SALAZAR-GONZÁLEZ (2008) é um problema consideravelmente mais difícil que o PLH-CF-AM Não-Capacitado, ou a formulação de Rodríguez-Martín e Salazar-González não se ajusta bem ao espaço de soluções do *CHLP*.

Embora os PLH-CF com alocação “única” não sejam de grande interesse desta

pesquisa (conforme comentado no início desta seção), a título apenas de informação geral, enuncia-se a seguir as principais publicações que incluem soluções destes problemas e as respectivas técnicas de otimização utilizadas. Obviamente, excetuam-se as publicações sobre os problemas com alocação única já tratadas neste item: O'KELLY (1992), AYKIN (1995), ERNST e KRISHNAMOORTHY (1999), SUNG e JIN (2001) e WAGNER (2007).

- Um algoritmo de *branch-and-bound* combinado com algoritmos genéticos (ABDINNOUR-HELM e VENKATARAMANAN, 1998).
- Uma heurística baseada em Busca Tabu e algoritmos genéticos (ABDINNOUR-HELM, 1998), que superou a anterior.
- Um algoritmo de *branch-and-cut* (LABBÉ et al., 2005).
- Um algoritmo genético (TOPCUOGLUA et al., 2005), que superou as duas primeiras.
- Uma heurística baseada em *Simulated Annealing*, Busca Tabu e outras rotinas de melhoramento (CHEN, 2007), que superou as anteriores.
- Uma heurística baseada em algoritmos genéticos e *Simulated Annealing* (CUNHA e SILVA, 2007), que provavelmente tem um desempenho semelhante ao de CHEN (2007).

Com exceção de ERNST e KRISHNAMOORTHY (1999) e LABBÉ et al. (2005), todas as publicações sobre o PLH-CF com alocação “única” (referidas nesta seção) são elaboradas para problemas não-capacitados.

TAB. 3.4 – Síntese sobre os principais modelos descritos para a solução do PLH-CF

Método	Autor	Observações relevantes	Tipo
Heurística específica	O’KELLY (1992)	Primeiro artigo sobre o problema “com custos fixos”	probl. não capacitado
	AYKIN (1994)	Utilizou algorit. <i>branch and bound</i> e relaxação lagrangeana	problema capacitado
	AYKIN (1995)	Util. meta-herística Simulated Annealing e <i>branch and bound</i>	não capacitado
Dual Ascendente	KLINCEWICZ (1996)	Utiliza ajuste dual e <i>branch and bound</i>	não capacitado
	MAYER e WAGNER (2002)	Modificou e melhorou desempenho de Klincewicz 96	não capacitado
	SUNG e JIN (2001)	Utiliza ajuste dual	não capacitado
	CÁNOVAS et al. (2007)	2º método mais eficiente. Utiliza eficiente pré-processamento e <i>branch and bound</i>	não capacitado
Heurística específica	ERNST e KRISHN. (1999)	Utiliza meta-heur. <i>simulated annealing</i> e <i>random descent</i>	problema capacitado
	EBERY et al. (2000)	Utiliza algoritmo guloso e <i>branch and bound</i>	problema capacitado
Método exato específico	WAGNER, B. (2007)	Solução bem mais eficiente p/ o problema estudado por Sung e Jin 2001. Utiliza pré-proces..	não capacitado
	CAMARGO et al. (2008)	É o método mais eficiente p/ probl. não capac. Baseia-se na Decomposição de Benders.	não capacitado
Heurística específica	RODRÍGUEZ-M. e SALAZAR-G. (2008)	Generalizaram PLH-CF-AM. Utilizam meta-heurística <i>variable neighborhood search</i>	problema capacitado

### 3.7. MODELAGEM DA ECONOMIA DE ESCALA

Um tópico que merece atenção especial nos problemas de localização de terminais concentradores é a economia de escala obtida com as concentrações de fluxos nas rotas, que, segundo O’KELLY e BRYAN (1998), são a razão ser dos sistemas do tipo *hub-and-spoke*.

Desde que não haja congestionamentos significativos na rede, quanto maior for a quantidade de fluxos num determinado arco da rede, menor tende a ser o custo unitário de transporte neste arco. Este conceito de economia vem sendo aplicado na modelagem de redes com terminais concentradores, por meio da inclusão de um fator de desconto no custo de transporte de cada arco.



Nos primeiros artigos em que foi considerado este fator, ele foi aplicado somente aos trechos que ligavam terminais *hub* da rede, já que nestas ligações é que existe uma certeza de concentração de fluxos. No entanto, posteriormente, passou-se a aplicar tais fatores de descontos também em trechos entre vértice *hub* e vértice não-*hub*. Assim, a forma de cálculo mais completa do custo de transporte ( $C_{ijkm}$ ) em uma rota  $ijkm$  se estabeleceu como a fórmula a seguir (já apresentada no item 3.3):

$$C_{ijkm} = w_{ij} (\chi c_{ik} + \alpha c_{km} + \delta c_{mj}), \text{ onde}$$

- $c_{ik}$ ,  $c_{km}$  e  $c_{mj}$  são custos unitários de transporte referentes a cada subtrecho e
- $\chi$ ,  $\alpha$ ,  $\delta$  são fatores de desconto devido a economias de escala e
- $w_{ij}$  a demanda de fluxo de um nó  $i$  para outro nó  $j$  qualquer.

A maioria dos trabalhos sobre PLH existentes considera estes fatores de desconto como constantes do tipo  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Contudo algumas pesquisas já melhoraram tal modelagem, aproximando mais este fator da realidade, pois o consideram uma função da quantidade de fluxo.

O’KELLY e BRYAN (1998) afirmam que assumir os valores unitários dos custos como independentes das respectivas quantidades de fluxos não apenas gera erros no cálculo do custo total da rede mas também causa a determinação errônea das localizações dos terminais concentradores e das alocações dos terminais comuns. Em seu estudo, eles admitiram economias de escala apenas nos arcos entre *hubs*.

Estes autores, modelando o PLH-CF-AM, propuseram, para o cálculo do custo de transporte em um arco  $km$ , uma função não-linear côncava (semelhante à  $CT_{km}^{NL}$  da Figura 3.2), que aumenta o valor do custo a uma taxa decrescente à medida que os fluxos crescem. As demais funções da Fig. 3.2 –  $CT_{km}^{SE}$  e  $CT_{km}^L$  – representam respectivamente o referido custo total sem economia de escala e com economia aplicada por um fator  $\alpha$  constante (referido anteriormente).

A função côncava da figura ( $CT_{km}^{NL}$ ), proposta por RACUNICA e WYNTER (2005), quando comparada à função sem economia de escala ( $CT_{km}^{SE}$ ), representa bem a condição principal para haver viabilidade da concentração de fluxos num sistema do tipo *hub-and-spoke*. Pois, para “pequenas” quantidades de fluxos, o custo total do transporte via terminais concentradores não é vantajoso, já que é maior que o custo de transporte direto (não intermediado por *hubs*), que pode ser representado pela função sem economia de escala ( $CT_{km}^{SE}$ ). A partir de uma determinada quantidade de fluxos no arco  $km$ , o custo de transporte via terminais concentradores passa a ser viável, já que fica menor que o custo de transporte direto.

BRYAN (1998) apresentou algumas variações para o modelo de O’KELLY e BRYAN (1998), considerando capacidades e mínimos fluxos nas ligações *interhubs*, além de aplicar fatores de economia de escala também na ligação entre *hub* e vértice comum.

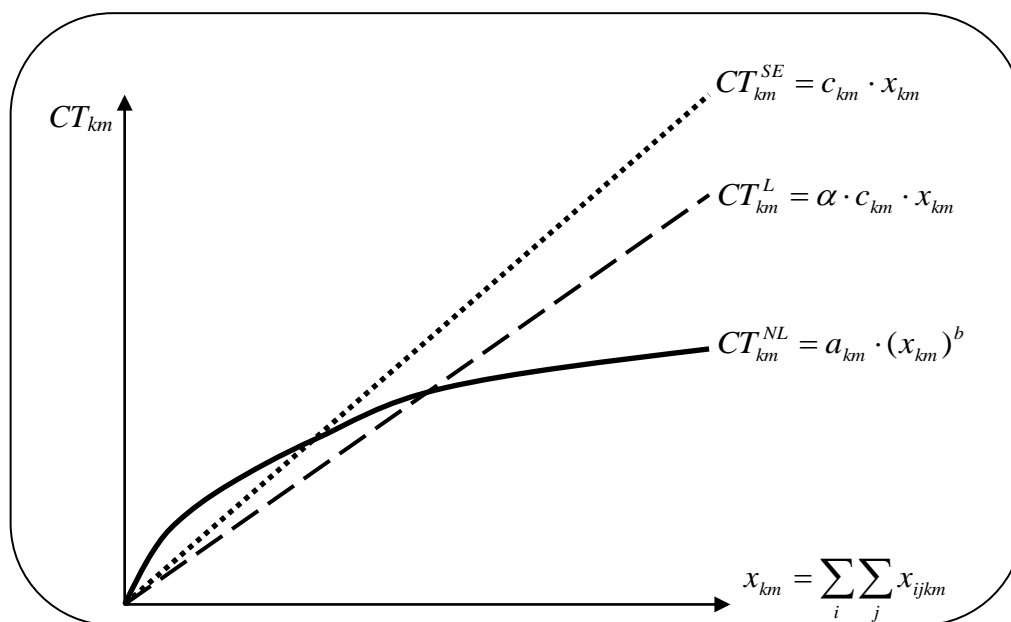


FIG. 3.2 – Tipos de economia de esc. (a função não-linear é a de Racunica e Wynter)

HORNER e O’KELLY (2001) propuseram outra função de custo não-linear para economias de escala e consideraram que tais descontos poderiam ser aplicados a qualquer arco da rede que apresentasse suficiente quantidade, conforme BRYAN (1998). Eles modelaram o problema em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas e compararam soluções para diferentes condições de custos da rede.

RACUNICA e WYNTER (2005) apresentaram outro modelo para o PLH-CF-AM Não-Capacitado no transporte intermodal de cargas, onde utilizaram uma função de custo não-linear côncava nos trechos *interhubs* e nas ligações entre *hub* e destino (excetuando apenas as ligações entre origem e *hub*). Essa função é a  $CT_{km}^{NL}$  da Figura 3.2. Assim, para resolver o problema de forma linear, eles fizeram uma aproximação de cada função côncava por meio de diversas funções lineares e identificaram algumas propriedades poliédricas do modelo linearizado. Então desenvolveram duas heurísticas de redução de variáveis para a solução do problema e apresentaram um estudo de caso sobre uma rede europeia transalpina de transporte de cargas.

Além dos já referidos pesquisadores, também utilizaram fatores de desconto dependente da quantidade de fluxos, os seguintes autores: KLINCEWICZ (2002),

O'KELLY e BRYAN (2002), WAGNER (2004, apud ALUMUR e KARA, 2007), KIMMS (2005, apud ALUMUR e KARA, 2007) e CUNHA e SILVA (2007).

## **4. A METODOLOGIA E O NOVO MODELO DE PLH PROPOSTOS**

### **4.1. NECESSIDADE DE NOVO MODELO DE LOCALIZAÇÃO DE HUBS**

A metodologia proposta (item 4.4) tem a finalidade estabelecer os passos e os instrumentos para a solução de um problema de localização de *hubs* (PLH) em uma rede de transportes de cargas que “não possua um gerenciamento centralizado”. Portanto o principal componente desta metodologia é o novo modelo de PLH proposto (item 4.3), que vem a ser a inovação mais importante da tese.

Neste trabalho considera-se que uma rede de transportes é operada sob administração central quando existe uma unidade gerencial no sistema que estabelece o critério de escolha de melhor caminho, de modo que todos os veículos pertencentes à rede seguirão obrigatoriamente tal determinação.

Uma empresa de transporte de encomendas como a Empresa Brasileira de Correios e Telégrafos (ou as internacionais FedEx, DHL, UPS), que tem uma rede própria de transportes, pode estabelecer, por exemplo, um critério determinístico de escolha do caminho a ser seguido pelos veículos baseado no menor custo. Com esta uniformidade de critério em toda a rede, pode-se projetar com facilidade (através dos modelos de localização de *hubs* existentes) onde devem ser instalados os terminais concentradores e quais devem ser as linhas troncos de maior fluxo entre eles. Uma vez que, nos modelos convencionais do PLH, enquanto houver capacidade de transporte no caminho de menor custo entre um par origem-destino (OD), os respectivos fluxos de cargas entre tal par sempre ocorrerão por este trajeto mais econômico.

Todavia esta última premissa dos PLH convencionais não é válida para um sistema sem o referido critério de escolha de melhor caminho definido por um agente administrador central. Haja vista o exemplo (do item 1.1) do transporte doméstico de contêineres de um país, onde diversas empresas oferecem seus serviços independentemente, escolhendo caminhos de acordo com diferentes critérios (custo, tempo de transporte, frequência de saídas, segurança, além de outros, inclusive de caráter subjetivo). Assim, nestes casos onde a intermodalidade é viável, sempre haverá uma fração sendo transportada via *hubs* e outra por trajeto direto, não sendo possível determinar que todos os usuários escolham um dos dois trajetos, como ocorre quando se trata de uma rede com gerência central.

Intuitivamente, poder-se-ia argumentar que, mesmo em um sistema de transporte sem gerenciamento centralizado, seria possível aplicar o modelo convencional de localização de *hubs* (PLH), caso fosse utilizado um custo generalizado<sup>2</sup> que computasse valores para todos os critérios referidos no parágrafo anterior. E há alguma razão neste argumento, pois, caso se calculasse o custo generalizado de todos os caminhos existentes entre um par O-D, seria possível compará-los e eleger o ótimo (ou o de menor custo generalizado).

Porém a função objetivo e as restrições do modelo do PLH convencional (e. g., formulação 1a-1e do item 3.3) determinariam que “a totalidade” dos fluxos entre um par O-D deveria seguir pelo caminho de menor custo generalizado, o que não se pode esperar que ocorra na prática. De São Paulo para Manaus, enquanto não houver mudança muito radical na oferta de transporte, sempre vai haver fluxos de contêineres por rodovias e por cabotagem. As proporções podem variar com as tarifas, mas haverá sempre uma quantidade em qualquer um dos modos.

No real funcionamento destas redes de transporte sem gerenciamento centralizado, a distribuição dos fluxos (entre um par O-D) pelos diversos caminhos disponíveis é mais bem representada por modelos de escolha modal, como o Logit (descrito no item 4.3.3.2). Por meio deste modelo, calculam-se probabilidades de um usuário optar por cada um dos caminhos disponíveis. Assim, estas probabilidades representam as proporções de usuários que escolherão utilizar cada um destes caminhos. E, como se tratam de “probabilidades”, caso seja criado um novo caminho de menor custo devido à instalação de um novo *hub*, não se pode esperar que o fluxo do caminho existente de maior custo migre “totalmente” para o novo caminho mais econômico (via *hub*). Isto inviabiliza a aplicação do modelo convencional do PLH.

Cabe ressaltar que, mesmo que se pudesse assumir que “a totalidade” do fluxo migraria de um caminho de maior custo generalizado para um novo caminho mais econômico, ainda assim não seria correto utilizar o custo generalizado na função objetivo em qualquer caso do problema, pois há os vários casos em que não é possível determinar uma única função de custo generalizado para todos os vértices da rede, havendo necessidade de se dividir a rede em áreas homogêneas e determinar uma função para cada área. Uma vez que cada variável tem valor diferente em cada região (e. g., o tempo para um empresário industrial em São Paulo pode ser mais valioso que

---

<sup>2</sup> Custo financeiro somado a valores monetários que representem outras impedâncias do transporte.

para um produtor de soja em Rondônia). Por conta do processo probabilístico específico utilizado na geração de funções de custo generalizado, não se pode comparar valores destes custos calculados por funções de custo generalizado de áreas distintas. Deste modo, estes valores nem sempre podem ser utilizados como valores absolutos para um cálculo de função objetivo que engloba os custos de todas as áreas da rede.

Sendo assim, identificando-se todas estas limitações da aplicação do modelo convencional do PLH em sistemas sob administração descentralizada, julgou-se muito útil e relevante o desenvolvimento de um novo modelo de localização de *hubs* adequado para estes casos.

## 4.2. O TIPO DO NOVO MODELO DE PLH PROPOSTO

O modelo de PLH proposto nesta tese pertence à classe conhecida na literatura científica como *Uncapacitated Multiple Allocation Hub Location Problem with Fixed Costs (UMHLP)* ou Problema de Localização de *Hubs* Não-Capacitado com Custos Fixos e Alocação Múltipla (PLH-CF-AM Não-Capacitado, descrito no item 3.5).

Este novo modelo proposto será denominado no presente trabalho como Problema de Localização de *Hubs* Não-Capacitado com Custos Fixos e Gerenciamento Descentralizado da Rede, ou PLH-CF-GD Não-Capacitado. Não se inclui no nome a expressão “alocação múltipla” (conforme aparece no tipo apresentado no parágrafo anterior) porque uma rede sob administração descentralizada necessariamente funciona de acordo com o sistema de alocação múltipla (apresentado no item 3.4), onde cada vértice da rede de transportes pode se ligar a quaisquer *hubs*. Assim, por exemplo, um nó  $i$ , que envia cargas a dois nós distintos  $j$  e  $l$  (ver quadro 2 da Fig. 4.1), pode utilizar um par de *hubs*  $km$  como intermediário para o trajeto  $ij$  e outro par  $p_2q$  para o trajeto  $il$ . Já no caso de alocação simples, cada nó  $i$  da rede é cativo de um único terminal concentrador  $k$  (normalmente o que apresenta o menor custo de acesso ao mesmo).

Do exposto, pode-se concluir que a alocação múltipla retrata com maior fidelidade a liberdade e a flexibilidade com que trabalham os operadores do transporte de cargas em redes sob gerenciamento não centralizado.

Vale também ressaltar que a alocação única não necessariamente minimiza os custos totais de uma rede em um problema de localização de *hubs*, mas a alocação múltipla sim.

SUNG e JIN (2001) criaram uma classificação para os modelos de problemas de

localização de *hubs* nos quais são permitidos os fluxos de transportes diretos entre cada par origem-destino sem passar por *hubs* (em oposição a modelos que obrigam todos os fluxos a passarem por pelo menos um terminal concentrador). Tratam-se dos PLH sob “política não restritiva”. O modelo proposto nesta tese, devido ao gerenciamento descentralizado, também se enquadra nesta classificação.

### 4.3. O MODELO DE OTIMIZAÇÃO PROPOSTO

A ideia fundamental do modelo proposto (ilustrada na Fig.4.1) consiste em se instalar novos terminais *hubs* para que sejam criados caminhos mais econômicos, que capturem fluxos de caminhos já existentes mais onerosos, gerando economia de recursos.

Deste modo, o modelo busca maximizar estas economias para obter o custo mínimo total da rede a partir da instalação de novos terminais concentradores.

Tal otimização é vista na forma de redução de custos quando analisada sob a ótica do agente público; como, por exemplo, no caso de instalação de um novo terminal portuário público no País. A mesma otimização também pode ser vista sob outro aspecto, como, por exemplo, uma empresa ferroviária que pretende instalar mais terminais intermodais em sua malha. O modelo se aplica igualmente pois a essência do objetivo é a mesma, apesar de ser visto a partir de outro referencial: o de aumento da lucratividade.

Cabe ressaltar que, para evitar falta de clareza no texto desta tese por mudanças de pontos de vista, referir-se-á ao modelo sempre com a primeira visão (de redução de custos).

Na revisão bibliográfica realizada, observou-se que a grande maioria dos trabalhos publicados sobre localização de terminais concentradores apresenta modelos que partem de uma situação inicial em que nenhum nó da rede está definido como *hub*. Contudo o modelo proposto apresenta uma estrutura preparada para as situações em que o objetivo seja localizar terminais concentradores “adicionais” em uma rede *hub-and-spoke* já existente (ideia ilustrada pela Figura 4.1), conforme se verificará no estudo de caso do próximo capítulo. Inclusive, no modelo proposto, quanto menor for a quantidade de novos *hubs* (passíveis de serem instalados) em relação à quantidade de *hubs* já existentes, menor será o número de variáveis de fluxo ( $x_{ijkm}$ ), conforme explicado em 4.3.2.1.

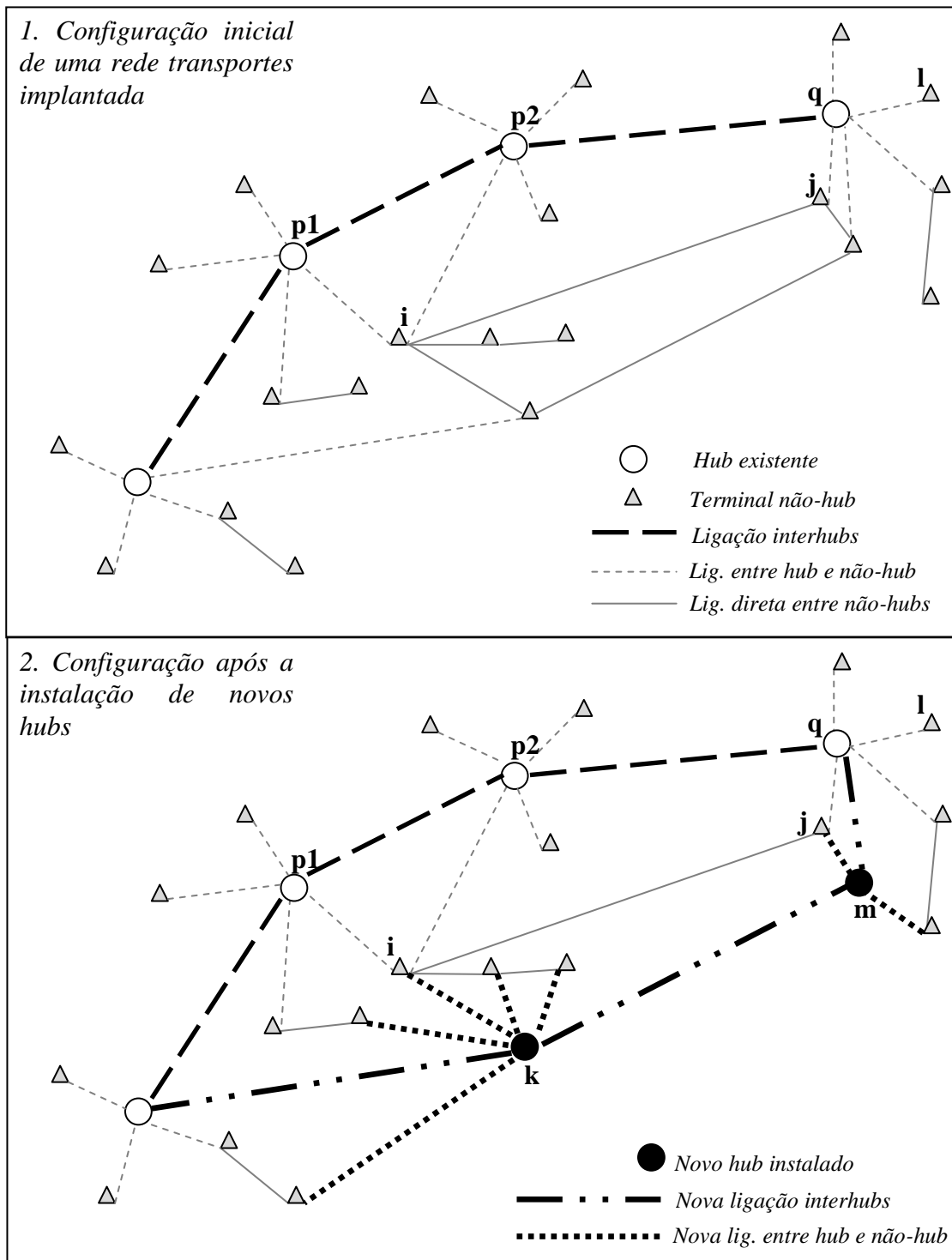


FIG. 4.1 – Exemplo de instalação de um conjunto de novos *hubs* em uma rede

#### 4.3.1. Programação Matemática com Parâmetros Probabilísticos

Há consideráveis dificuldades de ordem prática em se aplicar os métodos de programação matemática na modelagem de redes de transportes sob gerenciamento descentralizado, pois estas são extremamente fragmentadas e complexas e ainda são



operadas e utilizadas por uma diversidade muito grande de pessoal.

Por isso, as ferramentas de programação matemática, no caso destes sistemas, à primeira vista podem parecer um tanto limitadas para resolver problemas como escolha de “melhor” caminho (ou de modalidade de transporte); já que tais ferramentas realizam comparações determinísticas entre valores numéricos (maior que, menor que, etc) e, “na prática”, existem valores a serem somados e comparados que são subjetivos e intangíveis; como, por exemplo, o ônus da duração (tempo) do percurso; a segurança do trajeto; a frequência das partidas dos comboios; os hábitos arraigados dos operadores e clientes; a confiança (em determinados trajetos, empresas, modos de transporte e/ou terminais); etc.

No âmbito da Engenharia de Transportes, a experiência tem mostrado que a melhor forma de tratar estes valores intangíveis é por meio de uma modelagem probabilística.

Por outro lado, seria extremamente complexo (e aparentemente inviável) resolver até mesmo uma pequena instância de um problema de localização de *hubs* com uma formulação de programação matemática contendo parâmetros representados por funções de probabilidade.

O que possibilitou, neste trabalho, realizar uma otimização com parâmetros calculados por probabilidade, foi o fato de que estão sendo utilizados dados “agregados referentes a um período” (que, no estudo de caso do Capítulo 5, é anual). Ou seja, a demanda (computada) de fluxos de transporte intermodal entre dois vértices  $i$  e  $j$  da rede é a quantidade transportada via *hubs* “em um ano inteiro”. Portanto, mesmo existindo uma incerteza em cada decisão específica de um usuário do sistema (representada por  $P_{ijkm}$  – probabilidade de este utilizar a intermodalidade), a quantidade anual é composta de todas as decisões de todos os usuários ao longo de um ano inteiro. Deste modo, o dado agregado chamado quantidade (ou demanda) anual de transporte intermodal pode ser calculado pelo produto entre  $P_{ijkm}$  e a quantidade total transportada entre dois vértices  $i$  e  $j$  (conclusão melhor explicada em 4.3.3.2).

#### **4.3.2. Formulação de Programação Matemática do Modelo**

É conveniente representar a rede de transportes do problema como um grafo  $G = (N,A)$ , em que cada vértice do conjunto  $N$  corresponde a um ponto de origem e destino dos fluxos, enquanto os arcos do conjunto  $A$  constituem os caminhos. Define-se  $H^* \subseteq N$  como o subconjunto dos vértices da rede já estabelecidos como *hubs* e

$H \subseteq N$  como o subconjunto dos vértices considerados passíveis de receberem a instalação de um novo terminal *hub*.

$W = / w_{ij} /$  é definida como a matriz de demanda de fluxos  $w_{ij}$  de um nó  $i$  para outro nó  $j$  qualquer. E tal fluxo pode passar por um ou dois nós *hubs* intermediários, compondo um caminho  $i \rightarrow k \rightarrow m \rightarrow j$  (representado pela sequência  $ijkm$ ), cujo custo é dado por  $C_{ijkm} = w_{ij} (\chi c_{ik} + \alpha c_{km} + \delta c_{mj})$ , onde  $c_{ik}$ ,  $c_{km}$  e  $c_{mj}$  são as parcelas de custo “unitário” referentes a cada subtrecho e  $\chi$ ,  $\alpha$ ,  $\delta$  são fatores de desconto devido a economias de escala. Como no caminho direto não ocorrem as economias de escala do trajeto via *hubs*, então  $C_{ij} = w_{ij} \cdot c_{ij}$ .

Solicita-se, aqui, muita atenção para o parâmetro que introduz a maior diferença do modelo proposto (PLH-CF-GD) em relação aos modelos convencionais. Define-se  $C_{ijkm}^o$  como sendo a soma dos custos (de transporte) dos fluxos diretos e dos via *hubs* de  $i$  para  $j$  (conforme equação a seguir).

$$C_{ijkm}^o = P_{ijkm} \cdot C_{ijkm} + (1 - P_{ijkm}) \cdot C_{ij} \quad (10)$$

O termo  $C_{ijkm}^o$  garante que o modelo proposto seja compatível com a realidade das redes operadas sob gerenciamento descentralizado, em que os fluxos de transporte de um vértice  $i$  para um  $j$  se distribuem entre os dois tipos de caminho (o direto e o via *hubs*). Esta garantia está na segunda parcela do referido termo, que associa a cada caminho via *hubs* uma fração da demanda total ( $w_{ij}$ ) sendo transportada pelo caminho direto.

Demais parâmetros:

$C_h$  - custo de instalação de um terminal *hub* no vértice  $h$ ;

$C_{ij}$  - custo de transporte direto (sem utilização de *hub*) entre nós  $i$  e  $j$ ;

$C_{ijkm}$  - custo de transporte entre  $i$  e  $j$ , passando por *hubs*  $k$  e  $m$ ;

$b_{ijpq}$  - fração do fluxo de  $i$  para  $j$  (anterior à instalação dos novos *hubs*) que passa por *hubs*  $p$  e  $q$  previamente instalados;

$P_{ijkm}$  - probabilidade de um usuário do par  $ij$  optar pelo caminho via *hubs*  $km$  quando lhe for oferecido como alternativas apenas este caminho e o caminho direto.

Como variáveis, tem-se:

$y_h$  - variável binária que define se haverá um *hub* instalado no vértice  $h$ ;

$x_{ijkm}$  - define a proporção de utilização do caminho  $ijkm$  quando se consideram todos os demais caminhos “via *hubs*” de  $i$  para  $j$  (se  $ijkm$  é o único via *hubs* utilizado, então  $x_{ijkm} = 1$ );

$x_{ij}$  - variável binária que define a utilização “exclusiva” do caminho direto de  $i$  para  $j$  ( $x_{ij} \neq 0$  apenas quando “não” se utiliza transporte via *hubs* em  $ij$ ).

Para um modelo de localização não-capacitado,  $x_{ijkm}$  deveria ser sempre uma variável binária. Contudo ela não foi definida como tal a fim de não restringir mais o modelo, já que ele pode ter alguma utilidade em outros casos apenas inicialmente capacitados (conforme apresentado em 4.3.2.3).

Os parâmetros  $b_{ijpq}$  e  $P_{ijkm}$  resultam da modelagem dos fluxos pré-existentes na rede, bem como das preferências dos usuários.

Pela definição dos parâmetros e variáveis pode-se concluir que  $b_{ijpq} = P_{ijpq} \cdot x_{ijpq}$  (esta igualdade é utilizada a seguir). E, a forma da função objetivo 11a encontra-se de acordo com tal conclusão, uma vez que um produto ( $P_{ijpq} \cdot x_{ijpq}$ ) é o valor que multiplica  $C_{ijpq}$  (operação detalhada na equação 21).

Numa rede não-capacitada, em cada par  $ij$ , não há mais de um caminho via *hubs* sendo utilizado para atender a demanda  $w_{ij}$ , de tal modo que neste caso existe no máximo um único parâmetro  $b_{ijpq} \neq 0$  para cada par OD e, portanto,  $b_{ijpq} = P_{ijpq}$ , pois  $x_{ijpq} = 1$ , de modo que, considerando a rede totalmente não-capacitada, não haveria necessidade de utilizar ambos os termos  $b_{ijpq}$  e  $P_{ijpq}$ . Entretanto estes foram mantidos pelo mesmo motivo por que não se definiu  $x_{ijkm}$  como variável binária (a fim de aplicar o modelo a alguns casos com limites de capacidade apenas nos trajetos pré-existentes – item 4.3.2.3).

Se os caminhos via *hubs* pré-existentes possuem limites de capacidade e há mais de um caminho via *hubs* em uso entre um par  $ij$  (por exemplo, caminhos  $ijpq$  e  $ijp^*q^*$ ), então  $0 < x_{ijpq} < 1$  e  $0 < x_{ijp^*q^*} < 1$ , ou melhor,  $x_{ijpq} = b_{ijpq} / P_{ijpq}$  e  $x_{ijp^*q^*} = b_{ijp^*q^*} / P_{ijp^*q^*}$ .

De posse das variáveis e dos parâmetros, apresenta-se a primeira versão da formulação matemática do modelo (com índices mais generalizados e conforme a formulação de MARÍN et al., 2006):

$$\min_{x,y} F(x, y) = \left[ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \left( C_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} C_{ijkm}^o \cdot x_{ijkm} \right) \right] + \left( \sum_{h \in N} C_h \cdot y_h \right) \quad (11a)$$

sujeita às restrições 7c, 7d, 7e, 7f, 7g, 7h, 7i, 7j (item 3.5.2) e a

$$x_{ij} + \sum_{k \in N} \sum_{m \in N} x_{ijkm} = 1, \forall i, j \in N; \quad (11b)$$

$$y_h = 1, \forall h \in H^*; \quad (11c)$$

$$x_{ijpq} \in \left\{ 0, \frac{b_{ijpq}}{P_{ijpq}} \right\}, \forall i, j \in N, \forall p \wedge q \in H^* | P_{ijpq} \neq 0; \quad (11d)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j \in N; \quad (11e)$$

$$x_{ijkm} = 0, \forall i, j, k, m \in N | P_{ijkm} = 0. \quad (11f)$$

A função objetivo 11a busca o mínimo custo total da rede. Embora, para cada par  $ij$ , o fluxo por caminho direto esteja considerado nos termos  $C_{ijkm}^o$  (eq. 10), normalmente há pares origem-destino para os quais não existe trajeto via *hubs* com custo menor que o do trajeto direto. Por isso, a função objetivo contém a parcela com a variável  $x_{ij}$ . Assim, quando algum caminho via *hubs* for utilizado de  $i$  para  $j$ , o fluxo direto associado será computado por meio do termo  $C_{ijkm}^o$ ; porém, quando não houver fluxo via *hubs*, o fluxo direto é computado por meio de sua variável específica ( $x_{ij}$ ).

As restrições 11b garantem que cada fluxo  $ij$  seja totalmente roteado. As do tipo 11c definem os vértices  $h$  da rede que são *hubs* previamente instalados, de modo que seus respectivos  $C_h$  são nulos. As restrições 11d modelam os fluxos previamente existentes na rede, isto é, um fluxo não nulo que passa pelo caminho  $ijpq$  é representado por sua variável  $x_{ijpq} = b_{ijpq} / P_{ijpq}$  e, após a otimização, este fluxo pode passar a usar um novo caminho. Como a solução inclui apenas trajetos não-capacitados, a totalidade do fluxo de  $ijpq$  passaria para o novo caminho, de modo que  $x_{ijpq}$  teria somente mais um valor a assumir: zero. As restrições 11f impedem que  $x_{ijkm}$  seja igual a 1 quando  $P_{ijkm}$  for nula pois, se  $P_{ijkm} = 0$ ,  $C_{ijkm}^o$  se iguala a  $C_{ij}$ , e tanto  $x_{ijkm}$  quanto  $x_{ij}$  poderia ser igual a 1.

A maioria das restrições (7c-7j) é da formulação de MARÍN et al. (2006). Esta última foi tomada como ponto de partida porque é a que generaliza o PLH-CF Não-Capacitado e com Alocação Múltipla e não está submetida às limitações de obediência à desigualdade triangular, além de ser a que define as facetas do politopo do espaço de solução do problema. É importante observar que esta última propriedade não foi perdida com as modificações devidas às novas restrições; o que se justifica a seguir.

Os autores da referida formulação empregaram o processo de obtenção de facetas do Problema de Cobertura de Conjunto (PADBERG, 1973 e BALAS e ZEMEL, 1977, apud MARÍN et al., 2006), que se fundamenta na seguinte premissa: “qualquer conjunto de restrições de cobertura pode ser formulado de maneira ótima por meio do agrupamento (em uma mesma restrição) do máximo número de restrições cujas variáveis sejam incompatíveis entre si” – considerando-se como incompatíveis duas variáveis binárias (0 ou 1) cuja soma é sempre menor ou igual a 1. Este processo encontra-se mais detalhado em 3.5.2 (entre as formulações 5a-5k e 6a-6h).

Como as referidas modificações na formulação de MARÍN et al. (2006) não alteraram a compatibilidade entre variáveis, as restrições continuaram sendo facetas do poliedro de soluções do problema.

O número total de restrições da formulação original de MARÍN et al. (7b-7j) é dado pela eq. 12a (contado da forma tradicional, na qual não se incluem restrições que representam apenas o domínio das variáveis, como as do tipo  $x_{ijkn} \geq 0$  ou  $y_k \in \{0,1\}$ ).

$$R_o = |N|^3 + 3 \cdot |N|^2 - |N| \quad (12a)$$

A fórmula do número de restrições na nova formulação proposta é a mesma, já que a quantidade das 11b é a mesma que a das 7b e, além disso, as 11c são apenas representações de domínio.

Em muitos casos práticos de localização de terminais *hubs*, a quantidade de pontos viáveis para a instalação ( $H \subseteq N$ ) e a quantidade dos *hubs* já instalados ( $H^* \subseteq N$ ) é consideravelmente menor que a cardinalidade de  $N$ . Deste modo, o número de restrições e o de variáveis fica reduzido de forma muito significativa. Por exemplo, o de restrições é diminuído conforme a eq. 12b.

$$R_n = |N|^2 \cdot |H \cup H^*| + 3 \cdot |N|^2 - |N| \quad (12b)$$

$$R_n = (|H \cup H^*| + 3) \cdot |N|^2 - |N| \quad (12c)$$

A questão da redução de variáveis é abordada mais detalhadamente no item 4.3.2.1.

Sendo assim, julga-se adequado reescrever a formulação numa segunda versão (a que será utilizada nos experimentos), levando em conta esta observação de que a quantidade de pares de *hubs* possíveis será apenas  $|H \cup H^*|^2$  e não  $|N|^2$ .

$$\min_{x,y} F(x,y) = \left[ \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \left( C_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{k \in H \cup H^*} \sum_{m \in H \cup H^*} C_{ijkm}^o \cdot x_{ijkm} \right) \right] - \left( \sum_{h \in N} C_h \cdot y_h \right), \quad (13a)$$

$$\text{s.a } x_{ij} + \sum_{k \in H \cup H^*} \sum_{m \in H \cup H^*} x_{ijkm} = 1, \forall i, j \in N; \quad (13b)$$

$$y_k = 1, \forall k \in H^*; \quad (13c)$$

$$\sum_{m \in H \cup H^*} x_{ijkm} + \sum_{m \in H \cup H^*, m \neq k} x_{ijmk} - y_k \leq 0, \forall i, j \in N, \forall k \in H \cup H^*; \quad (13d)$$

$$\sum_{\substack{k \in H \cup H^* \\ \wedge k \neq i}} \sum_{m \in H \cup H^*} x_{ijkm} + y_i \leq 1, \forall i, j \in N, i \neq j; \quad (13e)$$

$$\sum_{\substack{k \in H \cup H^* \\ \wedge m \neq j}} \sum_{m \in H \cup H^*} x_{ijkm} + y_j \leq 1, \forall i, j \in N, i \neq j; \quad (13f)$$

$$y_i + \sum_{\substack{(k,m) \in A: \\ (k,m) \neq (i,i)}} x_{iikm} \leq 1, \forall i \in N; \quad (13g)$$

$$x_{kkkm} = x_{kkmk} = 0, \forall k, m \in H \cup H^*, m \neq k; \quad (13h)$$

$$x_{kjmk} = x_{jkmk} = 0, \forall k, m \in H \cup H^*, \forall j \in N, m \neq k \wedge j \neq k. \quad (13i)$$

$$y_k \in \{0,1\}, \forall k \in H; \quad (13j)$$

$$x_{ijkm} \geq 0, \forall i, j \in N, \forall k \in H \cup H^*, \forall m \in H \cup H^*; \quad (13l)$$

$$x_{ijpq} \in \left\{ 0, \frac{b_{ijpq}}{P_{ijpq}} \right\}, \forall i, j \in N, \forall p \wedge q \in H^* \mid P_{ijpq} \neq 0; \quad (13m)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, j \in N; \quad (13n)$$

$$x_{ijkm} = 0, \forall i, j \in N, \forall k, m \in H \cup H^* \mid P_{ijkm} = 0. \quad (13o)$$

As restrições 13b, 13c, 13m, 13n e 13o são análogas às 11b, 11c, 11d, 11e e 11f (já descritas). A restrição 13d garante que um novo caminho via um *hub*  $k$  só possa ser utilizado se houver este terminal concentrador instalado. A restrição 13e determina que um fluxo originado em um *hub* deva seguir diretamente para um *hub* de distribuição, não podendo passar antes por um *hub* de coleta, uma vez que a origem já é considerada como o *hub* de coleta. Analogamente, a 13f determina que um fluxo destinado a um *hub* deva seguir diretamente do *hub* de coleta para seu destino, não podendo passar antes por um *hub* de distribuição, uma vez que o destino já é considerado como o *hub* de distribuição. A restrição 13g é exatamente o caso em que um *hub*  $i$  é tanto origem quanto destino de um fluxo, portanto não se admite que este fluxo passe por qualquer

outro vértice, uma vez que o próprio *hub*  $i$  é coleta e distribuição. As restrições 13h e 13i seguem a mesma lógica de 13e, 13f e 13g, que impede os fluxos por caminhos redundantes.

Algumas restrições específicas complementares referentes às propriedades poliédricas de cada instância do problema também poderão ser incluídas durante uma aplicação prática, como, por exemplo, as seguintes:

- se  $C_{ij} \leq C_{ijkm}$ , então  $x_{ijkm} = 0$ , já que não há ganho em se migrar do transporte direto para o via *hubs* (i. e., o transporte segmentado não é viável);
- se a soma de  $c_{ik}$  e  $c_{mj}$  é muito grande em relação a  $c_{km}$ , então provavelmente deverá ser  $x_{ijkm} = 0$ ;
- se  $i = j \Rightarrow x_{ijkm} = 0, \forall i, j \in N$ ;
- na instalação de terminais intermodais,  $x_{ijkm} = 0$  sempre que  $k = m$ , já que não ocorre a economia devida ao modo de grande capacidade entre  $k$  e  $m$ .

Outra sugestão de restrição específica é a que impeça um novo terminal concentrador de ser instalado num local em que venha a competir com outro *hub* já existente a ponto daquele levar este à inviabilidade. Isto pode ser feito por meio de limitações no conjunto de vértices onde sejam admitidas as instalações de novos *hubs* ( $H \subseteq N$ ). Assim, não pertenceriam a este conjunto, por exemplo, os nós muito próximos de um terminal concentrador já existente ou aqueles que a experiência do analista ou outros condicionantes (e. g., fatores intangíveis) indicar como inviáveis.

Como se trata de um processo iterativo, caso o analista formule um problema cuja solução inclua um novo *hub* que venha a ser considerado inadequado, basta que se exclua de  $H$  este vértice indesejável e, em seguida, se aplique novamente o método de busca da solução ótima. Para se avaliar se uma solução encontrada leva algum *hub* pré-existente à inviabilidade, basta que se compute a quantidade de fluxos que deverá permanecer trafegando por cada um dos antigos *hubs* (após a instalação dos novos), concluindo se ela é suficiente para manter tal *hub* como um empreendimento viável.

#### 4.3.2.1. Redução do Número de Variáveis

Nos casos práticos em que o modelo proposto se aplica, é comum a rede já possuir *hubs* instalados e também apresentar fluxos de transportes trafegando pelos mesmos. Em conseqüência, os caminhos via *hubs* podem ser divididos em três classes:

- a. os que incluem pelo menos um vértice candidato a novo *hub*, portanto não previamente utilizado ( $ijk'm'$ );
- b. os que apresentam fluxos de transporte antes da otimização (i. e.,  $x_{ijpq} \neq 0$ ), com ambos os *hubs* já previamente instalados;
- c. os que não apresentam fluxos de transporte antes da otimização (i. e.,  $x_{ijrs} = 0$ ), mas cujos *hubs* já estão previamente instalados.

Os caminhos do primeiro tipo são as principais variáveis do problema e cada um deles só poderá ser utilizado caso o(s) *hub(s)* correspondente(s) não instalado(s) venha(m) a fazer parte da solução do problema.

A variável que define o uso de um caminho do segundo tipo tem valor inicial diferente de 0 no processo de otimização, sendo  $x_{ijpq} = 1$  se a rede é não-capacitada ou assumindo valores entre 0 e 1 para exceções descritas em 4.3.2.3. Um caminho do segundo tipo pode deixar de ser utilizado caso um novo caminho mais econômico seja criado a partir da instalação dos novos *hubs* (pertencentes à solução do problema), isto é, se  $C^{\circ}_{ijk'm'} < C^{\circ}_{ijpq}$ , então  $x_{ijk'm'} = 1$  e  $x_{ijpq} = 0$ . Em consequência,  $x_{ij}$  (caminho direto) e as demais variáveis tetraindexadas em  $ij$  também se anulam.

Pode-se considerar que os caminhos do terceiro tipo (não previamente utilizados,  $ijrs$ ) continuarão a “não” ser utilizados após o processo de otimização, pois o seu não uso anterior já demonstra que são soluções de roteamento piores que as dos demais caminhos via *hubs* previamente utilizados ( $ijpq$ ) ou piores que as dos caminhos diretos ( $ij$ ). De tal forma que as variáveis correspondentes aos mesmos podem ser definidas como nulas e não constar no algoritmo de otimização (i. e.,  $x_{ijrs} = 0$ ).

Assim, nos casos em que a intenção do analista é localizar novos *hubs* numa rede em que já se encontram outros instalados, a redução do número de variáveis pode ser bastante significativa.

Nas formulações convencionais, o número de variáveis de fluxo ( $x_{ijkm}$ ) é igual a  $|N|^2 \cdot |H \cup H^*|^2$ , já que nestes casos é necessário considerar como variáveis tanto os fluxos novos quanto os que já estiverem passando pelos *hubs* anteriormente instalados. Contudo, na formulação ora proposta, não é necessário considerar, como uma variável, um caminho via *hubs* já anteriormente não utilizado. As variáveis do problema são apenas as referentes aos fluxos que podem vir a trafegar por novos caminhos segmentados (i. e., via novos *hubs* instalados), além de mais uma variável do segundo tipo de caminho (ou do caminho direto,  $x_{ij}$ ) para cada par  $ij$ . Assim, o novo número de variáveis de fluxo é dado pela equação a seguir.



$$V = |N|^2 \cdot (|H \cup H^*| \cdot |H| + |H| \cdot |H^*| + 1) \quad (14)$$

Para exemplificar o quanto esta redução pode ser significativa, a tabela a seguir compara estas quantidades de variáveis de fluxos (multiplicados por  $1/|N|^2$ ) para um caso em que o a quantidade total de *hubs* (incluídos os já instalados e não instalados) é 12 – como no estudo de caso do Capítulo 5, em que há 9 portos instalados e mais 3 portos candidatos a *hub* da rede (gerando uma redução de  $144 \cdot |N|^2$  para  $64 \cdot |N|^2$  variáveis de fluxo).

TAB. 4.1 – Comparação de quantidade de variáveis de fluxo ( $x_{ijkm}$ )

$ H^* $	$ H $	Formulação Convencional	Formulação Proposta
		$ H \cup H^* ^2$	$ H  \cdot ( H \cup H^*  +  H^* )$
1	11	144	144
2	10	144	141
3	9	144	136
4	8	144	129
5	7	144	120
6	6	144	109
7	5	144	96
8	4	144	81
9	3	144	64
10	2	144	45
11	1	144	24

Analogamente às variáveis de fluxo, a quantidade de variáveis de decisão de instalação de um novo terminal concentrador ( $y_n$ ) também é reduzida de  $|N|$  para  $|H|$ .

#### 4.3.2.2. Significado Prático da Formulação com Parâmetros $C^o_{ijkm}$

Nos modelos convencionais, a substituição de um fluxo direto  $x_{ij}$  (ou via *hubs*  $x_{ijpq}$ ) pré-existente por um novo  $x_{ijk'm'}$ , implica apenas numa simples redução de custo igual a  $C_{ij} - C_{ijk'm'}$  (ou  $C_{ijpq} - C_{ijk'm'}$ ). Porém, devido à maior complexidade do termo de custos do modelo criado ( $C^o_{ijkm}$ ), julga-se conveniente uma análise do significado prático do efeito (no custo total da rede) causado por uma nova solução encontrada pelo processo de otimização.

Considere um determinado par  $ij$  para o qual todo o fluxo de transporte pré-existente seja definido por  $x_{ijpq} = 1$  (i. e., todo o transporte via *hubs* é atendido somente

pelo par de vértices  $p$  e  $q$ , tal que  $p \wedge q \in H^*$ ). Podem-se escrever as parcelas de custos de transporte do par  $ij$  na função objetivo, da seguinte forma:

$$\begin{aligned} C_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{k \in H \cup H^*} \sum_{m \in H \cup H^*} C_{ijkm}^o \cdot x_{ijkm} &= \\ = \sum_{k \in H \cup H^*} \sum_{m \in H} C_{ijkm}^o \cdot x_{ijkm} + \sum_{k \in H} \sum_{m \in H^*} C_{ijkm}^o \cdot x_{ijkm} + C_{ijpq}^o \cdot x_{ijpq} \end{aligned} \quad (15)$$

Como se trata de rede não-capacitada, há apenas uma variável do primeiro tipo de caminho ( $x_{ijk'm'}$ , referente ao termo de menor custo  $C_{ijk'm'}^o$ ) não nula. Portanto

$$C_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{k \in H \cup H^*} \sum_{m \in H \cup H^*} C_{ijkm}^o \cdot x_{ijkm} = C_{ijk'm'}^o \cdot x_{ijk'm'} + C_{ijpq}^o \cdot x_{ijpq} \quad (16)$$

Desta forma, se  $C_{ijk'm'}^o < C_{ijpq}^o$ , então  $x_{ijk'm'}$  passa a ser igual a 1 enquanto  $x_{ijpq}$  passa do valor 1 para 0; o que provocará a seguinte redução no custo de transporte da rede:

$$\begin{aligned} C_{ijpq}^o - C_{ijk'm'}^o &= \\ = [P_{ijpq} \cdot C_{ijpq} + (1 - P_{ijpq}) \cdot C_{ij}] - [P_{ijk'm'} \cdot C_{ijk'm'} + (1 - P_{ijk'm'}) \cdot C_{ij}] &= \\ = [P_{ijpq} \cdot C_{ijpq} - P_{ijk'm'} \cdot C_{ijk'm'}] + [(1 - P_{ijpq}) - (1 - P_{ijk'm'})] \cdot C_{ij} &= \\ = [P_{ijpq} \cdot C_{ijpq} - P_{ijk'm'} \cdot C_{ijk'm'}] + [P_{ijk'm'} - P_{ijpq}] \cdot C_{ij} \end{aligned} \quad (17)$$

Como  $P_{ijk'm'} = P_{ijpq} + (P_{ijk'm'} - P_{ijpq})$ , substitui-se  $P_{ijk'm'}$  na última expressão.

$$\begin{aligned} [P_{ijpq} \cdot C_{ijpq} - P_{ijpq} \cdot C_{ijk'm'} - (P_{ijk'm'} - P_{ijpq}) \cdot C_{ijk'm'}] + [P_{ijk'm'} - P_{ijpq}] \cdot C_{ij} &= \\ = [P_{ijpq} \cdot (C_{ijpq} - C_{ijk'm'}) - (P_{ijk'm'} - P_{ijpq}) \cdot C_{ijk'm'}] + [P_{ijk'm'} - P_{ijpq}] \cdot C_{ij} &= \\ = [P_{ijpq} \cdot (C_{ijpq} - C_{ijk'm'})] + [(P_{ijk'm'} - P_{ijpq}) \cdot (C_{ij} - C_{ijk'm'})] \end{aligned} \quad (18)$$

O primeiro termo da expressão final significa a economia de recursos proporcionada pela transferência dos fluxos via *hubs* de  $ijpq$ , que deixaram de trafegar pelos terminais concentradores  $p$  e  $q$  e passaram a utilizar o caminho via  $k'$  e  $m'$ .

Nota-se que no segundo termo há uma diferença entre as probabilidades de utilização do caminho via *hubs* ( $P_{ijk'm'} - P_{ijpq}$ ), que é devida à diferença entre as

características dos dois caminhos, isto é, um trajeto é mais atraente que o outro, causando uma maior utilização do transporte via *hubs* e menor do transporte direto. Portanto esta diferença representa a fração de usuários que não utilizavam um caminho via *hubs* e passarão a utilizar devido, por exemplo, a uma maior atratividade de  $ijk'm'$ . Por isso, a redução de custo devida a estes usuários será a diferença entre o custo pelo caminho direto e o custo pelo novo caminho segmentado.

É importante observar que mesmo que esta diferença de probabilidades ou a diferença de custos ( $C_{ijpq} - C_{ijk'm'}$ ) seja negativa, ainda assim  $C_{ijk'm'}$  pode continuar sendo menor que  $C_{ijpq}$ . Para isto, basta que os demais parâmetros façam a necessária compensação.

Intuitivamente pode-se incorrer no erro de pensar que, sempre que  $C_{ijk'm'} > C_{ijpq}$ , a probabilidade  $P_{ijk'm'}$  será menor que a  $P_{ijpq}$  (já que o caminho  $ijk'm'$  seria menos atraente que o  $ijpq$ ) e, portanto,  $C_{ijk'm'}$  será maior que  $C_{ijpq}$ ; contrariando a última observação. Também, analogamente, poderia se esperar que, caso  $P_{ijk'm'} < P_{ijpq}$ , então provavelmente o custo  $C_{ijk'm'}$  seria maior que o  $C_{ijpq}$ , levando  $C_{ijk'm'}$  a ser maior que  $C_{ijpq}$ . Entretanto, na prática da modelagem de transportes, isso não necessariamente é uma verdade, já que outros fatores além dos custos considerados podem influenciar a escolha do usuário (v. item 4.3.3.1).

#### 4.3.2.3. Adequabilidade do Modelo a Redes Inicialmente Capacitadas

Como o modelo proposto é não-capacitado, vale a premissa de que a “solução do problema” inclui, para cada par  $ij$ , apenas o caminho direto e, no máximo, mais um único novo caminho do tipo via *hubs*. É importante lembrar que o primeiro caminho (normalmente mais caro que o segundo) faz parte da solução, não por limite de capacidade do segundo, mas sim devido à não uniformidade do critério de escolha de melhor caminho da rede (descrita no item 4.1). Portanto o fato de a solução apresentar somente um único novo caminho via *hubs* é que caracteriza o modelo como não-capacitado.

Entretanto, além dos casos de redes totalmente não-capacitadas (para os quais o modelo foi desenvolvido), há outros casos práticos em que os caminhos via *hubs* pré-existentes apresentam limites de capacidade embora os novos caminhos via *hubs* a serem criados não possuam tal limitação. De tal modo que, num levantamento de dados iniciais sobre os fluxos pré-existentes, pode-se encontrar em uso não apenas um

caminho  $ijpq$  intermediando um par  $ij$ , mas também outros:  $ijp^*q^*$ ,  $ijp'q'$ , etc.

Na modelagem de transportes interpreta-se tal situação da seguinte maneira: o trajeto  $ijpq$  encontra-se bastante solicitado (ou mesmo congestionado) e, portanto, motiva a utilização de outros trajetos (ainda que de custos maiores).

Um exemplo desta situação seria o uso simultâneo, na rede da Figura 4.1, dos caminhos  $ijp_1q$  e  $ijp_2q$ . Outro exemplo são os usuários de cabotagem do Vale do Paraíba Paulista, que podem optar por mais de um porto para despachar suas cargas (Porto de Santos e de Porto de Itaguai) – considerando-se os portos como *hubs* da cabotagem.

Não é possível empregar um modelo não-capacitado de localização a um problema cuja “solução” possa incluir novos caminhos com limites de capacidade. No entanto este emprego pode ser aceito para certos casos em que tais limites se encontram apenas nos caminhos via “*hubs* previamente instalados”. Já que, de acordo com o modelo proposto, não se permite que estes caminhos façam parte da solução do problema de otimização. Isto é, na solução do problema, aparecem apenas caminhos novos e portanto sem limite de capacidade.

Para a compreensão desta proposta, define-se nas letras **a** até **c** (a seguir) a maneira como a solução ótima do problema é definida.

**a.** Considera-se, por exemplo, um determinado par  $ij$  em que os fluxos de transporte “pré-existent” se dividam entre os caminhos  $ijpq$  e  $ijp^*q^*$  (i. e.,  $0 < x_{ijpq} < 1$  e  $0 < x_{ijp^*q^*} < 1$ , tal que  $p, q, p^*$  e  $q^*$  sejam *hubs* previamente instalados). Sendo assim, as parcelas de custos de transporte do par  $ij$  na função objetivo podem ser reduzidas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} C_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{k \in H \cup H^*} \sum_{m \in H \cup H^*} C_{ijkm}^o \cdot x_{ijkm} &= \\ = \sum_{k \in H \cup H^*} \sum_{m \in H} C_{ijkm}^o \cdot x_{ijkm} + \sum_{k \in H} \sum_{m \in H^*} C_{ijkm}^o \cdot x_{ijkm} + C_{ijpq}^o \cdot x_{ijpq} + C_{ijp^*q^*}^o \cdot x_{ijp^*q^*} \end{aligned} \quad (19)$$

**b.** Ao se aplicar o modelo, se o novo caminho via *hubs* (de  $i$  para  $j$ ) de menor custo é  $ijk'm'$ , a última equação pode ser escrita como

$$C_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{k \in H \cup H^*} \sum_{m \in H \cup H^*} C_{ijkm}^o \cdot x_{ijkm} = C_{ijk'm'}^o \cdot x_{ijk'm'} + C_{ijpq}^o \cdot x_{ijpq} + C_{ijp^*q^*}^o \cdot x_{ijp^*q^*} \quad (20)$$

**c.** Portanto, o processo de otimização leva a um dos seguintes resultados:

- se  $C^o_{ijk'm'} < C^o_{ijpq} < C^o_{ijp^*q^*}$ , então  $x_{ijk'm'} = 1$ , enquanto os valores de  $x_{ijpq}$  e  $x_{ijp^*q^*}$  passam a ser iguais a 0;
- se  $C^o_{ijpq} < C^o_{ijk'm'} < C^o_{ijp^*q^*}$ , então  $x_{ijk'm'}$  recebe o valor  $x_{ijp^*q^*}$ , enquanto o valor de  $x_{ijpq}$  se mantém e o de  $x_{ijp^*q^*}$  passa a ser igual a 0;
- se  $C^o_{ijpq} < C^o_{ijp^*q^*} < C^o_{ijk'm'}$ , então  $x_{ijk'm'} = 0$ , enquanto os valores de  $x_{ijpq}$  e  $x_{ijp^*q^*}$  se mantêm.

Assim, nos casos em que esses resultados sejam satisfatórios, pode-se aplicar o modelo não-capacitado proposto, ainda que os caminhos via *hubs* previamente instalados apresentem limites de capacidade.

Contudo pode não haver aceitação do modelo em determinadas aplicações devido ao segundo caso letra c ( $C^o_{ijpq} < C^o_{ijk'm'} < C^o_{ijp^*q^*}$ ); em que o valor  $x_{ijk'm'}$ , na solução do problema, recebe exatamente o valor que  $x_{ijp^*q^*}$  apresentava antes da otimização.

Se o parâmetro de custo fosse do tipo convencional ( $C_{ijkm}$ ), não haveria qualquer crítica. Porém, com o parâmetro de custo utilizado  $C^o_{ijkm}$ , a simples substituição de  $x_{ijp^*q^*}$  por  $x_{ijk'm'}$  pode não ser considerada inadequada, dependendo da interpretação prática desta operação matemática na análise específica que estiver sendo realizada (conforme se explica adiante).

Para compreender esta questão, toma-se o exemplo representado pela equação 19 onde, na situação anterior à implantação de novos *hubs* (em que  $0 < x_{ijpq} < 1$  e  $0 < x_{ijp^*q^*} < 1$  e  $x_{ijk'm'} = 0$ ), o custo de transporte total do par *ij* é dado da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
C_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{k \in H \cup H^*} \sum_{m \in H \cup H^*} C^o_{ijkm} \cdot x_{ijkm} &= C^o_{ijpq} \cdot x_{ijpq} + C^o_{ijp^*q^*} \cdot x_{ijp^*q^*} = & (21) \\
&= [P_{ijpq} \cdot C_{ijpq} + (1 - P_{ijpq}) \cdot C_{ij}] \cdot x_{ijpq} + [P_{ijp^*q^*} \cdot C_{ijp^*q^*} + (1 - P_{ijp^*q^*}) \cdot C_{ij}] \cdot x_{ijp^*q^*} = \\
&= [P_{ijpq} \cdot x_{ijpq} \cdot C_{ijpq} + P_{ijp^*q^*} \cdot x_{ijp^*q^*} \cdot C_{ijp^*q^*}] + [(1 - P_{ijpq}) \cdot x_{ijpq} + (1 - P_{ijp^*q^*}) \cdot x_{ijp^*q^*}] \cdot C_{ij}
\end{aligned}$$

Nota-se que a quantidade de fluxo que multiplica o custo  $C_{ijp^*q^*}$ , por exemplo, é o produto de  $P_{ijp^*q^*}$  por  $x_{ijp^*q^*}$ . De tal modo que, neste caso em que se aplica o modelo a uma rede com “limites de capacidades iniciais”, não se pode considerar que  $P_{ijp^*q^*}$  seja a fração dos fluxos de *ij* que passa por  $p^*q^*$ ; uma vez que esta fração é dada pelo referido produto, já que é este produto que multiplica  $C_{ijp^*q^*}$ .

Já em uma rede totalmente não-capacitada pode-se admitir que  $P_{ijp^*q^*}$  é a referida fração porque as variáveis *x* são binárias por natureza.

Após a instalação de novos *hubs*,  $x_{ijpq}$  mantém seu valor original,  $x_{ijk'm'}$  recebe o

valor original de  $x_{ijp^*q^*}$  e  $x_{ijp^*q^*}$  é anulado. Então os custos de transporte do par  $ij$  da última expressão tomam a forma a seguir:

$$\begin{aligned}
C_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{k \in H \cup H^*} \sum_{m \in H \cup H^*} C_{ijk'm}^o \cdot x_{ijk'm} &= C_{ijpq}^o \cdot x_{ijpq} + C_{ijk'm'}^o \cdot x_{ijk'm'} = \quad (22) \\
&= [P_{ijpq} \cdot x_{ijpq} \cdot C_{ijpq} + P_{ijk'm'} \cdot x_{ijk'm'} \cdot C_{ijk'm'}] + [(1 - P_{ijpq}) \cdot x_{ijpq} + (1 - P_{ijk'm'}) \cdot x_{ijk'm'}] \cdot C_{ij} = \\
&= [P_{ijpq} \cdot x_{ijpq} \cdot C_{ijpq} + P_{ijk'm'} \cdot x_{ijp^*q^*} \cdot C_{ijk'm'}] + [(1 - P_{ijpq}) \cdot x_{ijpq} + (1 - P_{ijk'm'}) \cdot x_{ijp^*q^*}] \cdot C_{ij}
\end{aligned}$$

Portanto, as frações da demanda total de transporte via *hubs* entre  $i$  e  $j$  (nas situações anterior e posterior à instalação dos novos *hubs*) são dadas pela Tabela 4.2.

TAB. 4.2 – Frações da demanda de  $ij$  para cada caminho via *hubs*

	$ijpq$	$ijp^*q^*$	$ijk'm'$
Antes da instalação dos novos <i>hubs</i>	$P_{ijpq} \cdot x_{ijpq}$	$P_{ijp^*q^*} \cdot x_{ijp^*q^*}$	$0$
Após a instalação dos novos <i>hubs</i>	$P_{ijpq} \cdot x_{ijpq}$	$0$	$P_{ijk'm'} \cdot x_{ijp^*q^*}$

Sendo assim, a aplicação do modelo em redes com caminhos pré-existentes capacitados pode não ser aceita se a seguinte hipótese for considerada verdadeira e relevante: se a probabilidade  $P_{ijk'm'}$  é diferente da  $P_{ijp^*q^*}$  então há diferença entre a proporção  $x_{ijpq}/x_{ijk'm'}$  e a proporção  $x_{ijpq}/x_{ijp^*q^*}$ . Por exemplo, se  $P_{ijpq}$  é maior que  $P_{ijk'm'}$ , e  $P_{ijk'm'}$  é muito maior que  $P_{ijp^*q^*}$ , a razão  $x_{ijpq}/x_{ijk'm'}$  poderia ser menor que a razão  $x_{ijpq}/x_{ijp^*q^*}$ , isto é, quando o caminho alternativo ao  $ijpq$  é somente  $ijp^*q^*$ , os usuários podem optar por esperar o  $ijpq$  ficar bastante congestionado para então passar a utilizar o  $ijp^*q^*$ , mas se o novo caminho alternativo ao  $ijpq$  (o caminho  $ijk'm'$ ) é muito mais atraente que o  $ijp^*q^*$  ( $P_{ijk'm'} \gg P_{ijp^*q^*}$ ), então pode ser que os usuários passem a utilizar o  $ijk'm'$  logo que o  $ijpq$  já se mostrar um pouco congestionado. Portanto, dependendo da aplicação, o analista pode considerar inadequado atribuir simplesmente o valor prévio de  $x_{ijp^*q^*}$  à variável  $x_{ijk'm'}$  e pode considerar necessário atribuir outro valor para  $x_{ijk'm'}$  e também para  $x_{ijpq}$ .

O argumento contra esta última interpretação é que, para muitos casos práticos esta diferença entre  $x_{ijpq}/x_{ijk'm'}$  e  $x_{ijpq}/x_{ijp^*q^*}$  não é significativa, estando abaixo do nível de tolerância às imprecisões adotado no caso em análise. De modo que, numa aplicação prática em que as três explicações a seguir (sobre os resultados da Tabela 4.2) possam ser aceitas, o modelo não-capacitado estará habilitado para a análise de uma rede com

trajetos “previamente existentes que possuam limites de capacidade”.

- A fração de fluxos pelo caminho  $ijpq$  se mantém constante porque é o trajeto de menor custo  $C_{ijpq}^o$  e, portanto, se mantém em uso até o limite de capacidade em que já era utilizado.
- Os fluxos do caminho  $ijp^*q^*$  passam a trafegar pelo  $ijk'm'$  porque este último passa a ser o caminho alternativo a  $ijpq$  de menor custo.
- A fração de fluxos pelo caminho  $ijk'm'$  é diferente da que passava por  $ijp^*q^*$  porque a probabilidade  $P_{ijk'm'}$  é diferente da  $P_{ijp^*q^*}$ , isto é, os dois caminhos atraem uma quantidade diferente de fluxos, podendo por exemplo  $ijk'm'$  atrair mais fluxos que  $ijp^*q^*$ , de modo a provocar a migração de fluxos que utilizavam o caminho direto para passarem a utilizar o trajeto via *hubs*.

Finalmente, pode-se concluir que o modelo criado se aplica a qualquer caso de rede não-capacitada. E, nos casos em que a rede possui limites de capacidade apenas nos caminhos previamente existentes (mas não nos novos), é preciso verificar apenas a tolerância específica (às imprecisões) na análise em curso.

Vale ressaltar que, no presente trabalho, se considera que todos os caminhos diretos ( $x_{ij}$ , que não passam por *hubs*) não apresentam limites de capacidade, qualquer que seja o caso em estudo.

Para elaborar um modelo em que possa haver limites de capacidade tanto nos caminhos previamente existentes quanto nos novos, é preciso outro tipo de formulação. Uma vez que seria extremamente complexo considerar mais de um caminho do tipo  $ijk'm'$  (criados a partir da instalação de novos *hubs*) absorvendo simultaneamente suas respectivas partes dos fluxos entre  $ij$ ; pois, para isso, seria necessário modelar a opção do usuário entre as alternativas direta e as mais de uma alternativas via *hubs*, gerando para cada novo caminho via *hubs* uma probabilidade de utilização específica. Isto faria com que cada  $P_{ijk'm'}$  passasse a depender também das probabilidades de utilização dos demais caminhos via *hubs* entre  $ij$  e não apenas do caminho direto.

Por este motivo, considerar a rede totalmente capacitada torna o cálculo impraticável caso não se elabore outro modelo, o que é uma sugestão para um trabalho futuro.

#### 4.3.2.4. Dados de Campo para a Formulação

No caso específico desta pesquisa será necessária uma maior quantidade de dados

de campo. Na maioria nos modelos convencionais de localização de *hubs*, estes dados de campo necessários são apenas uma matriz de demanda de fluxos de transporte entre os nós ( $W = / w_{ij} /$ ), um vetor de custos fixos para a instalação de *hubs* nos nós ( $C_H = (c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n)$ ) que inclui os custos de instalação de um *hub* para cada nó candidato) e uma matriz de custos de transporte nos arcos da rede ( $C = / C_{ijkm} /$  que define o custo entre cada par de vértices  $i$  e  $j$  passando por cada par de *hubs*  $k$  e  $m$ ).

No modelo proposto nesta pesquisa, além dos referidos dados, serão também necessários mais dois conjuntos de informações:

- a. valores de fluxos já existentes antes da instalação dos novos *hubs* (utilizados para modelar a proporção  $b_{ijkm}$  de uso prévio de trajeto via *hubs* em cada um dos pares  $ij$ );
- b. estimativas de probabilidades  $P_{ijkm}$  de utilização dos possíveis novos caminhos via *hubs*, que determinarão a proporção esperada de fluxos segmentados após a inclusão de novos *hubs*.

O processo de coleta dos dados de campo não é objetivo desta tese. Portanto não será apresentado um método específico para tal procedimento, haja vista que a metodologia proposta tem o objetivo apenas de orientar a escolha de localizações de novos *hubs* com base na solução computacional do “modelo matemático criado”.

Embora se admita a existência (na rede considerada) de mais de uma modalidade de grande capacidade (ferroviária, hidroviária, etc) a identificação da modalidade de transporte em cada arco não é relevante para o “processo de otimização”. Para este, o que importa é o tipo de caminho, isto é, direto ou via *hubs*.

Isto se deve ao fato de que o modelo em questão está sendo proposto na forma de rede (grafo), que particiona os trechos de vias em arcos. Assim, para cada arco, estão registrados seus atributos que permitem os cálculos dos melhores caminhos, dispensando informações sobre a modalidade utilizada no mesmo.

Porém, apenas para atender outras funções secundárias, recomenda-se armazenar em algum campo (das entidades do tipo arco) a modalidade de transporte empregada no respectivo arco.

### **4.3.3. Conceitos da Modelagem de Transportes Utilizados**

Neste item abordam-se os tópicos relativos à teoria de modelagem de transporte que serviram de base para a formulação do modelo proposto. Os principais assuntos



detalhados são os seguintes:

- a. determinação das probabilidades  $P_{ijkm}$  de escolha do caminho via *hubs* (em detrimento do caminho direto) por meio dos valores de função utilidade do caminho direto e do via *hubs* (4.3.3.2);
- b. determinação de função utilidade para os caminhos da rede (4.3.3.3), levando-se em conta os fatores que influenciam a opção entre os referidos trajetos.

#### **4.3.3.1. Tipos de Transportes e Fatores que Influenciam a Escolha Destes**

Neste trabalho, para fins de modelagem de redes, os tipos de transporte não serão divididos tradicionalmente por modalidade, pois, como será mostrado a seguir, a classificação mais eficaz para o modelo de otimização a ser empregado é a que separa os tipos em apenas duas vertentes: o transporte via *hubs* e o transporte direto (este último entendido como transporte porta a porta, quase sempre rodoviário).

Vale lembrar que o propósito fundamental da metodologia é estudar as oportunidades de instalação de novos terminais concentradores, com o intuito de incentivar a substituição de transporte direto por transporte via *hubs*.

Conforme já referido, na grande maioria dos trabalhos publicados sobre o Problema de Localização de *Hubs*, considera-se que, se for criado um novo caminho alternativo (interligando um par origem-destino) cujo custo de transporte seja menor do que os dos demais caminhos que interligam tal par, todos os fluxos destes caminhos já existentes migrarão para o novo trajeto. Contudo, na prática, essa mudança não ocorre de forma tão radical, pois haverá uma parcela que permanecerá utilizando os caminhos anteriores.

Esta “aparente” incoerência ocorre porque, os critérios em que um usuário se baseia para fazer a sua opção por um determinado trajeto não envolvem apenas o fator custo, mas também uma série de fatores intangíveis difíceis de quantificar, obrigando a utilização de critérios de caráter subjetivo.

Dentre os fatores que orientam esta opção, vale destacar aqueles que NOVAES (1986) considera mais influentes (discriminados a seguir).

Fatores ligados ao tempo:

- tempo total de deslocamento;
- confiabilidade (representada pelo desvio padrão do tempo de viagem);
- tempo despendido nos pontos de transferência;

- tempo de espera para início da viagem (ligado à frequência das saídas);
- existência de horários marcados (que reduzem alguns tempos de espera).

Fatores ligados ao custo:

- custos diretos (tarifa, combustível, pedágios, manejo de carga, etc);
- custos indiretos (armazenagem, juros, seguros, etc).

Fatores ligados à segurança:

- probabilidade de acidentes;
- probabilidade de avaria da carga;
- probabilidade de roubo ou furto.

Fatores ligados ao conforto e à conveniência:

- número de transbordos;
- número de paradas intermediárias;
- hábito e confiança.

#### **4.3.3.2. Modelando a Probabilidade de Escolha de um Tipo de Caminho**

A escolha do tipo de transporte entre cada par origem-destino considerando fatores quantificáveis e intangíveis pode ser feita por meio da utilização de um enfoque comportamental na análise das demandas, o qual tem origem na *Behavioral Theory* de DOMENCICH e MCFADDEN (1975).

Segundo NOVAES (1986), de acordo com tal teoria, “as decisões adotadas pelos indivíduos em relação ao consumo de um bem ou serviço envolvem uma parcela de subjetivismo, mas incorporam também fatores racionais (p. ex., custo e tempo)”. Deste modo, a escolha será sempre orientada por um elenco das opções disponíveis numa ordem de preferência, estabelecida a partir do conjunto de inclinações particulares (idiosincrasias e gostos) e de condicionantes econômico-financeiras.

Neste sentido, existe a hipótese de que os indivíduos, embora incorporem fatores subjetivos às suas decisões, mantêm um padrão comportamental ao longo do tempo. O que pressupõe que estes padrões não sejam erráticos ou totalmente aleatórios, mas se conservem dentro de determinadas condições, o que permite sua modelagem.

Resumindo, NOVAES (1986) considera três premissas fundamentais na concepção de tais modelos (descritas a seguir).

- Há uma parcela de racionalidade no processo de decisão do indivíduo,

principalmente no que diz respeito à avaliação comparativa das variáveis quantificáveis, como o custo e o tempo.

- Há, no entanto, uma componente de subjetividade, medida através de uma função utilidade (discutida a seguir) que “pondera” as variáveis quantificáveis (tempo, custo, etc).
- Cada indivíduo reage diferentemente aos atributos diversos das alternativas, o que gera uma distribuição probabilística para a referida função utilidade.

A parte não aleatória desta função utilidade (eq. 23a) contém variáveis determinísticas quantificáveis ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), coeficientes<sup>3</sup> de ponderação ( $a_1, a_2, \dots, a_n$ ) e uma constante  $a_0$ .

$$V = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n. \quad (23a)$$

De acordo com a terceira premissa inclui-se na função utilidade uma componente aleatória, então a equação 23b passa a representar a utilidade que cada opção disponível  $i$  tem para um indivíduo qualquer.

$$U_i = V_i + \varepsilon_i, \quad (23b)$$

onde  $\varepsilon_i$  (de acordo com ORTÚZAR e WILLUMSEN, 1995) pode ser considerada, sem perda de generalidade, uma variável aleatória com média zero que modela a distribuição das maneiras como os diversos indivíduos percebem a utilidade da opção  $i$ .

No modelo proposto esta função utilidade final ( $U_i$ ) servirá para modelar o processo de opção entre dois trajetos com tipos distintos de transporte (e. g., um direto e outro via *hubs*). Já entre trajetos de mesmo tipo utiliza-se um critério objetivo (menor custo), uma vez que a diferença devida à subjetividade não é tão significativa quanto na decisão entre dois caminhos de tipos distintos.

Sendo assim, para um determinado fluxo de transporte entre dois vértices da rede (p. ex.,  $i$  e  $j$ ), se um novo caminho  $ijkm$  via *hubs* é criado (com a instalação de novos *hubs*), ele terá um valor de função utilidade  $U_{ijkm}$  e seu concorrente do outro tipo (transporte direto) terá também um valor  $U_{ij}$ . Então a escolha do novo caminho  $ijkm$  (por parte de um usuário qualquer) passa a ser regida por um processo probabilístico, onde a probabilidade de se escolher o trajeto via *hubs* entre nós  $i$  e  $j$  é definida por

$$P_{ijkm} = \text{prob}(U_{ijkm} > U_{ij}). \quad (23c)$$

ORTÚZAR e WILLUMSEN (1995) apresentam os modelos de escolha modal empregados na estimativa desta probabilidade: o Logit e o Probit – sendo o primeiro indubitavelmente mais simples e por isso mais amplamente utilizado. Normalmente, opta-se pelo Probit quando há questões em que o Logit não se adapta bem (como as seguintes):

- as alternativas não podem ser consideradas independentes, como o caso de escolha entre ônibus, trem urbano e carro particular, em que as duas primeiras opções têm maior afinidade entre si;
- há relevantes variações de preferências entre indivíduos (por exemplo, as variações no custo são percebidas de forma diferente de acordo com a renda de cada classe de usuários).

Assim, para o caso específico desta pesquisa, indica-se o método Logit, cuja probabilidade de 23c é dada pela eq. 23d.

$$P_{ijkm} = \frac{\exp(U_{ijkm})}{\exp(U_{ijkm}) + \exp(U_{ij})} \quad (23d)$$

Esta fórmula também é escrita na forma

$$P_{ijkm} = \frac{1}{1 + \exp(\Delta U)}, \quad (23e)$$

onde

$$\Delta U = U_{ij} - U_{ijkm}. \quad (23f)$$

Portanto, para se obter a quantidade total de cargas transportadas via *hubs* ( $Q_{ij}$ ) entre um par  $ij$ , deve-se levar em conta que o número de remessas de  $i$  para  $j$  pelo trajeto via *hubs* ( $n_{ijkm}$ ) pode ser determinado por meio de um conceito de probabilidade descrito em ORTÚZAR e WILLUMSEN (1995): o número “esperado” de despachos por tal

---

<sup>3</sup> Coeficientes definidos por técnicas como a regressão (assunto que é tratado no item 4.3.3.3).

trajeto via *hubs* é igual à soma das probabilidades ( $P_{ijkm}$ ) de o usuário em cada despacho escolher a alternativa via *hubs* entre os vértices  $i$  e  $j$  (conforme fórmula a seguir).

$$n_{ijkm} = \sum_{\substack{\text{todas} \\ \text{remessas}(ij)}} P_{ijkm} \quad (23g)$$

Na otimização proposta os dados de todos os despachos de um par O-D são computados de forma “agregada” (e não discreta), de modo que o valor de  $P_{ijkm}$  é o mesmo para todas as remessas entre  $i$  e  $j$ . Portanto pode-se reescrever 16g da seguinte forma.

$$n_{ijkm} = P_{ijkm} \cdot (n^{\circ}.de.remessas.ij) \quad (23h)$$

No transporte de carga geral, a quantidade de cada remessa é bastante pequena (próxima da carga de um contêiner) em relação à quantidade total entre um par  $ij$  (neste trabalho, representada pela agregação de dados de todo um período,  $w_{ij}$ ), de modo que as quantidades das diversas remessas podem ser consideradas muito similares. Portanto pode-se admitir (analogamente como em 23h) que a quantidade ( $Q_{ij}$ ) de cargas despachadas via *hubs* nas  $n_{ijkm}$  remessas seja calculada de acordo com a fórmula a seguir.

$$Q_{ij} = P_{ijkm} \cdot w_{ij} \quad (23i)$$

Este conceito de quantidade representado por  $Q_{ij}$  é empregado em 5.5.4.

#### 4.3.3.3. Estimação da Função Utilidade no Problema em Questão

O modelo de localização proposto aplica-se também a redes de grande extensão, portanto julga-se necessário construir uma função utilidade para cada conjunto de usuários de características similares, como, por exemplo, um conjunto de todos os usuários que despacham cargas a partir da área de influência do porto  $i$ .

Considera-se a hipótese de que o padrão de escolha do tipo de transporte (direto ou via *hubs*) esteja vinculado à origem do trajeto. Adota-se esta hipótese porque, na maioria das relações comerciais que envolvem transportes de cargas, o sistema logístico que prevalece é aquele em que o fornecedor se responsabiliza por entregar a carga na

“porta” do cliente (no ponto de consumo), sendo menos usuais os sistemas do tipo *milk run*, onde o cliente é que faz coletas nas origens das cargas. JONG (2000), inclusive, afirma que “entrevistas no mercado de transporte indicam que, para a escolha modal, a empresa embarcadora é o mais importante agente da decisão”.

Sendo assim, assume-se que, estudando o padrão de escolha de tipo de transporte em uma região de origem  $i$  qualquer, pode-se criar uma respectiva função utilidade que quantificará as duas alternativas (transporte direto ou via *hubs*) num fluxo de  $i$  para qualquer destino  $j$ .

Os processos conhecidos para estimação dos coeficientes desta função utilidade podem se basear em dados médios de conjuntos de usuários (demanda agregada) ou nos dados individuais de cada usuário pesquisado (demanda desagregada). Segundo ORTÚZAR e WILLUMSEN (1995), o último caso é considerado mais realista, eficiente, detalhista (nos fatores que compõem a função  $U$ ) e estável em projeções de cenários futuros, além de permitir melhores análises de sensibilidade e de exigir uma menor quantidade de dados de campo. Entretanto o modelo com demanda desagregada não pode ser calibrado por métodos de ajuste de curva (e. g., regressão múltipla) pois a variável dependente ( $P_{ijkm}$ , v. eq. 24b) não é um dado observado como o é no caso de demanda agregada, que apresenta um valor de  $P_{ijkm}$  para cada conjunto de usuários (simplesmente calculado pela proporção das escolhas feitas entre as alternativas disponíveis). Contudo, pelo fato de esta agregação considerar apenas valores médios dos conjuntos, podem ser mascaradas certas diferenças comportamentais importantes dentro de cada conjunto, o que influenciaria o resultado final.

A fim de ilustrar este assunto, descreve-se sinteticamente a seguir o processo de estimação baseado no modelo de dados agregados.

O primeiro passo para a construção da função utilidade de uma região  $i$  é identificar os fatores que influenciam significativamente a decisão no momento da escolha do tipo de transporte, isto é, definir quais são as variáveis  $x_1, x_2, \dots, x_n$  (custo, tempo, etc) – componentes de 16a.

Então se procura criar uma relação linear<sup>4</sup> entre a probabilidade de escolha do tipo de transporte via *hubs* ( $P_{ijkm}$ ) e a diferença entre as funções utilidades dos dois tipos de transporte (direto e via *hubs*) naquele fluxo. Para lograr tal objetivo, aplicam-se sobre a equação 23e algumas operações algébricas simples e, em seguida, o logaritmo natural,

---

<sup>4</sup> Tal relação poderia ser do tipo produto, mas optou-se pela linear devido a sua simplicidade.

chegando-se à seguinte forma:

$$\ln\left(\frac{1}{P_{ijkm}} - 1\right) = \Delta U, \quad (24a)$$

ou seja,

$$\ln\left(\frac{1}{P_{ijkm}} - 1\right) = a_0^* + a_1(x_1 - x_1') + a_2(x_2 - x_2') + \dots + a_n(x_n - x_n'). \quad (24b)$$

O terceiro passo é realizar uma pesquisa de campo, onde se levanta, para cada par origem-destino, a probabilidade  $P_{ijkm}$  e o conjunto de variáveis  $x_1, x_2, \dots, x_n$  e  $x_1', x_2', \dots, x_n'$  das funções utilidades dos trajetos direto e via *hubs*. Então, podem-se ajustar os coeficientes  $a_1, a_2, \dots, a_n$  e a constante  $a_0^*$  referentes a cada origem  $i$ , utilizando-se o método da regressão múltipla.

Os dados de probabilidade são obtidos a partir do levantamento dos fluxos (já existentes) de  $i$  para todos os demais vértices. De posse destes dados, em cada par  $ij$ , separa-se a quantidade que segue por trajeto via *hub* (obviamente se existir alternativa via *hubs*) e a que segue por trajeto direto. Deste modo, pode-se admitir que a razão entre a quantidade de cargas transportadas via *hubs* e a quantidade de cargas total no fluxo  $ij$  seja equivalente à probabilidade de escolha de transporte via *hubs* para o par origem-destino  $ij$ . Trata-se de um processo de levantamento de dados de preferência revelada. No entanto é possível realizar um processo similar para o caso de preferência declarada.

Assim, tem-se um conjunto de dados de probabilidades relacionadas às várias regiões de origem das cargas, que poderá ser utilizado no cálculo dos coeficientes das funções utilidade do tipo 23a específicas para cada região  $i$  (o que pode ser feito por regressão). Não se propõe a equação 23b neste ponto, porque se considera a utilização de “dados agregados”, que constituem uma amostra suficientemente grande, tal que seu valor médio seja muito próximo (se não igual) ao da média da população e, portanto, não será necessário levar em conta o termo  $\varepsilon_i$  de 16b, que, conforme já explicado, tem média igual a zero.

Na fórmula 16k, observa-se que os coeficientes  $(a_1, a_2, \dots, a_n)$  são considerados os mesmos nas duas funções utilidades  $U_{ij}$  e  $U_{ijkm}$  (cuja diferença se representa no membro direito da equação). Entretanto as constantes  $a_0$  de cada função utilidade são consideradas particulares de cada tipo de transporte, por isso, em 24b (conforme recomenda ORTÚZAR e WILLUMSEN, 1995), representa-se a diferença entre tais

constantes pela parcela  $a_0^*$ .

Vale ressaltar que não há problema em não se definir o valor exato das constantes  $a_0$  das funções utilidades de cada tipo de transporte (direto e via *hubs*), pois, quando os dados gerados na regressão forem usados para o cálculo de probabilidades, não serão necessários os valores de cada constante, mas sim o valor da diferença entre elas, haja vista a fórmula 23e.

Ao se tentar levantar os dados necessários para a regressão (definidos anteriormente no terceiro passo) é bastante provável que, para determinadas origens  $i$ , não haja dados (na rede já implantada) suficientes para uma regressão cujo coeficiente de correlação seja satisfatório. Portanto será necessário admitir algumas considerações para resolver o problema, como, por exemplo, adotar uma função utilidade de um vértice próximo (ou similar), ou utilizar dados de fluxos em que as origens sejam outros vértices mas que o destino seja sempre a região  $i$  (para a qual se deseja criar a função utilidade).

#### **4.4. ETAPAS METODOLÓGICAS**

A metodologia proposta é constituída de um novo modelo de programação matemática para o Problema de Localização de *Hubs* e também de um conjunto relativamente simples de passos lógicos que orientam a aplicação prática deste modelo.

Portanto é importante destacar que a relevância da contribuição científica proposta não se encontra somente no estudo da realização e do encadeamento das etapas metodológicas, mas principalmente no conteúdo de seu modelo fundamental.

A metodologia divide-se em cinco grandes etapas:

- a. modelagem da estrutura física da rede de transporte;
- b. modelagem da demanda e fluxos na rede;
- c. implementação computacional do problema;
- d. análise poliédrica específica da instância considerada;
- e. execução do algoritmo de otimização e interpretação dos resultados.

##### **4.4.1. Modelagem da Estrutura Física da Rede**

Esta modelagem é elaborada por meio da obtenção, processamento e consolidação dos seguintes conjuntos de informações sobre a rede de transportes (em parte citados no início do item 4.3.2):



- a. o conjunto de todos os vértices componentes ( $N$ );
- b. o conjunto de todos os arcos que representam matematicamente as vias de transporte no grafo associado ( $A$ );
- c. o conjunto dos vértices que já funcionam previamente como *hubs* ( $H^*$ );
- d. o conjunto dos vértices candidatos a novos *hubs* ( $H$ );
- e. para cada arco,
  - o custo unitário de transporte para percorrê-lo ( $c_{ik}$ ),
  - o tempo de transporte,
  - o fator de desconto devido a economias de escala,
  - ou os dados necessários para o cálculo destes três atributos;
- f. para cada vértice de  $H$ , o custo de instalação de um novo *hub* ( $C_h$ ).

#### 4.4.2. Modelagem da Demanda e Fluxos na Rede

O objetivo desta etapa é reunir, para cada par  $ij$ , as seguintes informações (também citadas em 4.3.2):

- a. a demanda de transporte entre origem e destino ( $w_{ij}$ );
- b. a fração  $b_{ijpq}$  dos fluxos que passam por cada par de *hubs* pré-existentes  $pq$ ;
- c. as estimativas de probabilidades  $P_{ijkm}$  de um usuário optar pelo caminho via *hubs*  $km$  e não pelo caminho direto.

O processo de modelagem dos dois últimos parâmetros é abordado no item 4.3.3.

O item 5.4 (estudo de caso) descreve dois processos de obtenção dos elementos de uma matriz de demanda (como os  $w_{ij}$  do item “a” acima).

Conforme explicado no início de 4.3.2, o parâmetro  $b_{ijpq}$  pode ser dispensado quando a análise é realizada em uma rede totalmente não-capacitada, já que neste caso tal parâmetro é igual à probabilidade  $P_{ijpq}$ .

Quando ocorrer o caso de haver mais de um caminho via *hubs* intermediando os fluxos de um mesmo par  $ij$ , é necessário modelar  $b_{ijpq}$  para todos os caminhos deste par onde o fluxo seja não-nulo. E também verificar se o modelo se adequa à análise pretendida, levando-se em conta a discussão apresentada no item 4.3.2.3.

A determinação dos parâmetros  $b_{ijpq}$  e  $P_{ijkm}$  é realizada por meio de pesquisas de campo de preferências reveladas ou declaradas. Sendo que, para os valores de  $P_{ijkm}$  dos caminhos via novos *hubs* (candidatos a serem instalados), somente é possível o segundo tipo de levantamento.

#### **4.4.3. Implementação Computacional do Problema**

Conforme apresentado no item 3.6, na literatura científica há muitos trabalhos apresentando algoritmos específicos para implementação e solução de problemas de localização de *hubs*, dos quais alguns poderiam ser adaptados para o modelo em questão.

Para uma instância do problema com um número não muito grande de variáveis (como a do estudo de caso do Capítulo 5), podem ser utilizados até mesmo os *softwares* de otimização comerciais como o Xpress-MP (item 5.7.1) ou o Cplex. Porém, para instâncias mais complexas, o tempo de execução pode tornar-se muito grande (já que se trata de um problema NP-Completo, v. 1.2) e, portanto, ser necessária a adaptação de um dos referidos métodos da literatura científica ou mesmo o desenvolvimento de um algoritmo específico (de solução exata ou baseado em meta-heurísticas conhecidas).

#### **4.4.4. Análise Poliédrica Específica da Instância Considerada**

Caso a instância do problema considerada seja de difícil solução, pode-se empregar uma análise poliédrica específica para tal instância como mais um recurso para melhorar o desempenho do algoritmo de solução.

A análise poliédrica consiste da investigação detalhada do problema com o objetivo de propor mais restrições à formulação, de forma a reduzir o espaço de solução das variáveis do problema e facilitar a busca da solução ótima ou tão próxima da ótima quanto se admita (neste último caso, empregando-se um método heurístico).

Esta análise específica não se refere às restrições que podem ser aplicadas a qualquer instância do problema (como as 13b-13o), mas àquelas particulares elaboradas para determinados tipos de instâncias como os exemplos apresentados no item 4.3.2 logo após a descrição das restrições 13b-13o.

#### **4.4.5. Execução do Algoritmo e Interpretação de Resultados**

Caso se disponha de todos os dados de entrada, uma única execução do algoritmo é suficiente para determinar a solução ótima do problema. Contudo são comuns os casos em que não se dispõe de todos os dados (como a falta dos custos de instalação dos novos *hubs* ocorrida no estudo de caso em 5.7.1) ou em que a análise exija a avaliação

de um conjunto de soluções oriundas de alguns cenários variados (como por exemplo, três matrizes de demanda distintas).

No referido caso do Capítulo 5, a maneira encontrada de compensar a falta dos dados de custo de instalação foi realizando uma série de execuções do algoritmo, cujos resultados permitiram definir faixas de custos de instalação em que determinadas combinações dos *hubs* candidatos se tornavam viáveis (item 5.7.2). O que se pretende com este exemplo é ilustrar a importância da interpretação dos resultados nas aplicações práticas (que nem sempre apresentam as condições ideais para o emprego do modelo) e destacar a alternativa de iterativamente propor cenários, analisar as respostas (solução) e propor outros cenários a partir destas respostas (soluções).

Outro detalhe importante da interpretação da solução do problema se deve ao fato de que, no modelo proposto, se enfatiza a existência de *hubs* previamente instalados. Portanto é necessário ter o cuidado de impedir que a instalação de novos *hubs* atraia tanto fluxo de outro *hub* anteriormente instalado a ponto de este se tornar inviável devido à pouca demanda. Por isso, no item 4.3.2 (imediatamente antes do item 4.3.2.1), foram propostas algumas maneiras de evitar este inconveniente. Outra forma de resolver esta questão é incluir uma restrição para cada *hub*  $k$  existente na qual o somatório dos fluxos através deste *hub*  $k$  seja obrigatoriamente maior que uma demanda mínima necessária para mantê-lo viável. Por exemplo:

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_{ij} \cdot \left( \sum_{m \in H \cup H^*} P_{ijkn} \cdot x_{ijkn} + \sum_{m \in H \cup H^*, m \neq k} P_{ijmk} \cdot x_{ijmk} \right) \geq Demanda_{mínima}^k, \forall k \in H^* \quad (25)$$

#### 4.4.6. Fluxograma da Metodologia

O fluxograma da Figura 4.2 resume os passos da metodologia de localização de *hubs* proposta. No esquema gráfico há três elementos de decisão, aos quais se referem as três interrogações a seguir.

- D1 – Há algum par  $ij$  utilizando mais de um caminho via *hubs* pré-existentes?
- D2 – O algoritmo leva muito tempo para encontrar a solução?
- D3 – Os resultados estão satisfatórios?

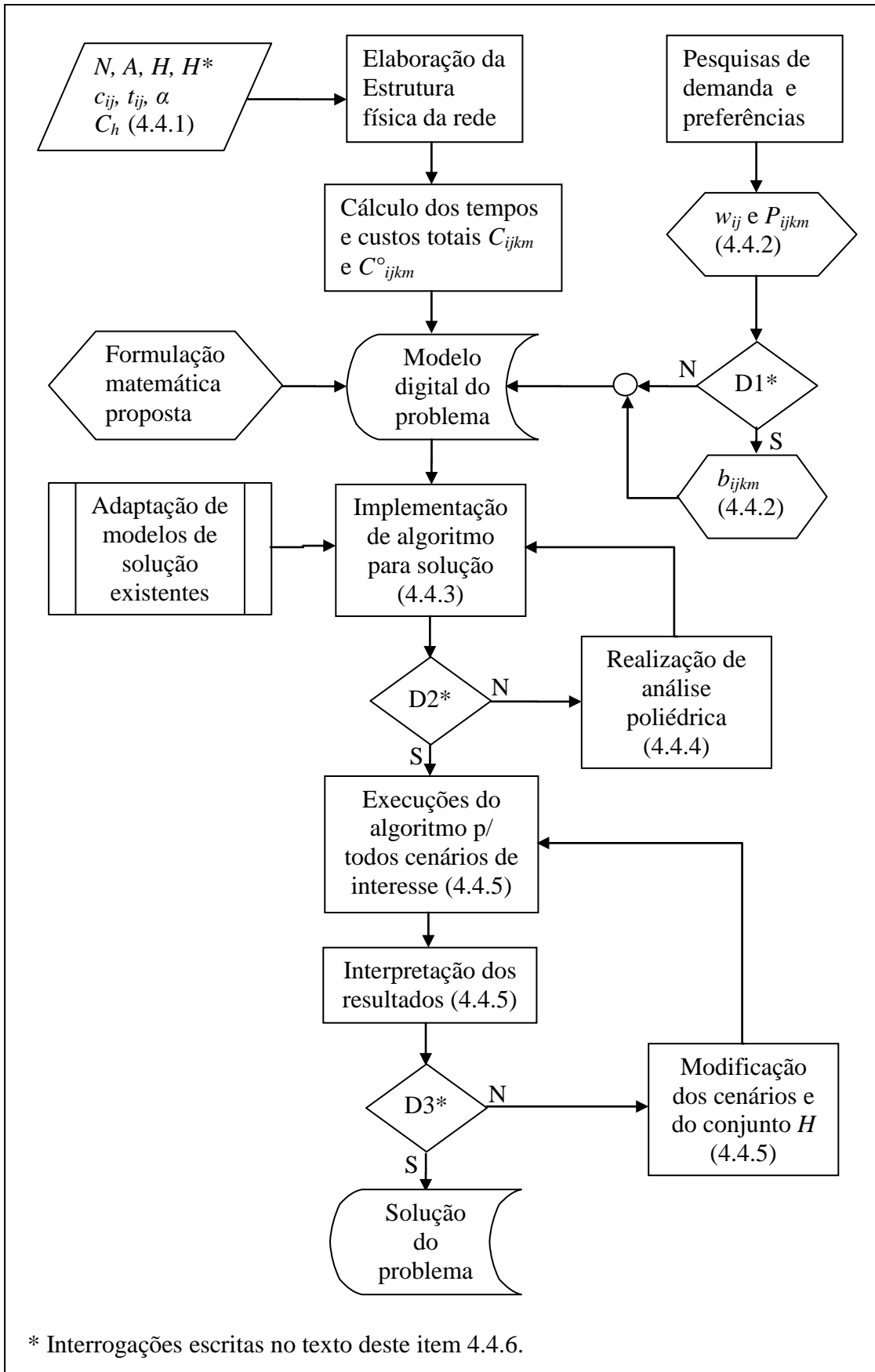


FIG. 4.2 – Fluxograma da metodologia proposta

## 5. ESTUDO DE CASO

### 5.1. DEFINIÇÃO DA REDE OBJETO DO ESTUDO

Com intuito de realizar um experimento da presente tese (metodologia proposta e novo modelo de localização), este autor pesquisou informações sobre diversas redes intermodais de transporte de carga operadas sob gerenciamento descentralizado, verificando em cada uma a disponibilidade de dados acessíveis suficientes para o estudo. Estão descritas ao longo desta seção as razões que levaram à determinação da rede escolhida como objeto do estudo.

É importante observar que este tipo de rede *hub-and-spoke* sob gerenciamento descentralizado é muito comum. Qualquer eixo tronco de transportes (como uma hidrovia, uma malha ferroviária, etc) ligado efetivamente a uma rede de rodovias pode vir a constituir infra-estrutura para um sistema do referido tipo – onde os terminais intermodais desempenham o papel dos terminais concentradores. Porém nem todo sistema de transporte de cargas que utiliza uma rede *hub-and-spoke* requer um modelo de solução de PLH (Problema de Localização de *Hubs*) para definir a localização de novos terminais concentradores. Há cargas para as quais já basta um modelo de solução do clássico problema de Fluxo de Custo Mínimo (v. MILLER e SHAW, 2001), como no caso do transporte de *commodities* de exportação do Brasil até os portos (e. g., a soja por via férrea), onde não existe demanda “definida para cada par origem-destino”, mas sim apenas a oferta de cada nó produtor da rede e a demanda de cada nó consumidor. Assim, além de se determinar uma rede *hub-and-spoke* para o estudo, também foi necessária a definição do tipo de carga.

Apesar da grande quantidade e diversidade de redes desta natureza em todo o Mundo, a disponibilidade de dados consolidados sobre as mesmas é muito restrita. Em primeiro lugar, porque o eixo tronco (ou malha principal) da rede é normalmente dominado por uma ou mais grandes empresas, que normalmente não têm interesse em divulgar dados detalhados (baseados nos pares origem-destino) de demanda, custo, duração do serviço, sinistros e etc (conforme explica JONG, 2000). Em segundo lugar, porque os dados referentes ao transporte complementar (geralmente rodoviário no caso de gerenciamento descentralizado) necessariamente dependem de pesquisas de campo para modelagem de probabilidades, que demandam considerável tempo e bastante

recursos financeiros.

Por estas razões, não foi possível selecionar uma rede cuja totalidade de dados necessários estivesse disponível. Então, dentro das melhores opções, este autor elegeu a que apresentou menor dificuldade de que fosse completado o conjunto de dados imprescindíveis. Esta complementação foi conseguida por meio de alguns métodos de modelagem de transporte, capazes de estimar informações próximas da realidade a partir dos dados já existentes.



FIG. 5.1 – Rede *hub-and-spoke* selecionada para estudo

A **rede selecionada** foi o complexo formado pelas linhas de cabotagem de carga geral do Brasil e as redes rodoviárias federal e estaduais (Figura 5.1). Deste modo, os portos escalas das linhas marítimas (Rio Grande, São Francisco do Sul, Santos, Itaguaí, Vitória, Salvador, Maceió, Suape, Pecém e Manaus) ficaram estabelecidos como *hubs*, enquanto as rodovias constituem os *spokes*, que ligam os terminais concentradores (*hubs*) aos nós de origem e destino das cargas. O modelo digital desta rede foi fornecido

pelo CENTRAN (Centro de Excelência em Engenharia de Transportes) – o mesmo empregado no Plano Nacional de Logística e Transportes (CENTRAN, 2007).

Sendo assim, a posição dos nós da rede acompanha a proposta de análise do CENTRAN (2007, baseada num padrão normalmente utilizado pelo IBGE), onde o País é dividido em 601 micro-regiões homogêneas (Figura 5.2), cujos centroides representam os vértices desta rede. Entretanto apenas 289 destes centroides foram considerados como pontos de origem e destino de cargas pois, como o experimento contempla a competição entre a cabotagem e o modo rodoviário, bastou considerar os vértices que se encontram nas áreas de influência (*hinterlands*) dos portos considerados.



FIG. 5.2 – Divisão do Brasil em 601 micro-regiões homogêneas (CENTRAN, 2007)

Para definição dos limites máximos de cada uma destas áreas de influência, adotou-se um parâmetro muito conhecido na prática da cabotagem no Brasil: segundo CNT (2006), “a cabotagem é viável, no cenário atual, até cargas distantes 250 a 300 km do porto; coletar cargas em distâncias superiores a estas limita a competitividade, pois o

custo da ponta rodoviária acaba inviabilizando o custo total.” De acordo com ABDL (2004), “também há consenso que a cabotagem só é válida para distâncias marítimas superiores a 1.500 quilômetros e, em terra, de até 400 quilômetros entre o porto e o cliente.” Assim, para fins deste estudo de caso, definiu-se uma distância máxima de 400 km ao longo dos arcos da rede para delimitação de cada área de influência portuária. Não se corre o risco de exagerar na abrangência da área de influência, já que o próprio modelo privilegia os caminhos mais econômicos, penalizando os inviáveis.

Quanto à distância mínima entre pontos de origem e de destino dos fluxos na rede, não se considerará neste estudo os fluxos entre pares OD cuja distância seja inferior a 1.000 km, já que tanto a citação anterior quanto os profissionais da área consultados afirmam que muito raramente se utiliza a cabotagem para serviços de transportes de carga geral cujas distâncias rodoviárias sejam menores que este último limite citado.

Na grande maioria destes transportes de cargas (a grandes distâncias) entre localidades das áreas de influência dos portos marítimos brasileiros, normalmente, só existem dois modos concorrentes: o rodoviário e a cabotagem. No entanto há algumas exceções, como as hidrovias do Amazonas e do Madeira, a ferrovia FCA de São Paulo para Camaçari (BA), a ferrovia ALL desde SP ao Rio Grande do Sul e o transporte aéreo. Este último já se exclui imediatamente por ser um caso muito específico de cargas urgentes e/ou de alto valor agregado, além de ter pouca quantidade.

As referidas hidrovias são consideradas neste estudo como parte complementar do modo rodoviário pois, na rede digital utilizada (CENTRAN), os arcos hidroviários foram modelados como arcos rodoviários fictícios (para fins de cálculos), cujos atributos de distância e velocidade foram arbitrados para gerarem resultados de tempo e custo equivalentes aos do modo hidroviário.

Já as ferrovias, simplesmente não são consideradas, tendo em vista que a carga geral transportada pelas mesmas “ao longo da costa e a grandes distâncias” não é significativa (v. item 2.5.2) a ponto de valer a pena incluí-las no estudo, já que aumentaria consideravelmente a complexidade do método específico utilizado para gerar a função de divisão modal. Isto facilita bastante o estudo porque já foi verificado que não há dados consolidados, “disponíveis” e suficientes para a análise do modo ferroviário; além disso é importante recordar que o objetivo desta tese não é a criação de uma metodologia de estimação de função de escolha modal e utiliza-se uma função de divisão modal como dado “de entrada”.



### 5.1.1. Carga Considerada

Como elemento movimentado, foi escolhida a **carga geral** comercializada no mercado interno nacional porque é uma classe que exclui os granéis líquidos e sólidos (*commodities*) e, portanto, tem a característica de apresentar fluxos cativos ou regulares com demanda bem definida entre cada par origem-destino no interior do País.

Para compreender esta regularidade dos fluxos de carga geral, veja-se um caso oposto: o escoamento de *commodities* brasileiras até os portos nacionais (para exportação). Neste tipo de transporte não há uma demanda bem definida entre os produtores e os portos nacionais, de modo que as cargas de uma origem não necessariamente têm que seguir sempre para um mesmo porto. Por exemplo, a cada safra, um produtor de soja pode variar o porto de destino de sua carga sem que isto modifique significativamente sua venda, isto é, dentro do território nacional não há uma demanda de transporte deste tipo de *commodities* com pares origem-destino fixos (o que, na Otimização Combinatória, caracteriza o clássico problema de Fluxo de Custo Mínimo, já modelado em FAJARDO, 2006).

Já um exemplo de fluxos fixos entre pares origem-destino pode ser o caso de um produtor de aço que atende demandas anuais regulares e bem definidas em diversos centros distribuidores do País. Se este produtor decidir enviar cargas a todos os centros consumidores exceto para um e em seguida tentar entregar esta única carga não enviada em algum dos demais centros “já abastecidos”, ele não terá sucesso.

Para se determinar, por Otimização Combinatória, a posição de novos terminais concentradores num sistema com demanda bem definida entre cada par origem-destino, é necessária a solução do PLH (Problema de Localização de *Hubs*), não sendo suficiente a análise do Problema de Fluxo de Custo Mínimo.

Pelas características comuns do conjunto da carga geral doméstica brasileira, considerou-se neste trabalho que sua demanda de transporte seja similar à do exemplo citado do produtor de aço, isto é, uma demanda regular e bem definida a médio prazo e não tão flutuante (sensível às mudanças na oferta de infra-estrutura de transporte) como é a demanda no escoamento de produção de *commodities* com destino aos portos.

Cabe ressaltar que a expressão carga geral pode parecer, de certa forma, um tanto quanto vaga. Assim, é importante determinar que tipos de cargas se enquadram nesta classificação.

Tendo em vista que este estudo de caso enfoca a competição entre o modo

rodoviário e a cabotagem, adotou-se a classificação de carga geral utilizada no Sistema Portuário Nacional, isto é, são praticamente todas as cargas manejadas nos portos que não sejam graneis líquidos e sólidos. E, a fim de evitar pesquisas de dados base demasiadamente complexas, admitir-se-á, neste estudo, que sejam todas as cargas com exceção dos graneis.

### 5.1.2. Caracterização da Rede Escolhida

O **gerenciamento** da referida rede é considerado **descentralizado** porque foi incluída no estudo toda a carga geral transportada entre os centroides das micro-regiões das áreas de influência dos referidos portos. Todos estes serviços de transporte são executados por uma grande quantidade de empresas atuando no referido mercado; tendo cada uma destas empresas o poder de realizar junto a seus clientes a escolha modal, isto é, decidindo descentralizadamente (de acordo com seus próprios critérios) se utilizarão via unimodal (neste caso, rodoviária) ou multimodalidade (rodovia, cabotagem e rodovia). Sendo assim, não há um critério único e pré-definido que determine o melhor caminho a ser utilizado. Na verdade, só o que se pode estimar é uma probabilidade de um operador escolher o caminho via *hubs*.

Podem-se definir as seguintes propriedades topológicas da rede *hub-and-spoke* em questão (de acordo com o exposto no item 3.4):

- alocação múltipla (dos terminais comuns aos *hubs*),
- política não-restritiva (permissão de transporte direto entre nós não-*hubs*) e
- conectividade parcial (não há linhas fixas entre todos os pares de *hubs*).

Quanto ao tipo de função objetivo, o modelo de localização incluirá os custos fixos de instalação dos novos terminais concentradores.

E quanto às restrições, considerar-se-á o sistema não-capacitado, uma vez que a frequência dos navios nos portos pode ser aumentada de acordo com o crescimento da demanda (incluindo-se novos navios) e, além disso, a quantidade de carga geral de cabotagem ainda é bastante reduzida para conseguir esgotar a capacidade dos terminais que já são escalas da cabotagem. E, por esta mesma razão, as rodovias podem ser consideradas também como um sistema não-capacitado.

## 5.2. PROPOSIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento do modelo de localização de *hubs* proposto consiste de uma análise da inclusão de novos portos no conjunto das escalas das linhas de cabotagem brasileiras de carga geral.

Este experimento simula uma situação em que o poder público federal possui recursos para investir em infra-estrutura para a cabotagem no País e necessita decidir a melhor localização para estes investimentos. Portanto a redução de custos de transporte neste caso se refere à economia que os usuários farão quando utilizarem os novos caminhos criados pela instalação de novos terminais concentradores – principalmente quando o novo caminho atender um par origem-destino que antes não tinha opção intermodal.

Um dos passos primordiais do experimento é definir os processos de obtenção dos dados de entrada do modelo discriminados na formulação de programação matemática do item 4.3.2 e abordados na descrição da metodologia (4.4).

$H^* \subseteq N$  (subconjunto dos vértices da rede já estabelecidos como *hubs*) foi constituído pelos portos brasileiros atualmente utilizados pelas linhas da cabotagem brasileira de carga geral (Rio Grande, São Francisco do Sul, Santos, Itaguaí, Salvador, Maceió, Suape, Pecém e Manaus) exetuando-se o Porto de Vitória (cuja exclusão é explicada oportunamente em 5.7).

$H \subseteq N$  (subconjunto dos vértices considerados passíveis de receberem a instalação de um novo terminal *hub*), conforme justificado em 5.7, reúne os portos de Anchieta, Belém e São Luís. Os respectivos custos de instalação de *hubs* nestas localidades ( $C_h$ ) também são discutidos em 5.7.

$c_{ik}$  (custo unitário de transporte num arco  $ik$  qualquer) é descrito em 5.5.1. A partir deste elemento se determinam  $C_{ij}$  e  $C_{ijkm}$ .

$C_{ij}$  e  $C_{ijkm}$  (respectivamente custos totais de transporte direto e via *hubs* entre nós  $i$  e  $j$ ) são determinados de acordo com o item 5.5.3.

$P_{ijkm}$  (probabilidade de se utilizar transporte via *hubs* entre  $i$  e  $j$ ) é calculada a partir das funções de divisão modal (conforme explicado em 5.5 e 5.6).

$W = | w_{ij} |$  (matriz origem-destino de demanda de fluxos  $w_{ij}$  entre nós  $i$  e  $j$ ) é determinada conforme o item 5.4.

Na seção a seguir, abordam-se os detalhes conceituais mais relevantes a cerca de alguns elementos fundamentais deste estudo de caso. Portanto o item 5.3.1 trata da

navegação de cabotagem (por ser um modo de transporte pouco conhecido) enquanto, em 5.3.2 e 5.3.3, encontram-se respectivamente os aspectos de custos de transporte e de economias de escala deste estudo de caso.

Finalmente, em 5.7, apresenta-se a aplicação do novo modelo propriamente dita.

### **5.3. INFORMAÇÕES IMPORTANTES PARA O EXPERIMENTO**

#### **5.3.1. A Cabotagem Brasileira de Carga Geral**

Segundo CNT (2006), após um longo período de retração e pouco desenvolvimento (desde a década de 40 até o início da de 90), a cabotagem de carga geral no Brasil voltou a ter significativos incentivos na era econômica do Real. Duas destas importantes motivações foram a aplicação prática da Lei de Modernização dos Portos (de 1993) e o fato de os índices de inflação significativamente estabilizados e taxas de juros em queda favorecerem o desenvolvimento de sistemas de transporte fundamentados nos conceitos de otimização criados pela Logística Empresarial do pós Guerra Fria.

Assim, as características do transporte de cabotagem tornaram-se mais interessantes na opção modal e, além disso, a melhoria da eficiência portuária no Brasil aliada a fatores desfavoráveis do modo rodoviário (precariedade de vias, pedágios, elevada idade média da frota e falta de segurança) propiciaram o crescimento do segmento aquaviário neste País.

No entanto ainda há bastante demanda reprimida (viável de passar a ser atendida pela cabotagem).

O crescimento da utilização deste modo de transporte, segundo CNT (2006), é proporcionado pelo desenvolvimento das respectivas empresas nos seguintes aspectos:

- compatibilidade de valores de fretes com o mercado,
- frequência,
- confiabilidade,
- tempo de trânsito das cargas
- nível de serviço oferecido ao usuário,
- qualidade e maior disponibilidade de informações durante o serviço,
- regularidade e continuidade e
- serviços adicionais (multimodalidade e operação com carga fracionada).

Do lado portuário, a redução da burocracia e o aumento da eficiência do terminal também são vistos como importantes para a maior difusão da cabotagem.

Em 2006, José Antônio Balau (diretor de operações, logística e cabotagem da Hamburg Süd - Aliança), em entrevista ao Cargo News Sistema de Informação, revelou um dado prático interessante: “o transporte por cabotagem no Brasil custa, em média, 15% menos que o rodoviário”.

De acordo com dados da Superintendência de Navegação da Agência Nacional de Transportes Aquaviários e do Sistema Mercante do Ministério dos Transportes (CNT, 2006), em 2005, vinte e quatro empresas atuaram na navegação de cabotagem, operando 131 embarcações próprias (petroleiros, graneleiros, cargueiros e porta-contêineres, entre outros), e foram realizados 1399 afretamentos de embarcações estrangeiras.

Hoje, as linhas regulares de cabotagem de carga geral no Brasil são operadas por três grandes empresas:

- Hamburg Süd (Aliança) com 10 navios,
- Log-In, subsidiária da Cia. Vale do Rio Doce (6 navios) e
- Maersk (Mercosul Line) com 2 navios.

A Tabela 5.1 apresenta os dados destas linhas que foram utilizados no cálculo dos tempos médios de transporte entre os pares de portos (descrito no item 5.5.2), possibilitando a caracterização específica dos arcos (do modelo digital da rede) referentes ao transporte aquaviário.

TAB. 5.1 – Dados sobre as linhas de cabotagem de carga geral

Empresa	Nr. Linha	Qtde. Navios	Tempo de Ciclo (dias)	Códigos dos portos escalas *	
				Tempo (d) até chegada em cada porto escala	
				Sentido Sul-Norte	Sentido Norte-Sul
Aliança	1	6	42	1-2-3-4-6-8-9-10 0-2-4-5-8-11-13-19	10-9-8-6-4-3-1 19-25-27-29-32-33-42
	2	2	28	3-4-6-8-10 0-3-7-9-17	10-3 17-28
	3	2	14	3-4-5-8 0-1-4-7	8-3 7-14
Log-In	1	2	30	3-8-9-10 0-7-11-17	10-3 17-30
	2	4	27	1-2-3-8-9 0-2-5-9-12	9-7-6-3-2-1 12-14-15-19-21-27
Merc.L.	1	2	33	2-3-8-10 0-2-10-16	10-9-8-3-2 16-25-27-31-33
<p>* Códigos dos portos que são escalas das 6 linhas regulares de cabotagem de carga geral:  1. Rio Grande - 2. S. Francisco do Sul - 3. Santos - 4. Itaguaí - 5. Vitória -  6. Salvador - 7. Maceió - 8. Suape - 9. Pecém - 10. Manaus</p>					

A FIG. 5.3 ilustra a trajetória cíclica da linha de número 1 da Log-In.



FIG. 5.3 – Linha de cabotagem n°. 1 da Log-In da TAB. 5.1 (LOG-IN, 2008)

### 5.3.2. Caracterização Conceitual dos Custos no Âmbito do Experimento

O custo é um conceito de caráter econômico que corresponde à medida monetária do sacrifício de um recurso que uma pessoa, empresa, ou governo tem que suportar para atingir um objetivo específico, ou seja, o custo é o valor associado à utilização ou consumo de um recurso.

Conforme definido na seção 5.2, o custo de transporte, neste experimento é avaliado do ponto de vista do usuário e não da empresa operadora do sistema, de forma que tal custo é o valor do frete que este usuário paga. Apenas para entendimento, informa-se que, caso o custo fosse avaliado do ponto de vista da empresa operadora, ele seria um pouco menos que o valor de frete, já que, neste referencial, seria preciso excluir o lucro do valor de frete para calcular o custo.

Os parâmetros denominados custos  $C_{ijkm}$  e  $C_{ij}$  poderiam ser chamados de valores de frete, entretanto, optou-se por manter a denominação custo, uma vez que se trata de um termo muito tradicional e amplamente utilizado em programação matemática (principalmente em problemas de localização).

O processo de cálculo dos custos unitários encontra-se detalhado no item 5.5.3.

### 5.3.3. Consideração das Economias de Escala

A consideração das economias de escala (cuja base teórica está tratada em 3.7) foi feita segundo o modelo do Fator de Desconto Constante, isto é, o custo unitário de transporte em um arco com grande quantidade fluxos é proporcionalmente inferior ao de arcos com quantidades menores de fluxos. Portanto é estabelecido um fator constante  $\alpha$  tal que  $0 \leq \alpha \leq 1$  (na fórmula do custo de transporte via *hubs*,  $C_{ijkm} = w_{ij} \cdot [\chi c_{ik} + \alpha c_{km} + \delta c_{mj}]$ , item 3.7) para reduzir o valor do custo unitário em arcos com grandes quantidades de transporte.

A representação explícita deste fator no corpo da formulação (como o  $\alpha$  na eq. 2a do item 3.5.1) é mais comum quando o modo de transporte é único (como no caso da localização de aeroportos centrais de passageiros, em que o transporte via *hubs* e o direto é sempre aeroviário). Pois, neste caso, pode-se estabelecer facilmente uma relação de proporcionalidade entre o custo unitário no arco tronco (componente de um transporte segmentado) e o custo unitário num arco de transporte direto.

No presente experimento, esta relação de proporcionalidade não é tão simples, uma vez que se tratam de modos de transporte bastante distintos: cabotagem (nos arcos de grandes fluxos – *interhubs*) e rodoviário nos arcos de transporte direto.

Contudo, no cenário específico deste experimento, uma simplificação propiciada pela natureza da rede considerada facilitou esta questão, pois se pôde incorporar (em definitivo) o fator  $\alpha$  ao custo unitário ( $c_{ik}$ ) dos arcos *interhubs*, porque estes arcos (de cabotagem), que funcionam como vias entre terminais concentradores, não funcionam como vias de caminho direto e, portanto, não há necessidade de apresentarem também um valor para o custo de transporte “sem” o desconto. Da mesma forma, os arcos que compõem os caminhos diretos e os caminhos entre *hubs* e vértices comuns (os rodoviários, sem fator de desconto) não são viáveis para funcionar com tráfego *interhubs*, portanto não existe necessidade de apresentarem um valor para o custo de transporte “com” o desconto. Esta simplificação é possível porque, considerando que a

quantidade enviada em um despacho de carga geral a grande distância costuma ser da ordem de um contêiner, não faz sentido pensar em veículo rodoviário que funcionasse com fluxo *interhubs* e transportasse uma quantidade superior à referida, a ponto de ainda gerar significativa economia de escala.

Assim, na determinação dos valores de fretes, o fato de os custos unitários de transporte nos arcos de cabotagem terem ficado mais baixos que nos arcos rodoviários caracterizou o fator de desconto definitivamente agregado ao custo aquaviário.

Outra simplificação deste trabalho (em relação à economia de escalas) é que não se considera fator de desconto nos arcos de distribuição e coleta, ou seja, na fórmula do custo de transporte via *hubs* (escrita no início desta seção 5.3.3),  $\chi$  e  $\delta$  são iguais a 1. Pois não foi viável realizar uma pesquisa de campo tão grande a ponto de conseguir este nível tão complexo de detalhamento dos valores de frete.

Pelo mesmo motivo anterior, também seria inviável aplicar no presente trabalho o modelo de economia de escalas mais completo (como em O'KELLY e BRYAN, 1998 e RACUNICA e WYNTER, 2005), cujo fator de desconto é definido não como uma constante, mas sim como uma função da quantidade de fluxos no arco (conforme descrito também em 3.7).

Tais simplificações certamente reduzem um pouco a complexidade do problema e podem até vir a causar alguma diminuição no tempo de solução do algoritmo, entretanto o problema não deixa de ser da classe NP-Completo (*Nondeterministic Polynomial Time - Complete*), portanto a busca de sua solução continua sendo um problema de otimização bastante complexo, o que “não” invalida este experimento como instrumento de avaliação e demonstração da aplicabilidade do modelo proposto.

A referida fórmula de  $C_{ijkm}$  foi mantida na descrição do modelo em sua forma completa porque, embora não se a utilize em tal formato neste estudo de caso, há a intenção de que, em outras aplicações, se tenha a possibilidade de considerar todos os fatores que se queira.

#### **5.4. ELABORAÇÃO DA MATRIZ OD DE CARGA GERAL DO BRASIL**

Inicialmente, procurou-se obter uma matriz OD do Brasil recente de carga geral, solicitando a instituições de planejamento de transportes do País, contudo esta tentativa foi infrutífera.

Os conjuntos de dados mais próximos da matriz em questão foram fornecidos pelo



CENTRAN:

- o modelo digital da rede multimodal das vias de transporte e dos centroides representantes das 601 micro-regiões em que o País foi dividido (“rede\_multimodal\_pnlt.dbd” de 13 Set 06), do qual foi extraída a rede da Figura 5.1;
- as matrizes OD (601 x 601 micro-regiões) do ano de 2005 dos 22 principais produtos transportados no País (modelados pelo CENTRAN: grãos sólidos e líquidos, carnes, veículos e outros), no arquivo de 09 Jul 08 “VW\_MATRI\_Original.DBF” e
- os fluxos de cargas totais projetados para 2007 (incluindo carga geral) nos diversos trechos das vias federais e estaduais de transporte do País (de 09 Mar 07, arquivo “LOGIT\_carregamento\_atualizado.dbf”).

Sendo assim, surgiu a ideia de se gerar uma matriz OD de carga geral a partir destes dados disponíveis. Nas tentativas realizadas, foram utilizados dois métodos recomendados por ORTÚZAR e WILLUMSEN (1995) – a Maximização da Entropia (formulação 25a-25c) e o Algoritmo Multi-Proporcional de Correções Sucessivas de Furness – tendo o primeiro fracassado mas o segundo logrou êxito.

Ambos os métodos utilizam dados agregados do sistema que tenham sido efetivamente observados no campo (neste estudo de caso, eles são as contagens de tráfego de carga em determinados pontos das vias nacionais de transporte). Também usam uma matriz OD de referência (chamada de matriz “semente”) e listas de pares OD que contribuem nas contagens de cada um dos postos de pesquisas de tráfego. Tais dados estão detalhados em 5.4.1, 5.4.2 e 5.4.3.

A essência do primeiro método consiste em maximizar a função não linear da entropia do sistema 25a, sujeita ao conjunto de restrições 25b (a seguir) – cada uma das quais referente a uma contagem de tráfego em um determinado trecho de uma via da rede nacional de transportes.

O segundo método se baseia em um processo iterativo de correção dos valores de  $w_{ij}$ , cujo fator de correção é redefinido a cada iteração para tentar satisfazer as restrições 25b (dentro de uma tolerância pré-determinada).

Mais detalhes serão tratados na seção 5.4.4.

$$Max_{w_{ij}} \left( - \sum_{i,j} w_{ij} \cdot \ln \frac{w_{ij}}{R_{ij}} - w_{ij} \right) \quad (25a)$$

s.a

$$\sum_{i,j} w_{ij} \cdot P_{aij} = V_a; \forall a = 1..n^\circ \text{ de Contagens} \quad (25b)$$

$$w_{ij} \geq 0; \forall i, j = 1..n^\circ \text{ de Centroides Da Rede} \quad (25c)$$

onde

$w_{ij}$  é a variável de fluxo de carga geral entre os centroides  $i$  e  $j$ ,

$R_{ij}$  é o fluxo entre os centroides  $i$  e  $j$  na matriz de referência,

$V_a$  é o fluxo medido na contagem de tráfego  $a$ ,

$P_{aij}$  informa se o fluxo entre o par  $i$  e  $j$ , contribui na contagem  $a$ , sendo 1 ou 0 caso contribua ou não.

#### 5.4.1. Contagens de Tráfego de Carga

Este item trata das restrições 25b do problema, que foram elaboradas com base nos dados de fluxos de tráfego de carga dos arcos da rede em que foram instalados postos de contagens.

O **primeiro passo** foi relacionar todos os pontos das rodovias nacionais em que o CENTRAN realizou pesquisas de tráfego de carga no ano base 2005. Para isso, foi aberto cada um dos 120 arquivos dos postos de contagens de tráfego, onde se analisou as descrições das localizações dos mesmos (colunas Rodov. e Trecho da Tabela 5.2), de modo que, em seguida, fosse possível identificar, no modelo digital da rede multimodal, o arco correspondente a tal localização (coluna Id. Arco).

TAB. 5.2 – Localização dos postos de contagem de tráfego do CENTRAN

Pst.	Rodov.	Trecho	Id.Arco
1	BR317	Entre a entrada da AC-040 e a Cidade Hortigrangeira	111339
2	BR364	(AC) Entre a Estrada do Aeroporto e o Riozinho do Andirá	111334
3	BR101	(AL) Entre a entrada da BR104(A) e a entrada da BR104(B)	110126
4	BR101	Entr. AL-225(A) - Entr. AL-225(B) p/Porto Real do Colég.	112190
5	BR316	Entr. AL-115(A) - Entr. AL-115(B) (Palmeira dos Índios)	110144
6	BR101	Entr. BR110(A) - Entr. BR110(B)/BA-504 (p/ Alagoinhas)	109170
7	BR101	Entr. BA-120(A) p/ Itajuípe - Entr. BR415 (Itabuna)	108223
8	BR116	Entr. BR324(A) - Entr. BR324(B)/BA-502 (Feira de Sant.)	108980
9	BR116	Entr. BA-959 p/José Gonçalves - Entr. BR407/BA-262(B)	107933

Pst.	Rodov.	Trecho	Id.Arco
10	BR242	Entr. BR116/BA-120(B) p/Paraguaçu - Entr. BA-046/488	108602
11	BR407	Entr. BA-130(A) - Entr. BA-220 (Senhor do Bonfim)	108869
12	BR020	Entr. CE-187 p/ Marrecos) - Entr. BR404/CE-176 p/Tauá	110482
13	BR116	Entr. CE-253 (Pacajús) - Entr. BR122(A) (Chorózinho)	110542
14	BR116	Entr. BR226(B)/CE-275(B) p/Pereiro - Entr. BR404 (Icó)	110450
15	BR101	Entr. ES-245(B) - Entr. ES-440	109969
16	BR101	Entr. ES-375(A) (P/Piúma) - Entr. ES-375(B) (Iconha)	109920
17	BR262	Entr. BR101(B) - Entr. ES-465 p/Domingos Martins	112566
18	BR259	(ES) Km 15,3 - Entr. BR484 p/Ponte sobre Rio Doce	109970
19	BR020	Entr. GO-116 p/ Formosa - Entr. GO-346	111045
20	BR050	Entr. BR457(B)/GO-219 - Entr. GO-020(A)	111112
21	BR060	Entr. GO-338 (Abadiânia) - Entr. BR153(A) p/Anápolis	111145
22	BR153	Entr. BR154 - Entr. BR452(B) (Div GO/MG) (Itumbiara)	111629
23	BR364	Entr. GO-180 - Entr. BR060(A)	111192
24	BR135	Estiva - Entr. BR402/MA-110 (Bacabeira)	110745
25	BR135	(MA) Entr. BR316(A) (Cachucha) - Entr. BR316(B)	110707
26	BR222	Entr. MA-274 (Rio Pindaré) - Entr. BR010(A) (Açailândia)	110675
27	BR226	Entr. MA-275 - Entr. BR010(A) (Porto Franco)	110649
28	BR316	Entr. MA-026 (Dezessete) - Entr. MA-034(A) (Caxias)	110723
29	BR040	Entr. MG-181 (João Pinheiro) - Entr. BR365	100980
30	BR040	Entr. MG-238 p/ Sete Lag. - Entr. MG-432 p/ Esmeraldas	104882
31	BR040	Entr. BR356(A) (P/Belo Horizonte) - Entr. BR356(B)	104998
32	BR040	Entr. BR499 (Santos Dum.) - Entr. União e In. (B. Triunfo)	104471
33	BR050	(MG) Entr. BR365(B)/452(B) - Rio Tijuco	103220
34	BR116	(MG) Entr. BR342(B) (Teófilo Otoni) - Acesso Itambac.	105155
35	BR116	Fim Pista Dupla - Entr. MG-329 (Dom Correa)	104942
36	BR116	Entr. BR120/267(A) (Leopold.) - Entr. BR267(B) p/ Tebas)	104494
37	BR135	Entr. BR259(B) (Curvelo) - Entr. BR040(A)	104519
38	BR153	Entr. BR364(A) p/ Com. Gomes) - Entr. BR364(B) p/ Frutal	103244
39	BR262	Entr. MG-187 (P/Ibiá) - Entr. BR146 (P/Araxá)	103976
40	BR265	(MG) Entr. BR354 (Lavras) - Acesso Ribeirão Vermelho	104421
41	BR354	(MG) Acesso Lagoa Formosa - Acesso Carmo do Paranaíba	111823
42	BR365	(MG) Entr. BR146(A)/352(A)/354 - Entr. BR352(B)	103226
43	BR365	(MG) Entr. BR153 - Entr. BR154(A)	103243
44	BR381	Entr. MG-425 (Cel Fabric.) - Entr. MG-320 p/ Jaguaráçu	104938
45	BR381	Entr. MG-040 (Pq Industrial) - Entr. BR262(B) (Betim)	104830
46	BR381	Entr. MG-458 (Careáçu) - Entr. BR459 (P/Pouso Alegre)	104215
47	BR163	Entr. MS-244 (Bonfim) - Entr. MS-441 (Bandeirantes)	111546
48	BR267	Div Sp/MS - Entr. MS-395 (Bataguassu)	100602
49	BR070	Entr. BR174(A)/MT-343 (Cáceres) - Entr. BR174(B)	111231
50	BR163	Entr. MT-483 (Anel Rodov. Rondonóp.) - Entr. MT-270(B)	111249
51	BR163	Entr. MT-246(B) - Acesso Rosário Oeste	111232

Pst.	Rodov.	Trecho	Id.Arco
52	BR010	Entr. BR222(B)/PA-332 (Dom Eliseu) - Entr. PA-125/263	110621
53	BR101	Entr. PB-018 (P/Conde) - Entr. PB-034	112154
54	BR230	Entr. PB-100 - Entr. BR104(A)/408(B) (Campina Grande)	110232
55	BR116	Entr. PE-460 - Entr. BR316/428 (P/Cabrobó)	110193
56	BR232	Entr. PE-103 (P/Bonito) - Entr. BR104/423(A) (Caruarú)	110156
57	BR232	Entr. PE-365 (Serra Talhada) - Entr. PE-414	110214
58	BR428	(PE) Entr. BR122(A) - Entr. BR122(B) (Petrolina)	110610
59	BR316	Entr. PI-242 - Entr. BR407(A)/Pi-238/245(A) (Picos)	110458
60	BR343	(PI) Entr. BR404(B)/407(B) - (Cap. Campos)	110415
61	BR343	Demerval Lobão - Entr. PI-223 (Monsenhor Gil)	110600
62	BR116	Div SP/PR (Pnt. R. Pardinho) - Iníc. Variante Alpino	106143
63	BR116	Entr. PR-427 (Campo do Tenente) - Div PR/SC (Rio Negro)	105729
64	BR277	Acesso Vila Guará - Acesso Guarapuava	105227
65	BR277	Acesso Oeste Cascavel - Entr. PR-182 p/ Cap. Leônidas M.	106340
66	BR369	Fim Pista Dupla - Entr. PR-431 (P/Jacarezinho)	106577
67	BR376	Entr. PR-281 p/ Tijucas do Sul - Div PR/SC (Entr. BR101)	105918
68	BR476	Entr. PR-510/511 (P/Contenda) - Entr. PR-428 (Lapa)	105675
69	BR040	Entr. BR393(B) (Moura Brasil) - Entr. BR492(A) p/ Areal	109834
70	BR101	Entr. RJ-208 (Ururá) - Entr. RJ-180 p/ Ponta da Lama	109875
71	BR116	Entr. RJ-161 (Resende) - Entr. RJ-163 p/ Penedo	109638
72	BR356	(RJ) Entr. BR484(A) (Itaperuna) - Entr. BR393/484(B)	111863
73	BR393	(RJ) Sapucaia - Entr. BR040(A)	109855
74	BR101	Fim Pista Dupla - Entr. RN-002 (São José do Mipibu)	112131
75	BR226	Entr. RN-120(B) (Serra Caiada) - Entr. RN-093 (Tangará)	110236
76	BR304	Entr. BR104(B) (Lajes) - Entr. RN-023 Caiçara do R. do V.	110234
77	BR405	Entr. RN-032 (P/Felipe Guerra) - Entr. RN-233 (Apodi)	112115
78	BR364	(RO) Entr. BR429(B) (Ji Paraná) - Entr. RO-470 (Ouro P.)	111367
79	BR116	Entr. RS-703 p/ Guaíba - Entr. RS-709 p/ Barra do Ribeiro	99689
80	BR158	Entr. BR472 (P/Palmitinho) - Entr. RS-585/587 (Seberi)	99733
81	BR158	Entr. RS-348 (Val De Serra) - Entr. RS-509 p/ Sta. Maria	98870
82	BR290	Entr. BR471 (P/Butiá) - p/ Minas do Leão	99587
83	BR290	Entr. RS-705 (Geribá) - Entr. BR153(B) p/ Bagé	99489
84	BR290	(RS) Entr. BR293(A) - Entr. BR472(A)	98644
85	BR293	Entr. BR473 (P/Bagé) - Entr. RS-630 (P/Dom Pedrito)	98837
86	BR471	(RS) Acesso Pelotas - Entr. BR392(B) (Quinta)	99413
87	BR472	(RS) Acesso Leste a Itaqui - Entr. BR290(A) (Uruguaiiana)	98646
88	BR101	Garuva - Entr. SC-301 (Pirabeiraba)	105923
89	BR101	Balneário de Camboriú - Entr. SC-412 p/ Porto Belo	105874
90	BR101	Entr. SC-433 (P/Pinheira) - Entr. SC-434 p/ Garopaba	105571
91	BR101	Entr. SC-449 (Araranguá) - Entr. BR285(B) p/ Ermo	47600
92	BR153	Entr. SC-463 p/ Jaborá - Entr. BR283 p/ Concórdia	105242
93	BR282	Entr. SC-425 (Índios) - Entr. BR475(B) (Lages)	105180

Pst.	Rodov.	Trecho	Id.Arco
94	BR282	Entr. SC-469(B) p/ Modelo - Entr. BR158(A) p/ CunhaPorã	106276
95	BR470	Entr. SC-425 (P/Otacílio Costa) - Entr. BR116	105181
96	BR235	Entr. SE-160 - Entr. SE-170(A)	110076
97	BR116	Entr. SP-123 - Entr. SP-103 (Caçapava)	104015
98	BR116	Entr. SP-228 - Entr. SP-057 (P/Siderúrgica)	101792
99	BR153	Entr. SP-308 (P/José Bonifácio) - Acesso Promissão	101184
100	BR381	Div MG/SP - Entr. SP-063 (P/Bragança Paulista)	103032
101	BR153	Entr. TO-342/446 (Miranorte) - Entr. TO-348 (Barrolândia)	110887
102	BR153	Entr. TO-420 (Figueirópolis) - Entr. TO-296(A) (Alvorada)	110976
103	BR153	Araguaína (TO)	110635
104	BR364	Jataí (GO)	111210
105	BR158	Paranaíba (MS)	100735
106	BR060	Bandeirantes (MS)	111739
107	BR153	Frutal (MG)	103476
108	BR050	Uberaba (MG)	103591
109	BR262	Três Lagoas (MS)	112486
110	BR267	Nova Alvorada do Sul (MS)	111545
111	BR163	Dourados (MS)	106322
112	BR369	Cambará (PR)	106580
113	BR050	Cubatão (SP)	101988
114	BR277	Ibema (PR)	106242
115	BR277	Balsa Nova (PR)	105764
116	BR277	Paranaguá (PR)	105990
117	BR101	Araquari (SC)	105825
118	BR153	General Carneiro (PR)	105220
119	BR116	Santa Cecília (SC)	105314
120	BR392	Rio Grande (RS)	99024

O **segundo passo** foi verificar a quantidade de tráfego de carga anual em cada um destes arcos, que fora calculada pelo CENTRAN a partir das quantidades medidas no campo. A quantidade “total de ambos os sentidos” de cada arco (pesquisado) foi projetada pelo CENTRAN para alguns anos (2007, 2011, 2015 e 2023). Na presente pesquisa, foram utilizados os dados projetados para 2007 (2ª coluna da Tabela 5.3). Então, para fins deste estudo de caso, considerou-se esta quantidade projetada como se fosse a medição de campo de 2007, já que, nos modelos de projeção (2005 para 2007) utilizados pelo CENTRAN, os resultados dos cálculos para os arcos específicos em que foram instalados postos de pesquisas certamente se aproximam muito da realidade, uma vez que são os dados cujas variações dos cálculos estão mais “amarradas” às medições reais de campo.

Tendo-se a quantidade total de tráfego em cada um dos 120 arcos (nos quais foram feitas pesquisas de campo), fez-se necessário obter as frações do total de cada arco que fluem em cada um dos dois sentidos do arco (3ª e 4ª colunas da Tabela 5.3). Estas proporções foram medidas no gráfico publicado em CENTRAN (2007): “Carregamentos Multimodais 2007 com carga geral e sem minérios” (em sua pág. 48). Com isso, chegou-se a 240 fluxos totais de tráfego em rodovias (5ª e 6ª colunas da Tabela 5.3).

É importante ressaltar que estas contagens feitas somente em rodovias são suficientes para a produção da matriz OD de carga geral porque o CENTRAN, em seus planejamentos, considerou que o fluxo de carga geral do País passa somente por rodovias, pois havia verificado que tais fluxos (de “carga geral”) nos outros modos não eram tão relevantes (a ponto de valer a pena considerá-los em seus planejamentos específicos) em termos de “tonelagem” de carga geral.

Também não constitui problema o fato de o gráfico utilizado (“Carregamentos Multimodais 2007 com carga geral e sem minérios”, CENTRAN, 2007) não incluir minérios, já que nas projeções elaboradas pelo CENTRAN os fluxos destas *commodities* estão praticamente todos alocados apenas em hidrovias, ferrovias, linhas de cabotagem e dutovias, de modo que a contribuição destes, nos fluxos rodoviários, não é relevante.

O **terceiro passo** foi obter as quantidades de fluxos devidos somente à carga geral. É importante observar que os 240 fluxos rodoviários referidos nos parágrafos anteriores incluem quase todo tipo de carga (excetuando-se apenas os minérios). Sendo assim, foi necessário definir que tipos de carga não se enquadrariam na classificação de “carga geral”.

Haja vista que este estudo de caso enfoca a competição entre o modo rodoviário e a cabotagem, adotou-se a classificação de carga geral utilizada no Sistema Portuário Nacional, isto é, são praticamente todas as cargas manejadas nos portos que não sejam graneis líquidos e sólidos.

Deste modo, foi necessário diminuir dos já referidos 240 fluxos totais (nos arcos onde foram instalados postos de contagens) as quantidades correspondentes a graneis. Contudo não foi possível obter os dados de fluxos de graneis na rede multimodal nacional para o ano de 2007. O melhor e mais próximo que se conseguiu neste sentido foram os dados do CENTRAN referentes aos fluxos na rede em 2007 devido ao transporte no País dos 22 principais produtos, que, além dos graneis mais relevantes,

também incluem carnes, cimento, madeira, papel e siderúrgicos. Assim, excluindo-se, dos referidos 240 fluxos totais, os fluxos devidos aos 22 principais produtos, o resultado é a carga geral desfalcada de alguns de seus produtos componentes: carnes, madeira, papel, siderúrgicos e cimento embalado. Por outro lado, há granéis transportados no País que não estão relacionados entre os 22 principais produtos, o que contrabalança um pouco o referido desfalque.

Em resumo, considerou-se as seguintes condições:

- que não foi possível obter dados melhores,
- que há granéis não relacionados entre os 22 principais produtos e
- que carnes, madeira, papel, siderúrgicos e cimento são apenas uma parte pequena do grande universo da carga geral.

Sendo assim, admitiu-se, para fins deste estudo de caso, que a referida subtração dos fluxos referentes aos 22 principais produtos resulta em um valor razoável para ser utilizado como fluxo da carga geral na rede de transporte nacional.

Portanto os fluxos dos 22 principais produtos (em cada um dos dois sentidos dos 120 postos de contagens) foram medidos no gráfico publicado em CENTRAN (2007): “Carregamentos Multimodais 2007 com minérios sem carga geral” (em sua pág. 47). Assim, obteve-se 240 dados de fluxos considerados de carga “não-geral” (7ª e 8ª colunas da Tabela 5.3).

Então, subtraindo-se, dos fluxos de carga total, estes fluxos de carga não-geral, chegou-se a 240 medições de fluxos de carga geral na rede rodoviária brasileira (9ª e 10ª colunas da Tabela 5.3). As quais foram utilizadas como os valores  $V_a$  (onde  $a$  varia de 1 a 240) na formulação 25a-25c.

Todo este processo foi calculado e detalhadamente documentado numa planilha eletrônica (arquivo ContagensTráfego\_PesquisaCENTRAN.xls de 29 Jul 08).

TAB. 5.3 – Fluxos anuais de cargas nos arcos bases dos postos de contagem

Posto	Total no arco (10 <sup>3</sup> .t)	Fração em cada sentido do arco		Quantidade de Tráfego Anual de Carga (10 <sup>3</sup> .t)					
				Carga Total		Granéis		Carga Geral	
		A	B	A	B	A	B	A	B
1	575	0,500	0,500	288	288	0	0	288	288
2	608	0,500	0,500	304	304	0	0	304	304
3	27643	0,581	0,419	16061	11582	3571	0	12489	11582
4	28680	0,573	0,427	16434	12246	2143	0	14291	12246
5	321	0,500	0,500	160	160	0	0	160	160

Posto	Total no arco (10 <sup>3</sup> .t)	Fração em cada sentido do arco		Quantidade de Tráfego Anual de Carga (10 <sup>3</sup> .t)					
				Carga Total		Granéis		Carga Geral	
		A	B	A	B	A	B	A	B
6	31130	0,528	0,472	16437	14693	2286	2714	14151	11979
7	12555	0,382	0,618	4796	7759	0	2000	4796	5759
8	41328	0,500	0,500	20664	20664	0	1429	20664	19235
9	35478	0,466	0,534	16533	18945	2442	855	14091	18091
10	8323	0,441	0,559	3671	4653	1232	1478	2439	3175
11	8011	0,442	0,558	3541	4470	1091	0	2450	4470
12	6146	0,755	0,245	4640	1506	0	0	4640	1506
13	11435	0,500	0,500	5718	5718	0	0	5718	5718
14	9348	0,524	0,476	4898	4450	0	0	4898	4450
15	18155	0,326	0,674	5919	12236	0	5952	5919	6284
16	29165	0,500	0,500	14582	14582	4286	0	10297	14582
17	10224	0,607	0,393	6206	4018	1786	0	4420	4018
18	9067	0,450	0,550	4080	4987	0	1356	4080	3631
19	20282	0,604	0,396	12250	8031	2714	1000	9536	7031
20	14094	0,586	0,414	8259	5835	714	0	7545	5835
21	13684	0,600	0,400	8210	5474	1071	1429	7139	4045
22	20733	0,609	0,391	12626	8107	1429	0	11198	8107
23	11540	0,333	0,667	3843	7697	2143	0	1700	7697
24	13748	0,500	0,500	6874	6874	1429	0	5445	6874
25	17570	0,500	0,500	8785	8785	1786	0	6999	8785
26	9117	0,500	0,500	4559	4559	0	0	4559	4559
27	3869	0,500	0,500	1934	1934	422	246	1512	1688
28	16330	0,500	0,500	8165	8165	1058	0	7107	8165
29	2319	0,500	0,500	1159	1159	500	714	659	445
30	34421	0,500	0,500	17210	17210	1214	929	15996	16282
31	37098	0,500	0,500	18549	18549	0	0	18549	18549
32	20643	0,441	0,559	9104	11539	0	1119	9104	10421
33	20607	0,475	0,525	9788	10819	714	1786	9074	9033
34	37119	0,453	0,547	16815	20304	1786	714	15029	19590
35	6019	0,325	0,675	1956	4063	0	612	1956	3451
36	7719	0,423	0,577	3265	4454	0	0	3265	4454
37	32615	0,485	0,515	15818	16797	0	714	15818	16082
38	19833	0,422	0,578	8369	11463	0	714	8369	10749
39	17634	0,400	0,600	7053	10580	0	1000	7053	9580
40	2421	0,333	0,667	806	1615	0	0	806	1615
41	1491	0,667	0,333	994	496	0	0	994	496
42	11566	0,389	0,611	4499	7067	0	0	4499	7067
43	4879	0,500	0,500	2439	2439	1071	0	1368	2439
44	40550	0,500	0,500	20275	20275	2857	714	17418	19561
45	78095	0,500	0,500	39047	39047	2643	1143	36405	37905



Posto	Total no arco (10 <sup>3</sup> .t)	Fração em cada sentido do arco		Quantidade de Tráfego Anual de Carga (10 <sup>3</sup> .t)					
				Carga Total		Granéis		Carga Geral	
		A	B	A	B	A	B	A	B
46	60076	0,500	0,500	30038	30038	2500	2500	27538	27538
47	31473	0,500	0,500	15736	15736	2143	2143	13593	13593
48	7919	0,609	0,391	4823	3096	0	0	4823	3096
49	16284	0,577	0,423	9396	6888	3214	1071	6181	5817
50	44854	0,500	0,500	22427	22427	8571	5357	13856	17070
51	21497	0,500	0,500	10749	10749	1964	1964	8784	8784
52	17166	0,542	0,458	9304	7862	1929	0	7376	7862
53	16951	0,558	0,442	9459	7492	714	714	8744	6778
54	4737	0,348	0,652	1649	3089	0	0	1649	3089
55	19176	0,469	0,531	8994	10182	1429	0	7565	10182
56	12004	0,500	0,500	6002	6002	0	0	6002	6002
57	12044	0,500	0,500	6022	6022	0	0	6022	6022
58	6707	0,430	0,570	2884	3823	0	0	2884	3823
59	18678	0,500	0,500	9339	9339	357	1786	8982	7553
60	6618	0,500	0,500	3309	3309	714	0	2594	3309
61	18025	0,545	0,455	9824	8202	1786	0	8038	8202
62	70662	0,500	0,500	35331	35331	1929	1571	33403	33760
63	44192	0,500	0,500	22096	22096	714	0	21382	22096
64	15294	0,500	0,500	7647	7647	1071	0	6576	7647
65	26734	0,500	0,500	13367	13367	714	714	12653	12653
66	10491	0,533	0,467	5591	4899	0	0	5591	4899
67	52154	0,500	0,500	26077	26077	0	2857	26077	23220
68	14562	0,500	0,500	7281	7281	1071	1071	6210	6210
69	16441	0,425	0,575	6988	9454	0	821	6988	8633
70	27982	0,450	0,550	12592	15390	0	0	12592	15390
71	69314	0,500	0,500	34657	34657	0	0	34657	34657
72	1877	0,500	0,500	938	938	0	0	938	938
73	14432	0,500	0,500	7216	7216	0	0	7216	7216
74	10633	0,577	0,423	6135	4498	0	0	6135	4498
75	1537	0,591	0,409	908	629	0	0	908	629
76	7254	0,444	0,556	3221	4033	0	0	3221	4033
77	5096	0,500	0,500	2548	2548	0	0	2548	2548
78	15096	0,692	0,308	10447	4650	3000	0	7447	4650
79	14614	0,459	0,541	6708	7906	0	714	6708	7192
80	7916	0,500	0,500	3958	3958	0	0	3958	3958
81	5941	0,500	0,500	2970	2970	0	0	2970	2970
82	7440	0,500	0,500	3720	3720	0	0	3720	3720
83	9340	0,500	0,500	4670	4670	0	0	4670	4670
84	3808	0,500	0,500	1904	1904	0	0	1904	1904
85	1001	0,555	0,445	556	446	0	0	556	446

Posto	Total no arco (10 <sup>3</sup> .t)	Fração em cada sentido do arco		Quantidade de Tráfego Anual de Carga (10 <sup>3</sup> .t)					
				Carga Total		Granéis		Carga Geral	
		A	B	A	B	A	B	A	B
86	15329	0,500	0,500	7665	7665	0	714	7665	6950
87	4339	0,500	0,500	2169	2169	0	0	2169	2169
88	53934	0,500	0,500	26967	26967	0	2294	26967	24673
89	32296	0,500	0,500	16148	16148	644	644	15504	15504
90	27679	0,500	0,500	13840	13840	263	263	13577	13577
91	13307	0,500	0,500	6654	6654	494	0	6160	6654
92	14075	0,351	0,649	4940	9135	714	1571	4226	7563
93	1394	0,567	0,433	790	604	357	0	433	604
94	1871	0,500	0,500	936	936	0	0	936	936
95	9160	0,586	0,414	5368	3792	2143	0	3225	3792
96	1659	0,500	0,500	830	830	0	0	830	830
97	90971	0,500	0,500	45486	45486	3214	3214	42271	42271
98	60150	0,500	0,500	30075	30075	2643	0	27432	30075
99	14665	0,500	0,500	7332	7332	1429	714	5904	6618
100	46176	0,500	0,500	23088	23088	2286	1286	20802	21802
101	28095	0,575	0,425	16155	11940	3629	0	12526	11940
102	29533	0,575	0,425	16981	12551	3929	0	13053	12551
103	29669	0,575	0,425	17060	12609	3329	0	13731	12609
104	22427	0,471	0,529	10563	11864	2646	0	7917	11864
105	2586	0,500	0,500	1293	1293	510	255	783	1038
106	2375	0,500	0,500	1188	1188	0	0	1188	1188
107	20376	0,578	0,422	11777	8599	714	0	11063	8599
108	19810	0,483	0,517	9568	10242	1071	1071	8497	9170
109	5215	0,500	0,500	2607	2607	0	1043	2607	1565
110	14348	0,500	0,500	7174	7174	0	0	7174	7174
111	21913	0,500	0,500	10956	10956	2143	3929	8814	7028
112	10491	0,533	0,467	5591	4899	0	0	5591	4899
113	9163	0,500	0,500	4582	4582	0	0	4582	4582
114	8621	0,500	0,500	4310	4310	714	0	3596	4310
115	24016	0,500	0,500	12008	12008	2500	714	9508	11294
116	7133	0,500	0,500	3566	3566	0	2143	3566	1423
117	35538	0,500	0,500	17769	17769	0	1395	17769	16374
118	18325	0,453	0,547	8301	10024	1786	2143	6516	7881
119	40704	0,500	0,500	20352	20352	0	857	20352	19495
120	15478	0,500	0,500	7739	7739	714	0	7025	7739

### 5.4.2. Matriz OD de Referência

A única matriz de carga geral no Brasil encontrada foi uma publicada por GEIPOT (1983) referente ao ano base de 1980. Contudo a quantidade de pares OD deste conjunto de dados foi considerada muito pobre quando comparada com a quantidade de micro-regiões e com o modelo digital da rede considerados no presente estudo de caso. Também se avaliou os 27 anos de diferença como um período muito grande para se utilizar a matriz de 1980 como referência, haja vista que os fluxos de transportes de carga geral daquela época eram muito mais concentrados nas regiões mais desenvolvidas do País.

Sendo assim, foi preciso adotar uma matriz alternativa, como “semente” no processo de otimização (Maximização da Entropia).

Para tanto, realizou-se diversas combinações das 22 matrizes OD (601 x 601 micro-regiões do Brasil) referentes à demanda dos 22 principais produtos estudados pelo CENTRAN (ano base de 2005). Por meio do *software* Transcad, alocaram-se na rede digital os fluxos de cargas gerados por cada combinação de matrizes OD. A combinação das matrizes dos produtos açúcar, adubo, álcool, cana-de-açúcar, carne, cimento, farelo de soja, fertilizantes, madeira, milho, óleos vegetais, papel, rocha fosfática, siderúrgicos, gerou fluxos que, aparentemente, foram os que mais se aproximaram (em termos de proporção do total) dos fluxos de carga geral publicados no gráfico “Carregamentos Multimodais 2007 com carga geral e sem minérios” (CENTRAN, 2007).

Deste modo, para efeitos acadêmicos do presente estudo de caso, decidiu-se utilizar tal matriz (arquivo DemandSeedMatrix.dat gerado a partir do VW\_MATRI\_Original\_Soma14Produtos.dvw) como a referência  $R_{ij}$  da formulação 25a-25c.

### 5.4.3. Listas de Pares OD Contribuintes dos Postos de Contagens

Para a elaboração de cada um dos 240 parâmetros  $P_{aij}$  (da formulação 25a-25c) referente a uma contagem de tráfego “a”, foi necessário relacionar todos os pares OD da rede digital cujos fluxos passassem pela referida contagem. Vale ressaltar que o fluxo de cada par OD da rede foi alocado ao menor caminho existente entre O e D.

Esta análise foi realizada por meio de um programa (macro) criado no ambiente do

Transcad (ParesODContribuintNasContagensDeTrafego.RSC – Anexo 1), que avaliou todos os menores caminhos entre todos os pares OD da rede e preencheu 240 arquivos de texto – cada um se referindo a uma contagem de tráfego e contendo a lista de pares OD cujos fluxos contribuem na respectiva contagem.

Uma dificuldade nesta fase foi a identificação da direção em que o arco da rede digital fora construído. Por exemplo, por meio do gráfico “Carregamentos Multimodais 2007 com carga geral e sem minérios” (CENTRAN, 2007), identifica-se a quantidade de fluxo na direção Sul-Norte referente à contagem feita na BR-364, entre as cidades de Ji-Paraná e Ariquemes. Contudo, quando o software Transcad avalia a direção em que um fluxo passa por um arco, o sistema apenas informa se passa na direção de construção do arco ou não. Portanto, de acordo com a macro referida anteriormente, o Transcad montará, para o referido arco, duas listas: uma de pares OD cujos fluxos passam na direção de construção do arco e outra lista para a direção contrária. Portanto, se não se sabe a direção de construção do arco digital correspondente ao trecho da BR-364 referido, não se saberá qual das duas listas se refere à direção Sul-Norte.

Para resolver este problema, foi criado outro programa (a macro DirectionsTest.RSC) também no ambiente Transcad, cujo método consiste em submeter cada arco (que contém posto de contagem) a um fluxo em uma direção conhecida (por exemplo, Sul-Norte na BR-364) e informar (como resultado) se o fluxo passa na direção de construção do arco ou não.

#### **5.4.4. O Processo de Obtenção da Matriz de Demanda Propriamente Dito**

A primeira tentativa de resolver o problema de otimização da formulação 25a-25c se deu com a elaboração de um programa na linguagem MOSEL no software de otimização XPRESS (arquivo GeracaoMatrizOD.mos – Anexo 2), entretanto a não-linearidade da função objetivo não foi suportada por este software.

Sendo assim, seguindo recomendação de ORTÚZAR e WILLUMSEN (1995), foi feita uma segunda tentativa (também infrutífera) por meio de uma simplificação do problema (descrita no ANEXO 8), que transformou a formulação de programação matemática 25a-25c em um sistema de equações não-lineares. Este sistema de equações resultante foi implementado no ambiente MATLAB 7.2 (arquivo ODMatrix\_1.m – Anexo 3) com o objetivo de se chegar aos valores de  $\chi_a$  (variável do ANEXO 8) e, em

consequência, aos valores de demanda  $w_{ij}$ . Porém não houve convergência das rotinas utilizadas por este software, apesar de tais rotinas serem ferramentas matemáticas de alto nível e dos dados “de teste” utilizados terem sido

Então, foi utilizado o Algoritmo Multi-Proporcional de Sucessivas Correções de Furness – um algoritmo alternativo simples porém com precisão suficiente para a análise em questão; sendo um processo mais eficiente nos casos de matrizes muito grandes e esparsas.

Este algoritmo foi implementado no próprio ambiente MATLAB 7.2 (ODMatrix\_2.m – Anexo 4) e apresenta a sequência a seguir.

### **Início do Algoritmo**

Comentário: Define tolerância, número máximo de iterações e chave de saída:

$Tol = 0,005$ ;

$NoI = 10000$ ;

$ChaveDeSaída = 0$ ;

**Enquanto** ( $NoI < 10000$  e  $ChaveDeSaída = 0$ ) **faça**

$ChaveDeSaída = 1$ ;

$NoI = NoI + 1$ ;

Comentário: NPC é a variável que define o número do posto de contagem.

**Para** ( $NPC$  de 1 até  $TotalDePostosDeContagem$ ) **Repetir**

Comentário: serão somadas as demandas  $w_{ij}$  dos pares  $ij$   
cujos fluxos passam pelo posto  $NPC$ ;

**Para** ( $i$  de 1 até  $TotalDeVérticesDaRede$ ) **Repetir**

**Para** ( $j$  de 1 até  $TotalDeVérticesDaRede$ ) **Repetir**

**Se** (o par  $ij$  passa pelo posto de contagem  $NPC$ ) **faça**

$TotalFluxosPosto(NPC) = TotalFluxosPosto(NPC) + w(i,j)$ ;

**Fim do Se**

**Fim do Para**

**Fim do Para**

Comentário: será usada variável do tipo  $V_a$  da formulação 25a-25c.

$FatorDeCorreção = V_{NPC} / TotalDeFluxosNoPosto(NPC)$ ;

Comentário: verificando se a precisão está dentro da tolerância:

**Se** ( $FatorDeCorreção > (1+Tol)$  ou  $FatorDeCorreção < (1-Tol)$ ) **faça**

$ChaveDeSaída = 0$ ;

**Fim do Se**

Comentário: corrigindo o valor da demanda  $w_{ij}$  para todos os pares  $ij$   
cujos fluxos passam pelo posto de contagem  $NPC$

**Para** ( $i$  de 1 até  $TotalDeVérticesDaRede$ ) **Repetir**

**Para** ( $j$  de 1 até  $TotalDeVérticesDaRede$ ) **Repetir**

**Se** (o par  $ij$  passa pelo posto de contagem  $NPC$ ) **faça**

$w(i,j) = w(i,j) * FatorDeCorreção$ ;

**Fim do Se**

**Fim do Para**

**Fim do Para**

**Fim do Para**

**Fim do Enquanto**

**Fim do Algoritmo**

Então se executou este algoritmo com o conjunto de dados total da rede rodoviária nacional formada por 601 centroides de micro-regiões.

Um detalhe interessante é que, no início das execuções, quando ainda se trabalhava

com 127 arcos onde havia contagens de tráfego (e não somente os 120 relacionados em 5.4.1), percebeu-se que o processo não estava convergindo, mas não por causa do método (como nas tentativas anteriores) e sim devido a pares de arcos cujas contagens de tráfego eram incompatíveis entre si; por exemplo, dois arcos em sequência que não têm um centroide gerador ou receptor de carga entre eles mas que têm contagens de tráfego distintas.

Estes arcos em sequência existiam, não por mau planejamento das pesquisas do CENTRAN, mas porque o Órgão repetiu algumas pesquisas em arcos próximos (e até mesmo no próprio arco onde havia possibilidade de erro considerável) para confirmar ou corrigir alguns casos e aumentar a disponibilidade de dados em outros.

Sendo assim, iterativamente, a cada execução do algoritmo, foi-se excluindo (do conjunto de arcos onde se considerou haver contagens de tráfego) um arco de cada par de incompatíveis até que o algoritmo não apresentasse mais problemas de convergência.

Na escolha do arco do par de incompatíveis que deveria ser eliminado, seguiu-se o critério de eliminar o arco da primeira pesquisa do CENTRAN e manter o da segunda pesquisa.

Os arcos foram excluídos na seguinte ordem:

- 100721 (incompatível com 112486);
- 110138 e 110049 (incompatíveis com 109170 e 110126);
- 111539 (incompatível com 110632);
- 110941 (incompatível com 110887 e 110976);
- 110664 (incompatível com 110635);
- 105200 (incompatível com 110887).

Com as referidas exclusões, não houve mais problemas de convergência. No entanto as micro-regiões de Manaus (AM), Belém (PA), Fortaleza (CE) e Porto Alegre (RS) ficaram com quantidades de fluxo de carga muito pequenas em relação ao seu potencial. Por isso foi realizado um segundo processo de geração da matriz OD, onde foram incluídas as contagens projetadas pelo CENTRAN para os seguintes arcos próximos a tais micro-regiões: 99538, 111956, 110688, 112069, 110588 (tais números se referem ao identificador do arco no modelo digital da rede fornecido pelo CENTRAN). Embora nestes arcos não tenham havido as pesquisas de campo de tráfego realizadas nos demais, considerou-se suas projeções como se fossem medições para que a matriz OD pudesse se aproximar satisfatoriamente da realidade.

## 5.5. FLUXOS VIA *HUBS* PRÉ-EXISTENTES

Para o cálculo dos fluxos intermodais já existentes antes da instalação dos novos *hubs* ( $b_{ijpq}$ ), foi estimado um modelo que define a proporção em que uma demanda  $w_{ij}$  se divide entre os dois tipos de caminhos disponíveis: o direto ( $b_{ij}$ ) e o via *hubs* (do tipo  $b_{ijpq}$ ). Embora se admita que os fluxos pré-existentes devam ser modelados com a possibilidade de seguirem por mais de um roteamento via *hubs* além do caminho direto (v. item 4.3.2.3), houve necessidade nos experimentos realizados de assumir que cada demanda pré-existente entre um par  $ij$  trafega somente pelo caminho direto e no máximo por mais um único caminho via *hubs*. Isto porque foi necessário empregar um processo específico alternativo para estimação dos valores de  $b_{ijpq}$  (descrito em 5.5.4), uma vez que não houve recursos para se realizar um levantamento de dados de campo suficiente para modelar detalhadamente o funcionamento da rede pré-existente.

Como será considerado possível somente um caminho via *hubs* para cada par  $ij$ , define-se um novo parâmetro de probabilidade para auxiliar o entendimento deste item e principalmente do item 5.5.4:  $P^*_{ij}$  é a probabilidade de um usuário do par  $ij$  optar por transporte via *hubs* (em detrimento do caminho direto).

Sendo assim, se  $ijpq$  é o caminho via *hubs* pré-existent de menor custo entre  $ij$ , então a probabilidade  $P^*_{ij}$  tem o mesmo valor da própria  $P_{ijpq}$  e da fração  $b_{ijpq}$  (definidas em 4.3.2). Caso se considerasse a existência de dois ou mais caminhos via *hubs* sendo utilizados num par  $ij$ , uma probabilidade  $P^*_{ij}$  seria igual à soma das frações dos fluxos de todos estes caminhos (e. g.,  $P^*_{ij} = b_{ijp1q} + b_{ijp2q}$ ).

A função de divisão modal (cabotagem versus rodoviário ou intermodal versus unimodal) para um transporte entre um par OD é definida segundo o modelo Logit (ORTÚZAR e WILLUMSEN, 1995) representado a seguir já com detalhes do caso em estudo:

$$P^*_{ij} = \frac{1}{1 + e^{(a \cdot (un-in) + a_0)}}, \quad (26)$$

onde

$P^*_{ij}$  é a probabilidade de se escolher a cabotagem ou o caminho intermodal;

$a$  é o vetor de parâmetros da área de influência de origem da carga;

$a_0$  é uma constante da área de influência de origem da carga;

$in$  é o vetor de variáveis relativas ao caminho intermodal;



$un$  é o vetor de variáveis relativas ao caminho unimodal.

A razão de se vincular  $a$  à origem da carga está explícita em 4.3.3.3.

Diversas características do processo de transporte podem ser consideradas como variáveis dos vetores  $in$  e  $un$  (conforme discutido em 4.3.3.1), porém, devido às limitações para obtenção de dados neste experimento, os parâmetros do referido vetor  $a$  terão que ser definidos não por calibração, mas por meio da solução de um sistema de equações não-lineares (descrito no item 5.5.4) que possui apenas duas equações por porto e, portanto, só possibilitará a definição de duas incógnitas para cada porto. Sendo assim, considerando que se pretende gerar um vetor  $a$  para cada área de influência (i. e., por porto), este vetor  $a$  não poderá ter mais de duas variáveis (i. e., duas dimensões).

Com tais restrições, foi viável utilizar – dentre as características relevantes dos sistemas de transportes – apenas o valor médio de frete e o tempo médio do serviço; tendo sido necessário também considerar a constante  $a_0$  (eq. 26) nula.

Outras características são muito importantes nesta análise; como distância da origem da carga ao porto de origem, distância do porto de destino ao local de destino final da carga e a variância do tempo de cabotagem. Um exemplo da importância desta última característica é um usuário que pode se dar por satisfeito com um tempo médio de cabotagem de 20 dias entre Santos e Manaus, mas pode não aceitar que algumas de suas remessas atrasem a tal ponto de levar 26 dias para a chegada.

Também se chegou a pensar em considerar o custo do transporte no lugar do valor do serviço, mas todas as empresas de cabotagem consultadas se negaram definitivamente a fornecer tais informações. Além disso o problema de otimização é modelado pela ótica do usuário do sistema de transporte (i. e., pelo ponto vista de economia de recursos na opção modal), de modo que o custo pode ser considerado igual ao valor do frete pago pelo usuário.

Sendo assim, no presente estudo de caso, há dois vetores de variáveis para cada par  $ij$  das áreas de influência, sendo  $in = (in_1, in_2)$  e  $un = (un_1, un_2)$ . As variáveis destes vetores são

- o valor total do serviço de transporte ( $in_1$  e  $un_1$ ) e
- o tempo total de transporte ( $in_2$  e  $un_2$ ).

Portanto, na construção da função de divisão modal de cada área de influência dos portos considerados, será utilizado o sistema de equações não lineares descrito no item 5.5.4, cujos dados de entrada são os totais (em toneladas) de embarque e desembarque de carga geral nos portos de estudo e os vetores de variáveis conhecidas  $in$  e  $un$

referentes a cada par  $ij$ .

### 5.5.1. Cálculo do Valor Total do Serviço de Transporte

Para o modo rodoviário, foram criadas curvas (por meio de regressão) de valor de frete por tonelada-quilômetro (R\$/t.km) em função da distância percorrida. Os dados-bases para o processo foram valores de fretes realmente praticados no mercado, que foram disponibilizados por SIFRECA (2007). Estes dados coletados na referida página da Internet se referem a 1 mês de levantamento, o que pode ter distorcido um pouco os resultados (devido à sazonalidade). Os resultados poderiam ser melhorados desde que se utilizasse o banco de dados completo de 2007 do SIFRECA, cujo valor de aquisição excedeu o limite planejado para as despesas nesta pesquisa.

As figuras a seguir apresentam as curvas de valor de frete rodoviário elaboradas para distâncias a partir de 1000 km (para modelagem do transporte unimodal entre pares OD) e para distâncias de até 800 km (para cálculo dos valores das “pontas” rodoviárias do transporte multimodal por cabotagem). Utiliza-se 800 km e não 400 km (limite estabelecido para uma área de influência portuária conforme 5.1) porque há o serviço de buscar o contêiner vazio para a estufagem e o serviço de levar o contêiner cheio para o embarque no porto. Não há necessidade de função para distâncias entre 800 e 1000 km porque (conforme justificado em 5.1) não se consideram pares OD com distâncias inferiores a 1000 km já que nestes casos a cabotagem raramente é utilizada no País. E, pelo mesmo motivo de limite de viabilidade da cabotagem, tampouco se consideram pontas rodoviários maiores que 400 km.

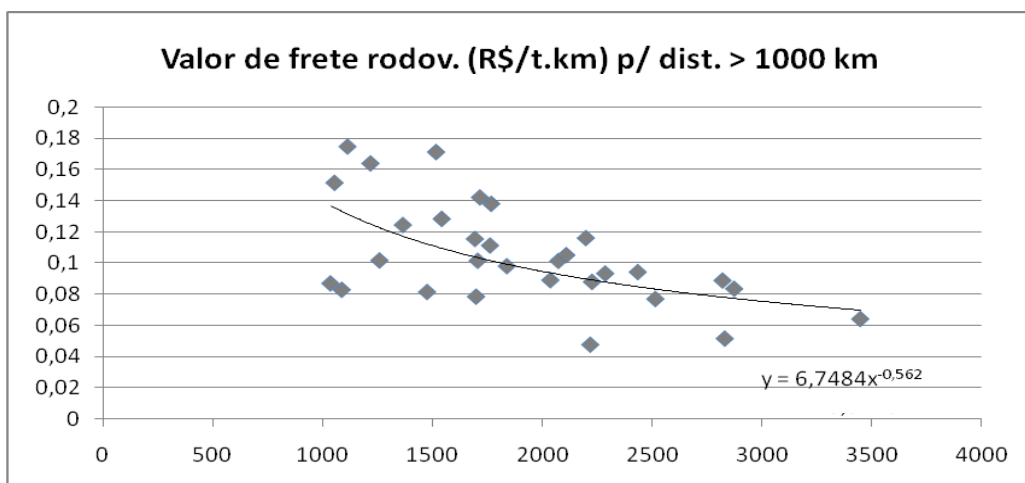


FIG. 5.4 – Função de valor de frete rodoviário (distância > 1000 km)

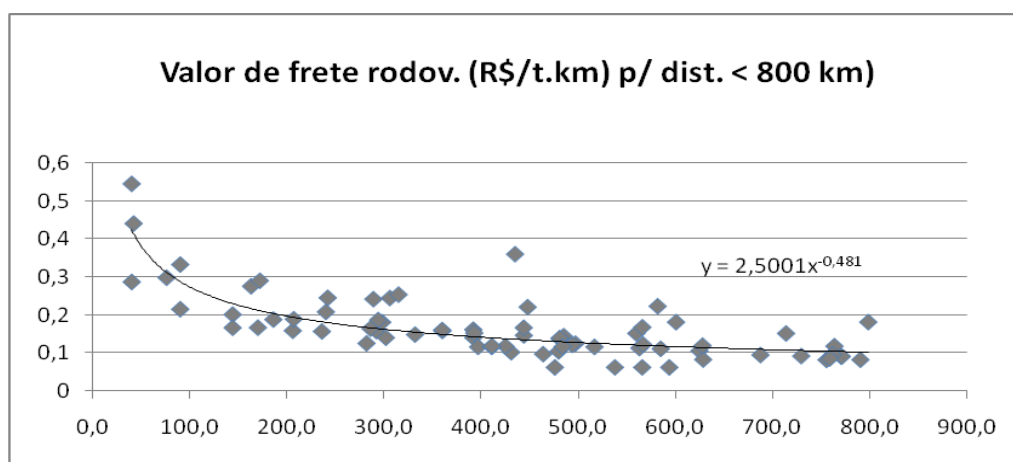


FIG. 5.5 – Função de valor de frete rodoviário (distância < 800 km)

Com as curvas, tornou-se possível calcular os valores de fretes médios para o transporte rodoviário entre todos os pares OD do estudo.

Para o cálculo do frete aquaviário médio foi realizada uma pesquisa nas três principais empresas de cabotagem instaladas no País. Os dados foram submetidos a uma análise e criou-se uma matriz OD de valores médios de frete, considerando todos os portos do estudo como pontos de origem e de destino. Esta matriz encontra-se com o nome ODFV na listagem do programa Temp&ValoresFreteDosParesOD\_Cabot2.RSC (Anexo 5).

Neste valor de frete estão incluídos os custos de transporte e de transbordo.

O primeiro é dado pelo valor cobrado pelo armador devido ao traslado (a bordo) da carga mais as incidências do seguro, impostos e BAF (*bunkers adjustment factor* ou fator de ajuste devido a variações no custo do combustível). Já o custo de transbordo, no caso deste experimento, é composto pelos custos portuários de ambos os terminais do trajeto aquaviário. A fim de detalhar melhor estes valores de transbordo, relacionam-se a seguir as referidas taxas.

**a.** Serviços à embarcação (praticagem, amarre, instalações para recolhimento de resíduos e outros).

**b.** Capatazia é o valor cobrado pelo porto por todo o manejo da carga desde a embarcação até a armazenagem ou o do sentido inverso. No comércio internacional, o termo utilizado é *THC (Terminal Handling Charge)*.

**c.** As chamadas taxas adicionais da carga são:

- *heavy lift charge* e *extra length charge*, que são cobradas quando um peso muito elevado ou dimensões excepcionais da carga exigem condições especiais para

movimentação;

- *ad valorem charge* (seguro), para cargas de considerável valor unitário, devido à responsabilidade maior que as mesmas exigem, representada por um custo maior para assegurar o transporte (incluindo o transbordo).

**d.** Armazenagem da carga.

**e.** A *BL fee* (*bill of lading*) é a taxa referente ao serviço do agente marítimo, enquanto *doc fee* é a taxa cobrada pelo armador para emissão dos documentos necessários. Estas taxas também se devem ao transbordo.

**f.** Os impostos e o AFRMM, por serem aplicados segundo uma alíquota, também incidem sobre os custos de transbordo.

### **5.5.2. Cálculo do Tempo Total de Transporte**

O tempo total do transporte unimodal (neste caso, rodoviário) foi gerado a partir do tempo médio de percurso do menor caminho (sob velocidade de operação considerada 60% da velocidade de projeto) adicionado aos tempos médios de paradas (refeição, descanso, etc). Este cálculo foi realizado numa das rotinas do programa Temp&ValoresFreteDosParesOD\_Cabot2.RSC (elaborado em ambiente Transcad – Anexo 5). Tal rotina é constituída de três funções (executadas para cada par OD do estudo):

- definição do menor caminho rodoviário;
- cálculo do tempo de deslocamento;
- estimativa do tempo de paradas.

O que possibilitou tais cálculos foi o fato de o modelo digital da rede utilizada (referido no item 5.4) incluir as informações da distância real e da velocidade de projeto de cada arco.

O tempo total de cabotagem é constituído de quatro parcelas:

- tempo de espera da embarcação (função da frequência de chegada dos navios);
- tempo de antecedência do despacho (na entrega da carga no porto de origem), *deadline*, considerado 12 h em média, de acordo com informação de empresa do setor;
- tempo desde o atraque no porto de origem até a chegada ao destino (no qual

estão incluídos os tempos médios de atrasos devidos às filas para atraque nos berços e outros fatores) e

- tempo para haver o descarregamento e o destinatário receber a carga no porto de destino (considerado 24 h em média, de acordo com informação de empresa do setor).

Os dados de tempo também foram pesquisados nas principais empresas de cabotagem (resumidos na Tabela 5.1), tendo-se chegado a uma matriz de pares de portos OD, contendo os somatórios das referidas parcelas.

Também foram feitas análises das variâncias destes tempos, embora se tenha decidido não levar as mesmas em conta quando se elaborou a função de divisão modal do presente estudo.

### **5.5.3. O Programa de Cálculo dos Tempos e Valores de Frete**

Com o modelo digital da rede de transportes aberto no ambiente Transcad, selecionaram-se as áreas de influência dos portos já atualmente utilizados como escalas das linhas de cabotagem (descritas no início do item 5.1).

Vale ressaltar que, apesar de que cada porto seja mais um centroide de sua área de influência, ele não será considerado como origem ou destino de cargas, uma vez que, na rede digital, para cada centroide portuário existe um outro centroide referente à cidade em que tal porto se localiza, de modo que o centroide específico do porto não é utilizado para representar produção ou atração de cargas, mas sim um ponto de passagem da rede viária.

Como a cabotagem não é viável para todas as combinações de pares dos centroides (produtores ou atratores de carga), também não serão considerados como usuários da cabotagem os pares com distância rodoviária inferior a 1000 km.

Tendo sido definidas tais restrições, passa-se à descrição do programa Temp&ValoresFreteDosParesOD\_Cabot2.RSC (Anexo 5) propriamente dito.

Para cada par de centroides das micro-regiões do Brasil que se localizam dentro das referidas áreas de influência, a macro (programa) executa os seguintes passos:

- determinação do menor caminho entre o par OD;
- inclusão ou não do par no conjunto de possíveis usuários da cabotagem;
- **cálculo do tempo de transporte unimodal** (rodoviário);

- **cálculo do valor do frete unimodal;**
- determinação do par de portos cuja linha de cabotagem de ligação oferece o serviço mais rápido ao par OD, com determinação de menor caminho entre cada nó (de origem ou destino) e o porto que lhe atende (com exclusão do par de portos, caso algum dos menores caminhos supere 400 km);
- determinação do tempo e valor de frete rodoviários dos referidos menores caminhos entre cada nó (de origem ou destino) e o porto que lhe atende;
- determinação do acréscimo no tempo médio total intermodal causado pelo tempo rodoviário na origem;
- leitura do tempo devido à cabotagem na respectiva matriz OD de portos;
- leitura do valor de frete da cabotagem na respectiva matriz OD de portos;
- **cálculo do tempo total de transporte intermodal;**
- **cálculo do valor total de frete intermodal.**

As etapas do programa destacadas em negrito geram os quatro produtos (quatro matrizes OD) que serão utilizados como dados de entrada do sistema não-linear de equações (referido no item 5.5.4) que definirá os parâmetros “a” das funções de divisão modal das áreas de influência portuárias.

#### **5.5.4. Definição dos Parâmetros das Funções de Divisão Modal**

Para cada um dos dez portos da cabotagem nacional, é necessário que seja definida uma função de divisão modal (eq. 26), referente aos fluxos oriundos da respectiva área de influência. Para isso, basta que se determine o vetor “a” de cada área de influência, que contém os parâmetros “ $a_1$ ” e “ $a_2$ ”, relacionados ao valor do frete e ao tempo do serviço respectivamente.

Na prática comum de planejamento de transportes, estes parâmetros em geral são definidos por calibração de dados obtidos em pesquisas de preferências reveladas ou preferências declaradas (conforme descrito em 4.3.3.3). No entanto a realização de uma pesquisa deste tipo foge ao escopo do objetivo principal deste trabalho e, além disso, requer demasiados tempo e recursos financeiros.

Sendo assim, para a aplicação específica neste experimento, criou-se um método alternativo para determinação destes parâmetros “ $a_1$ ” e “ $a_2$ ”. Este método utiliza as seguintes informações:

- matriz OD de fluxos de carga geral entre os centroides das áreas de influência;
- matriz OD de valores de fretes unimodais (rodoviários);
- matriz OD de valores de tempos do serviço unimodal;
- matriz OD de valores de fretes intermodais incluindo custo de transbordo;
- matriz OD de valores de tempos intermodais incluindo o de transbordo;
- fluxos da cabotagem de embarque e desembarque de carga geral nos portos estudados (fonte ANTAQ, 2007).

Um fluxo de carga entre dois centroides  $i$  e  $j$  de áreas de influência distintas terá uma determinada probabilidade (eq. 26) de seguir pelo caminho intermodal (via *hubs*). Considerando-se um ano inteiro de transportes realizados (dados agregados, conforme justificado em 4.3.1), pode-se admitir que a quantidade anual de carga de  $i$  para  $j$  que segue via portos é o produto da demanda total de  $i$  para  $j$  pela probabilidade de escolha do caminho intermodal (conforme as equações 27 e 28). Nestas últimas equações, o parâmetro  $a$  é representado com um índice  $k$ , que não vem a ser um expoente; servindo apenas para destacar o fato de que a probabilidade é calculada de acordo com a área de influência do porto  $k$ . Vale recordar também que a constante  $a_0$  da eq. 26 está sendo considerada nula (conforme já explicado no início deste item 5.5).

$$Q_{ij} = w_{ij} \cdot P_{ij}^* \quad (27)$$

$$Q_{ij}^k = \frac{w_{ij}}{1 + e^{(a^k \cdot (un-in))}} \quad (28)$$

Sendo assim, pode-se dizer que a quantidade anual de carga geral embarcada num determinado porto  $k$  será igual ao somatório das quantidades anuais transportadas (via portos) a partir de todos centroides da área de influência de  $k$ .

$$Emb_k = \sum_{i \in AI(k)} \sum_{j \in UAI \setminus AI(k)} Q_{ij}^k \quad (29)$$

onde  $AI(k)$  é o conjunto dos centroides da área de influência de  $k$  e  $UAI$  é o conjunto união de todas as áreas de influência.

Analogamente, pode-se calcular a quantidade total desembarcada no porto  $k$ . Porém, neste caso, os fluxos são oriundos de outras áreas de influência e a probabilidade de utilização do transporte multimodal deve ser calculada de acordo com estas áreas de influência de origem.

$$Desemb_k = \sum_{i \in UAI \setminus AI(k)} \sum_{j \in AI(k)} Q_{ij}^g \quad (30)$$

Na equação 30, o índice  $g$  substituto do  $k$  indica esta diferença em que a quantidade é calculada de acordo com parâmetros das áreas de influência dos portos “de origem”.

De posse de duas equações (29 e 30) por porto e dois parâmetros a descobrir (“ $a_1$ ” e “ $a_2$ ”) por porto, tem-se um sistema de equações não-lineares para os dez portos relevantes da cabotagem: Rio Grande (RS), São Francisco do Sul (SC), Santos (SP), Itaguaí (RJ), Vitória (ES), Salvador (BA), Maceió (AL), Suape (PE), Pecém (CE) e Manaus (AM).

Para a solução deste sistema, foi elaborado o programa ModalSplitFunction.m (Anexo 6) no aplicativo MatLab 7.2, que inclui diversas rotinas de solução de sistemas de equações não-lineares. Admitiu-se um erro em cada equação de até 10% da quantidade anual embarcada ou desembarcada. Entretanto, mesmo com tal tolerância, as rotinas de solução não convergiram e os erros ficaram muito grandes para os portos com volumes de cabotagem muito pequenos – como São Francisco do Sul, Vitória e Maceió.

Acredita-se que estes erros são devidos aos fatores a seguir.

- A matriz OD gerada pelo algoritmo de Furness (item 5.4), conforme já justificado, é uma “aproximação” da realidade.
- Os valores de frete e de tempos dos serviços de transportes unimodais calculados também são valores sujeitos a alguns erros devidos a fatores econômicos de mercado e também a imprecisões dos dados da rede digital de arcos e centroides utilizada.
- As limitações dos processos das rotinas de solução do Sistema aliadas à complexidade das equações 29 e 30 e às diferenças de quantidades de cargas entre os portos (e. g., 2.750.000 t em Santos e 34.000 t em Vitória) também podem contribuir para os referidos problemas.

Apesar de as rotinas de solução deste sistema de equações não-lineares não terem convergido, este método alternativo não foi descartado. Ao invés disto, optou-se por



modificar um pouco os dados reais de fluxos através dos portos (ANTAQ, 2007) até se conseguir que as rotinas de solução convergissem para erros abaixo da tolerância. Para isso, foi criada a 4ª coluna da Tabela 5.4 a partir da 3ª coluna. Essa flexibilidade foi admitida porque o que se pretende é evitar as custosas pesquisas de mercado de preferências modais, ainda que seja criando dados apenas próximos da realidade. Afinal de contas, estes são somente dados “de entrada” para a realização do experimento fundamental desta tese, que vem a ser o teste de um novo modelo de localização de terminais concentradores.

A referida alteração dos dados reais de fluxos através dos portos foi feita por meio de um processo iterativo em que, a cada repetição, eram alterados alguns valores dos totais de embarque e desembarque nos portos (principalmente os de pouca movimentação de cargas) e, em seguida, era executada uma rotina de solução do sistema de equações. O objetivo foi conseguir um resultado que apresentasse erro menor que 10% para os nove portos que serão utilizados na fase seguinte deste estudo.

Conforme mais detalhadamente explicado no item 5.7, os dados do Porto de Vitória não serão utilizados na próxima etapa deste experimento. Portanto, devido também a sua pouca quantidade de movimentação de cargas, foram admitidos erros bastante grandes tanto no total de seus embarques quanto de seus desembarques.

A equação referente aos desembarques no Porto de Maceió (do tipo da eq. 30) não atingiu um erro inferior a 10% (6ª coluna da Tabela 5.4), mesmo com exaustiva quantidade de tentativas e modificações dos valores iniciais nas iterações. Sendo assim, admitiu-se um erro superior a 10% apenas para este caso dos desembarques neste porto, o que se considera aceitável devido a sua contribuição muito pequena para o total das cargas e também pelo fato de o erro se dar numa equação de “desembarque”. Prioriza-se a correção da equação do tipo embarque (em detrimento da de desembarque) porque a divisão modal é sempre determinada com os parâmetros da área de influência de origem, isto é, no porto dos “embarques”.

TAB. 5.4 – Fluxos de carga geral passando pelos principais portos nacionais

Sentido	Portos	Fluxos Totais (t)		Erros da solução do sistema de equações não-lineares (em relação aos valores Alterados)	
		ANTAQ	Alterados	Em toneladas	% Erro
Embarque	Rio Grande	406.081	406.081	1.774	0,44%
	S. Francisco do Sul	3.995	1.003.995	-28.322	-2,82%
	Santos	1.354.519	1.354.519	-36.868	-2,72%
	Itaguaí	627.567	627.567	-24.597	-3,92%
	Vitória	24.239	24.239	-24.239	-100,00%
	Salvador	402.315	422.315	39.382	9,33%
	Maceió	60.547	59.354	-740	-1,25%
	Suape	320.398	320.398	23.623	7,37%
	Pecém	255.341	240.541	-23.983	-9,97%
	Manaus	367.518	367.518	14.963	4,07%
Desembarque	Rio Grande	209.375	205.375	-18.874	-9,19%
	S. Francisco do Sul	90.629	1.126.345	36.811	3,27%
	Santos	1.390.450	1.412.160	-40.722	-2,88%
	Itaguaí	557.549	557.549	27.074	4,86%
	Vitória	9.272	9.272	-9.245	-99,71%
	Salvador	145.777	159.245	11.235	7,06%
	Maceió	27.913	27.913	-25.012	-89,61%
	Suape	634.844	634.844	31.409	4,95%
	Pecém	334.663	210.663	-7.719	-3,66%
	Manaus	415.543	415.543	3.654	0,88%

Fonte: ANTAQ (2007)

É muito difícil conseguir a convergência quando se tratam de equações com valores tão distintos. Por exemplo, tomam-se as quantidades de cargas que vão dos centroides da área de influência de um porto grande como Santos para os da área de influência de Maceió. Tais quantidades tornam-se parcelas tanto da equação dos embarques em Santos (eq. 29) quanto da dos desembarques em Maceió (eq. 30). E isso vincula uma equação de totais de embarques muito grandes ( $\approx 1.350.000$  t) a uma equação de total de desembarques muito pequenos ( $\approx 28.000$  t). Assim, qualquer pequena tentativa de correção de erro em Santos pode gerar um enorme erro nos desembarques de Maceió.

As alterações nos totais de embarques e desembarques foram mais significativas no Porto de São Francisco do Sul, pois a matriz OD gerada pelo algoritmo de Furness apresentou um potencial exageradamente grande de produção e consumo de carga na

área de influência deste Porto. Isto se deve ao fato de que a matriz semente utilizada (referida em 5.1.2) apresentou-se, nesta área, bastante destoante da realidade.

Vale observar que não se procurou realizar correções nos dados bases (matriz OD semente, modelo digital da rede viária, etc) devido à inviabilidade destas tarefas, já que tais dados se referem a todas as áreas de influência dos principais portos brasileiros, isto é, uma quantidade inviável de se tratar manualmente. Basta lembrar que a matriz OD de referência possui 361201 células contendo informações de fluxos de cargas.

Tendo-se aplicado estas considerações descritas, chegou-se aos parâmetros relacionados na TAB. 5.5, com os quais se pode modelar qualquer fluxo via *hubs* pré-existentes, já que, neste estudo de caso,  $b_{ijpq} = P^*_{ij}$  (conforme explicado no início de 5.5).

TAB. 5.5 – Parâmetros  $a = \{a_1, a_2\}$  das funções de probabilidade de uso de transporte intermodal (eq. 18) das áreas de influência dos portos

Portos	$a_1$ (Valor do Frete)	$a_2$ (Tempo do Serviço)
Rio Grande (RS)	0,01634607	-0,05127318
São Francisco do Sul (SC)	-0,28701589	-1,73957621
Santos (SP)	-0,16534645	-1,81760973
Itaguaí (RJ)	0,13974524	0,49768476
Salvador (BA)	-0,03830048	-0,76618573
Maceió (AL)	0,14323009	1,61877310
Suape (PE)	0,01023603	-0,29228317
Pecém (CE)	0,09369596	0,88607857
Manaus (AM)	0,04450863	0,14695807

## 5.6. ESTIMAÇÃO DA PROBABILIDADE $P_{ijkm}$

Para o cálculo das proporções de fluxos via novos *hubs* ( $P_{ijkm}$ ) é necessário criar parâmetros  $a_k=(a_1, a_2)$  das áreas de influência das localidades candidatas a *hub*, cuja estimativa depende de dados de preferência declarada. Novamente, defronta-se com o problema da necessidade de muitos recursos humanos e financeiros para os levantamentos de campo, o qual não foi possível solucionar.

Tampouco é possível utilizar o método alternativo proposto no item 5.5.4, porque nas localidades candidatas a *hubs* não há um porto que já funcione como escala habitual da cabotagem de carga geral e portanto também não há estatísticas de fluxos de

embarques e desembarques (dados fundamentais do referido método).

Sendo assim, apenas para a realização do experimento, decidiu-se utilizar parâmetros hipotéticos para estas novas áreas de influência, optando-se por lhes atribuir o vetor de parâmetros do porto vizinho mais próximo: Porto de Pecém para as áreas de São Luís e Belém (pelas características semelhantes destas três regiões) e parâmetros do Porto de Itaguaí para a área de Anchieta (já que se considera em 5.7 a premissa do transporte marítimo bastante incentivado nesta última região).

## **5.7. EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO**

Esta seção trata do cerne do experimento do modelo objeto desta tese, onde se apresenta um cenário bastante relacionado às intenções de governo que motivaram esta pesquisa. Trata-se de uma simulação em que o Governo Federal precise decidir onde aplicar recursos para a abertura de novos terminais de cabotagem de carga geral no País, visando o maior retorno financeiro possível (na forma de redução de custos da logística nacional).

Foi realizada uma pesquisa em trabalhos científicos bem como na imprensa especializada em infra-estrutura de transportes, com intuito de verificar intenções de implantação no Brasil de novos terminais portuários de carga geral.

Apesar de não ter sido encontrado projeto de vulto nacional já com homologação da ANTAQ e com licença ambiental de instalação, existem intenções plausíveis deste tipo de construção em algumas localidades estratégicas e que merecem destaque:

- Anchieta (ES, ao Sul de Vitória),
- Belém (PA) e
- São Luís (MA).

Tais localizações foram consideradas interessantes para este experimento pelos motivos a seguir.

- Anchieta tem importantes características que podem contribuir para torná-la um significativo elo portuário do futuro, principalmente nas cadeias logísticas cujos fluxos se identificam com a geografia do corredor de transporte que liga Goiás, Minas Gerais e Espírito Santo (com grande oferta ferroviária).
- Belém e São Luís são duas cidades estrategicamente importantes no País e

ademais se encontram próximas do centro de um grande trecho das linhas de cabotagem de carga geral (Fortaleza-Manaus) que ainda não conta com escalas intermediárias deste tipo de transporte.

- Quanto ao aspecto de testar a funcionalidade do modelo entre *hubs* concorrentes, Belém e São Luís representam muito bem este conflito, já que a área de influência total das duas cidades não aparenta ter um mercado suficiente para gerar demanda de transporte que requeira dois novos *hubs* da cabotagem. De modo que o modelo provavelmente selecionará uma das duas localizações.
- Também no aspecto anterior, Anchieta concorre diretamente com o Porto de Itaguaí (RJ) nos mercados localizados a distâncias similares dos dois portos, principalmente naqueles que estão aproximadamente na metade do caminho entre estes portos.

Como a quantidade de carga geral de cabotagem manejada no Porto de Vitória é atualmente bastante pequena, pode-se prever que a inclusão na cabotagem de um novo terminal de carga geral em Anchieta somente poderia ser considerada viável se este vier a substituir totalmente a função de escala de cabotagem do Porto de Vitória. Portanto, para que o estudo seja mais interessante, decidiu-se considerar duas condições hipotéticas: a transferência das escalas de cabotagem de Vitória para Anchieta (analogamente aos casos Recife-Suape e Fortaleza-Pecém) e um aumento da demanda de transporte de cabotagem na área de influência de Anchieta por conta de grandes investimentos motivados pelas seguintes medidas:

- extensão da Ferrovia Vitória-Minas (EFVM) até o Porto de Anchieta;
- construção de um novo terminal portuário de carga geral em Anchieta;
- implantação de trens expressos do Triângulo Mineiro e Belo Horizonte até este Porto;
- incentivos fiscais e
- *marketing* de fomento do uso deste sistema logístico EFVM-Porto em toda a área de influência da referida ferrovia.

Levando em conta estas condições, o parâmetro  $a = \{a_1, a_2\}$  (da função de probabilidade de uso de transporte intermodal – eq. 18) da área de influência do Porto de Anchieta teria que ser estimado por uma pesquisa de preferência declarada, assim como também aqueles referentes às áreas de influência dos portos de Belém e São Luís.

Novamente, defronta-se com este problema que demanda bastantes recursos financeiros e tempo, além de não ser parte do objetivo principal desta tese.

Também não é possível utilizar o método alternativo proposto no item 5.5.4, com o qual foram estimados os parâmetros referentes às áreas de influência dos portos já frequentados pelos navios da cabotagem. Isto porque, nas localidades em avaliação (Anchieta, Belém e São Luís), não há um porto que já funcione como escala habitual da cabotagem de carga geral e portanto também não há estatísticas de fluxos de embarques e desembarques (dados fundamentais do referido método).

Sendo assim, para a realização do experimento, decidiu-se utilizar parâmetros hipotéticos para estas novas áreas de influência, optando-se por atribuir às áreas de Belém e São Luís o parâmetro da área do Porto de Pecém (CE) enquanto, para a área de Anchieta (com as condições modificadoras propostas), utiliza-se o parâmetro da área do Porto de Itaguaí (RJ).

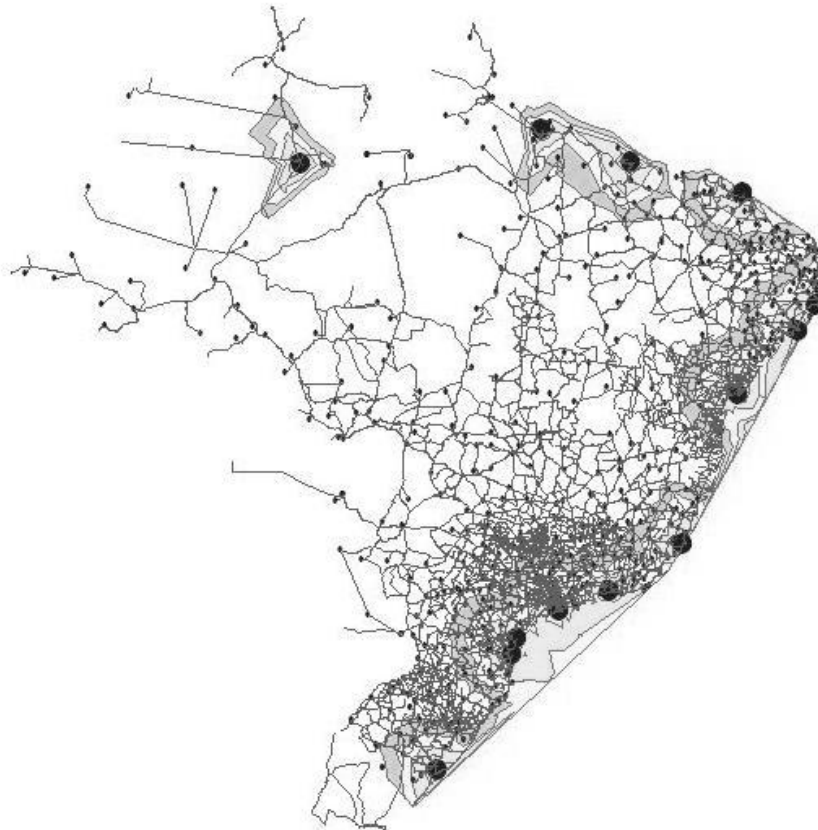


FIG. 5.6 – Áreas de influência de 12 portos considerados no experimento

Da mesma forma que foram delimitadas as áreas de influência dos dez portos atuais da cabotagem de carga geral brasileira (na introdução de 5.1), também foram definidas

as áreas referentes aos três novos portos cujas viabilidades estão em estudo (Anchieta, Belém e São Luís) – ilustrado pela Figura 5.6.

Todos os centroides de produção e consumo de carga da área de Anchieta (26 ao todo), já pertenciam à área do Porto de Vitória – o que já era de se esperar tendo em vista a proximidade entre os dois portos.

As áreas Belém e São Luís reuniram 20 centroides, os quais não pertenciam às áreas anteriores.

Assim, reunindo-se as novas áreas propostas com as anteriores, chegou-se a um total de 289 centroides de produção e consumo de carga (Figura 5.6).

### 5.7.1. Implementação do Modelo

O modelo proposto no item 4.3.2 foi implementado no *software* de otimização Xpress-MP v.2007 (linguagem Mosel – empresa Dash Optimization), conforme a listagem do Anexo 7. A execução do modelo em cada aplicação leva em média 25,7 segundos, utilizando o sistema operacional Windows XP Professional SP2, processador Athlon XP 2400 2GHz e memória RAM de 1Gb. Apesar de serem utilizadas apenas 3 variáveis  $y_h$ , o total de *hubs* é 12 ( $H \cup H^*$ ) e os pontos de origem e destino somam 289 vértices. O programa desenvolvido apresenta as seguintes etapas:

- Fase 1 – declaração de variáveis globais do programa;
- Fase 2 – codificação dos locais com *hubs* instalados e daqueles passíveis de receber a instalação de um novo terminal concentrador;
- Fase 3 – entrada de dados e cálculo dos parâmetros  $C_{ijkm}^o$ ;
- Fase 4 – declaração das variáveis de otimização ( $x_{ijkm}$  e  $y_h$ );
- Fase 5 – formulação do problema;
- Fase 6 – execução da otimização por meio do Xpress-Optimizer;
- Fase 7 – apresentação dos resultados.

Os dados de entrada foram todos aqueles apresentados ao longo deste capítulo.

Quanto aos custos fixos de novos terminais nas localidades candidatas a *hubs* ( $C_h \mid h \in H$ , que incluem os custos de construção e manutenção, além de outros), nas tentativas de obter suas estimativas foram encontrados apenas valores com graus de incerteza muito grandes, pois se tratam de orçamentos elaborados sem a maior parte dos projetos executivos (com muitos itens fundamentados apenas nas estimativas dos

projetos básicos), uma vez que ainda não há expectativa de realização “imediate” destes projetos.

Além disso, normalmente um porto marítimo de carga geral atende não só o mercado doméstico (cabotagem) mas também o fluxo do mercado internacional, que no Brasil costuma superar a quantidade de carga do primeiro. De modo que, para se analisar a viabilidade de instalação de um terminal de cabotagem em um novo porto, não se pode considerar todo o custo da obra como um passivo apenas da cabotagem, há que se dividir tal ônus com o transporte internacional.

Portanto, para a solução do problema com uma única aplicação do modelo proposto, seria necessário obter as parcelas precisas dos custos fixos referentes à cabotagem em cada uma das três localidades candidatas, o que permitiria chegar à combinação ótima de novos *hubs* e *spokes* a serem utilizados no mercado doméstico.

Entretanto em decisões governamentais muitas vezes é mais interessante a realização de uma análise mais ampla com a identificação dos intervalos de custo em que determinadas combinações de projetos sejam viáveis. E, como existe a facilidade de haver apenas três alternativas de instalação de novos *hubs*, foram realizadas nove aplicações do modelo (A-I, Tabela 5.6) variando apenas os custos fixos anuais  $C_h$ . Os resultados permitiram diversas conclusões como se verifica a seguir.

À medida que o número de variáveis  $y_h$  seja aumentado, a solução do problema torna-se mais complexa e mais duradoura, podendo o tempo de solução no Xpress-MP chegar a ser inviável. Nesta situação, recomenda-se a tentativa de se desenvolver algum algoritmo heurístico específico e também a realização de uma análise poliédrica aprofundada (levando em conta até mesmo a particularidade de cada instância de problema a que se aplicar o modelo). Um processo heurístico não chega necessariamente à solução ótima, mas pode apresentar resultados dentro de uma tolerância aceitável.

### **5.7.2. Resultados**

Conforme referido no item anterior, foram realizadas aplicações do modelo em que apenas os custos fixos anuais  $C_h$  foram variados (Tabela 5.6), a fim de se verificar as faixas de custos em que determinadas hipóteses de projeto possam ser viabilizadas. A coluna da direita (Redução nos Custos de Transporte) foi calculada por uma rotina inserida no algoritmo de otimização implementado.



O objetivo principal do programa implementado é identificar quais *hubs* candidatos devem ser instalados e, para cada par  $ij$ , qual par de *hubs* deve intermediar seus fluxos  $ij$  (i. e., definir os valores das variáveis  $y_h$  e das  $x_{ijkm}$  para a solução ótima do problema). Cabe ressaltar que não se apresenta nesta tese as listagens das variáveis  $x_{ijkm}$  resultantes das aplicações porque, para cada execução, existem centenas de milhares desta variáveis, já que a rede apresenta 83.521 pares  $ij$  e cada par pode ser intermediado por uma das 51 combinações de pares de *hubs*, onde pelo menos um dos dois seja um candidato a novo *hub* do sistema.

Caso o valor absoluto do custo “total” da rede fosse de interesse da análise, teriam que ser determinados todos os custos de transporte diretos  $C_{ij}$ , bem como as respectivas variáveis  $x_{ij}$ . Entretanto, para atingir o referido objetivo "principal" (descrito no parágrafo anterior), pode-se eliminar as variáveis referentes aos pares  $ij$  cujas limitações mostram que os fluxos do par não têm condições práticas de seguir por caminhos via *hubs*, já que, no processo de otimização, sabe-se que estas variáveis seriam sempre constantes, isto é, a variável de fluxo direto seria sempre igual a 1, enquanto todas as demais variáveis de fluxo via *hubs* seriam nulas (i. e.,  $x_{ij} = 1$  e  $x_{ijkm} = 0$ , quaisquer que sejam  $k$  e  $m$ ), de modo que não há como modificar estas variáveis para gerar uma solução de menor custo. Portanto não foi necessário mantê-las na formulação, já que nesta aplicação específica não houve interesse na determinação do custo total da rede.

Assim, os pares cujas variáveis não foram utilizadas são aqueles em que:

- o *hub* de origem é o mesmo que o *hub* de destino;
- o custo via *hubs* é maior que o custo do transporte direto;
- a distância entre  $i$  e  $j$  é menor que 1000 km;
- a distância entre a origem e o *hub* da origem ou entre o destino e o *hub* do destino é maior que 400 km;
- as distâncias referidas na alínea anterior são adequadas mas não há serviço de cabotagem disponível entre os portos (*hubs*) de origem e destino.

A segunda e a terceira condições foram justificadas no item 5.1 (antes de 5.1.1).

Então se passa a tratar das aplicações realizadas (Tabela 5.6).

No Caso A, apenas Anchieta é selecionada para a instalação de um novo *hub*. A economia de custos de transporte proporcionada é cerca de R\$ 280.656.000,00 ao ano, gerando um saldo no projeto de R\$ 200.539.000,00 ao ano. Portanto projetos na localidade com custos fixos até cerca de R\$ 280 x 10<sup>6</sup> apresentariam retorno financeiro,

mesmo sem a instalação de outro novo *hub*.

Nos Casos B e C, com a redução dos custos nas localidades 2 e 3, a instalação do *hub* em Belém (3) também passa a ser incluída na solução ótima. Nota-se que, para custos fixos iguais das localidades de Belém e São Luís ( $C_2 = C_3$ ), ocorre uma concorrência com apenas uma vencedora para valores nos seguintes intervalos:  $19.262 \times 10^3 \leq C_2 \leq 80.116 \times 10^3$  quando o *hub* de Anchieta está instalado ( $y_1 = 1$ ); e  $8.336 \times 10^3 \leq C_2 \leq 49.943 \times 10^3$  quando  $y_1 = 0$  (v. também casos G e E). E, nesta concorrência, a decisão da otimização será sempre Belém ( $y_3 = 1$ ), em detrimento de São Luís ( $y_2 = 0$ ).

TAB. 5.6 – Aplicações do novo modelo

Casos	$C_h$ - Custos fixos ( $10^3$ R\$/ ano)			Função Objetivo ( $10^3$ R\$/ ano)	Hubs*	Redução nos Custos de Transporte ( $10^3$ R\$/ ano)
	1. Anchieta	2. S. Luís	3. Belém			
A	80.117	80.117	80.117	9.742.190	1	280.656
B	80.116	80.116	80.116	9.742.190	1, 3	360.773
C	80.116	19.262	19.262	9.681.340	1, 3	360.773
D	80.116	19.261	19.261	9.681.340	1, 2, 3	380.034
E	360.773	80.117	22.000	9.914.790	3	49.943
F	360.773	22.000	80.117	9.932.460	2	32.277
G	360.773	8.336	8.336	9.901.120	3	49.943
H	360.773	8.335	8.335	9.901.120	2, 3	58.279
I	80.117	70.854	80.117	9.742.190	1, 2	351.510

\* Hubs selecionados

Os Casos D e H mostram que as localidades concorrentes Belém e São Luís podem ser incluídas juntas na solução ótima ( $y_2 = y_3 = 1$ ) se ambos os custos fixos ( $C_2 = C_3$ ) estiverem nos seguintes intervalos:  $C_2 \leq 8.335 \times 10^3$  quando o *hub* de Anchieta não esteja instalado ( $y_1 = 0$ ); e  $C_2 \leq 19.261 \times 10^3$  quando  $y_1 = 1$ . Neste último intervalo, a solução da otimização inclui todas três localidades mesmo para custos fixos ainda maiores em Anchieta ( $C_1$ ).

No Caso E, os custos fixos das localidades 1 e 2 ( $C_1$  e  $C_2$ ) foram elevados enquanto o  $C_3$  foi reduzido, a fim de se verificar a economia de transporte gerada por somente um *hub* instalado em Belém (R\$ 49.943.000,00 ao ano). Nota-se que a soma das economias de transporte geradas separadamente pelos *hubs* 1 e 3 (R\$ 330.599.000,00 ao ano) é menor que a gerada com a instalação de ambos (v. Caso B), o que já se esperava, devido aos fluxos que passam a trafegar entre estes dois *hubs*.

O Caso F é análogo ao E, com a diferença de que o objetivo é verificar a economia

de transporte gerada por somente um *hub* instalado em São Luís (R\$ 32.277.000,00 ao ano).

Os Casos I e B revelam uma combinação de custos em que a solução ótima prioriza São Luís ao invés de Belém: se o custo fixo em Belém ( $C_3$ ) não puder ser reduzido aquém de R\$  $80.117 \times 10^3$ , então a instalação em São Luís é incluída sempre que haja valores  $C_2 \leq 70.854 \times 10^3$  e o *hub* de Anchieta esteja instalado ( $y_I = 1$ ).

Diversas outras situações poderiam ser simuladas a fim de suportar um processo decisório em meio a vários agentes de decisão propondo cenários com diferentes combinações de custos.

## 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Foi criado um modelo do Problema Não-Capacitado de Localização de *Hubs* em Rede sob Gerenciamento Descentralizado, incluindo sua formulação de programação linear inteira e um experimento com sua aplicação ao transporte intermodal de carga geral no Brasil, cujos resultados revelaram a viabilidade de utilização deste novo modelo como instrumento de suporte a um processo decisório.

No modelo busca-se retratar a realidade das operações descentralizadas, admitindo-se que, entre um par origem-destino  $ij$ , podem ser utilizados o caminho via *hubs* e o direto “simultaneamente”. Com esta consideração, rompe-se uma limitação dos modelos convencionais. E tal inovação expande o campo de aplicação da Otimização Combinatória, pois seu emprego em localização de *hubs* já não se encontra restrito às redes em que predomina um critério uniforme de escolha de melhor caminho. De modo que a programação matemática também pode ser utilizada em qualquer rede sob gerenciamento descentralizado cuja modelagem probabilística dos fluxos seja viável.

Tal modelagem é feita com base na Teoria Comportamental aplicada ao transporte (DOMENCICH e MCFADDEN, 1975) e constitui a parte mais trabalhosa do processo, uma vez que depende de onerosas pesquisas de demanda e preferência modal. Contudo este não é um problema exclusivo do modelo em questão, mas sim de qualquer método que analise (por meio de modelo matemático) um sistema de transportes em mercado livre.

O modelo criado permite que sejam considerados critérios subjetivos na escolha entre tipos de transporte (direto ou via *hubs*). Porém, dada a natureza da função objetivo, os valores das variáveis devem ser numéricos. Portanto os recursos (cuja economia pretende-se maximizar) devem ser representados de forma objetiva – seja pela própria grandeza (valor monetário, tempo, etc), seja por lógica *fuzzy*, ou outro método. Numa aplicação sob ótica empresarial, por exemplo, analisa-se o comportamento subjetivo do usuário em suas opções, mas computa-se na função objetivo apenas o retorno financeiro do projeto.

Para ilustrar a utilidade do modelo proposto citam-se alguns exemplos de seu emprego prático:

- localização de terminais de intermodais ao longo de uma hidrovía interior;
- localização de terminais em uma ferrovia metropolitana para passageiros

(que geralmente têm opção rodoviária – ônibus e/ou automóvel de passeio);

- localização de aeroportos públicos para cargas;
- localização de terminais unimodais para consolidação e desconsolidação de *LCL* (*less than container load*, carga fracionada).

Quanto à abordagem do transporte intermodal realizada em diversos tópicos ao longo do trabalho, pode-se afirmar que esta compôs um panorama abrangente e objetivo dos principais aspectos do tema e ainda logrou reunir (de forma concisa) dados específicos no contexto do modo aquaviário.

No capítulo referente ao estudo de caso, além de ter sido atingido o objetivo de apresentar a experimentação do modelo, também se mostrou o quanto é complexa e laboriosa a modelagem de redes de transporte de numerosos usuários. Em primeiro lugar devido à dificuldade de obtenção dos dados, que ou é impedida porque as grandes empresas operadoras (caso de modos de grande capacidade) desejam não divulgá-los (por razões de concorrência, fiscalização pública, etc), ou é muito onerosa porque depende de grandes pesquisas em redes amplas com muitos operadores (caso do modo rodoviário) – veja-se o exemplo do item 5.5.1 em que uma compra de uma quantidade relativamente pequena de dados não pôde ser viabilizada devido ao alto custo.

Outra razão da referida complexidade é o fato de a quantidade de dados ser normalmente muito grande. Neste trabalho, por exemplo, a matriz OD inicial com 601 centroides de origem e destino gerou 361.201 pares; as contagens de tráfego em vias totalizaram 240; e os possíveis trajetos entre portos somaram 144 – o que torna difíceis e trabalhosos a análise de resultados, a simples conferência (e correção) de dados e o próprio processamento dos mesmos. Quanto a este último, cada simples manipulação que não possa ser feita de forma automatizada exige muitas vezes horas de trabalho. E, como os dados-bases utilizados não foram produzidos especificamente para esta pesquisa, foram necessários (para gerar as informações necessárias ao experimento) consideráveis processamentos automatizados de longa duração, além de um razoável número de procedimentos manuais (não totalmente automatizados) que demandaram muita mão-de-obra. Destes últimos listam-se alguns exemplos a seguir:

- a determinação na rede digital de todos os pontos das rodovias nacionais em que o CENTRAN realizara pesquisas de tráfego (5.4.1);
- o cálculo da quantidade de tráfego de carga geral (em ambos os sentidos em cada um destes pontos) a partir de três fontes de dados distintas (5.4.1);

- a realização de cada uma das diversas combinações de matrizes OD de produtos específicos com respectiva alocação na rede digital (para geração de uma matriz de referência – 5.4.1); e
- a identificação da direção em que cada arco digital de contagem de tráfego fora construído (5.4.2).

Somam-se a estas dificuldades as imprecisões e não acurácias das informações que foram conseguidas nas instituições colaboradoras, também as limitações dos métodos matemáticos e *softwares* utilizados, além da total inviabilidade de se obter sequer aproximações de certas informações (como, por exemplo, dos custos fixos de novos terminais nas localidades candidatas a *hubs* – relatada em 5.7.1).

A revisão bibliográfica foi a base científica para o desenvolvimento de todo o trabalho, tendo reunido publicações nas áreas de transporte intermodal, modelagem de transporte e localização de *hubs*, tendo sido coletados dentro deste último tópico sessenta e três artigos científicos de periódicos de referência internacional.

## 6.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- A sugestão mais importante é o desafio de generalizar o modelo proposto, considerando limites de capacidades nos arcos e até mesmo nos vértices.
- Conforme referido em 5.7.1, um número grande das variáveis de decisão da instalação de *hubs* ( $y_h$ ) pode inviabilizar a solução do problema por meio do *software* Xpress-MP. Portanto são também sugestões de novos trabalhos o desenvolvimento de método heurístico de solução voltado para este problema e a realização de análise poliédrica específica.
- Outra oportunidade de investigação é a aplicação da metodologia em redes sob gerenciamento descentralizado de outra natureza, que considerem outros tipos de cargas ou até mesmo o transporte de passageiros como, por exemplo, a localização de estações ferroviárias em um sistema de trens urbanos.
- Também pode ser elaborado um sistema para automatizar os procedimentos da metodologia e oferecer uma interface computacional gráfica que possibilite uma melhor visualização e avaliação dos dados, procedimentos e resultados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDINNOUR-HELM, S., 1998, “A hybrid heuristic for the uncapacitated hub location problem”, *European Journal of Operational Research*, v. 106, n. X (Feb), pp. 489-499.
- ABDINNOUR-HELM, S., VENKATARAMANAN, M. A., 1998, “Solution approaches to hub location problems”. *Annals of Operations Research*, v. 78, pp. 31-50.
- ABDL, 2004. Associação Brasileira de Desenvolvimento de Lideranças – Notícias. Disponível em: <<http://www.abdl.org.br/article/view/1137>>. Acessado em: 04 ago. 2008, 20:33:59.
- ALL, 2007. Mapa Ferroviário da América Latina Logística. Disponível em: <[http://www.all-logistica.com/port/malhasunidades/pop\\_mapa/flash\\_mapa.asp](http://www.all-logistica.com/port/malhasunidades/pop_mapa/flash_mapa.asp)>. Acessado em: 22 jan. 2007, 09:02:45.
- ALUMUR, S., KARA, B.Y., 2007, “Network hub location problems: the state of the art.” *European Journal of Operational Research*, v. 190, n. 1, pp. 1-21.
- ANTAQ, 2007. Anuário Estatístico de 2007 da Agência Nacional de Transportes Aquaviários. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br/Portal/estatisticasanuario.asp#>>. Acessado em: 02 fev. 2009, 10:47:32.
- ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres), 2003, *Logística e Transporte para Produtos de Alto Valor Agregado no Contexto Brasileiro*. Relatório em Convênio com a Universidade Federal de Santa Catarina. ANTT, Brasília.
- AYKIN, T., 1994, “Lagrangian relaxation based approaches to capacitated hub-and-spoke network design problem”. *European Journal of Operational Research*, v. 79, pp. 501-523.
- AYKIN, T., 1995, “Networking policies for hub-and-spoke systems with application to the air transportation system”. *Transportation Science*, v. 29, pp. 201-221.
- BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social), 1998, *Uma Análise da Carga Tributária no Brasil*. Texto para discussão n. 583/9. BNDES, Brasília.
- BONTEKONING, Y. M., 2006, *Hub Exchange Operations in Intermodal Hub-and-Spoke Networks - Comparison of the performances of four types of rail-rail exchange facilities*. Ph. D. dissertation, The Netherlands TRAIL Research School,

Delft, Holanda.

- BRYAN, D. L., 1998, “Extensions to the hub location problem: formulations and numerical examples”. *Geographical Analysis*, v. 30, pp. 315-330.
- CAMARGO, R.S.; MIRANDA JR., G.; LUNA, H. P., 2008, “Benders decomposition for the uncapacitated multiple allocation hub location problem”. *Computers & OR*, v. 35, pp. 1047-1064.
- CAMPBELL, J. F., 1994, “Integer programming formulations of discrete hub location problems”. *European Journal of Operational Research*, v. 72, pp. 387-405.
- CÁNOVAS, L.; GARCÍA, S. E., MARÍN, A., 2007, “Solving the Uncapacitated Multiple Allocation Hub Location Problem by means of a dual-ascent technique”. *European Journal of Operational Research*, v. 179, pp. 990-1007.
- CEL/COPPEAD (Centro de Estudos em Logística/ COPPEAD/ UFRJ), 2002, *Transporte de Cargas no Brasil, Ameaças e Oportunidades para o Desenvolvimento do País*. Relatório de Pesquisa, CEL/COPPEAD, Rio de Janeiro.
- CENTRAN, 2007, *Plano Nacional de Logística e Transportes – Relatório Executivo*. Rio de Janeiro, Centro de Excelência em Engenharia de Transportes.
- CHEN, J. F., 2007, “A hybrid heuristic for the uncapacitated single allocation hub location problem”. *Omega*, v. 35, pp. 211-220.
- CNT, 2006, *Pesquisa Aquaviária CNT 2006: Portos Marítimos – Longo Curso e Cabotagem*. Brasília, Confederação Nacional do Transporte.
- CUNHA, C. B., SILVA, M. R., 2007, “A genetic algorithm for the problem of configuring a hub-and-spoke network for a LTL trucking company in Brazil”. *European Journal of Operational Research*, v. 179, pp. 747-758.
- CVS, 2007. Catálogo de Equipamentos CVS Ferrari. Disponível em: [http://www.forkliftaction.com/cards/cvs\\_380/default.aspx](http://www.forkliftaction.com/cards/cvs_380/default.aspx). Acessado em: 27 abr. 2007, 12:48:26.
- DAVID, E. G., 2003, *Contribuição ao Estudo da Otimização do Custo Total Logístico de Sistemas Intermodais de Carga - Estabelecimento de Um Modelo para Tomada de Decisão por Parte dos Usuários do Sistema*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DOMENCICH, T., MCFADDEN, D. L., 1975, “*Urban Travel Demand: A Behavioral Analysis*”. 1 ed., Amsterdam, Netherlands, North-Holland Publishing Co.
- EBERY, J., KRISHNAMOORTHY, M., ERNST, A. T., BOLAND, N., 2000, “The capacitated multiple allocation hub location problem: formulations and algorithms”.



- European Journal of Operational Research*, v. 120, pp. 614-631.
- ERLENKOTTER, D., 1978, "A dual-based procedure for Uncapacitated Facility Location". *Operations Research*, v. 26, pp. 992-998.
- ERNST, A. T., KRISHNAMOORTHY, M., 1996, "Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem". *Location Science*, v. 4, n. 3, pp. 139-154.
- ERNST, A. T., KRISHNAMOORTHY, M., 1998, "Exact and heuristic algorithms for the uncapacitated multiple allocation p-hub median problem". *European Journal of Operational Research*, v. 104, pp. 100-112.
- ERNST, A. T., KRISHNAMOORTHY, M., 1999, "Solution algorithms for the capacitated single allocation hub location problem". *Annals of Operations Research*, v. 86, pp. 141-159.
- FAJARDO, A. P. C., 2006, *Uma Contribuição ao Estudo do Transporte Intermodal – Otimização da Expansão Dinâmica das Redes Intermodais do Transporte de Soja Produzida no Estado de Mato Grosso*. Tese de Doutorado, COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- FLEURY, P. F., 2002, *Gestão Estratégica do Transporte*. Relatório de Pesquisa, Centro de Estudos em Logística/COPPEAD/UFRJ (disponível em [www.coppead.ufrj.br](http://www.coppead.ufrj.br)), Rio de Janeiro.
- FRANKE, K. P., 2001, "Boosting Efficiency of Split Marine Container Terminals by Innovative Technology". In: *2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, pp. 774-779, Oakland, CA, EUA, 25 a 29 de Agosto de 2001.
- GEIPOT, 1983, *Estudo de demanda por transporte de carga*. Brasília, Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes.
- HAMACHER, H. W., LABBÉ, M., NICKEL, S., SONNEBORN, T., 2004, "Adapting polyhedral properties from facility to hub location problems". *Discrete Applied Mathematics*, v. 145, pp. 104-116.
- HORNER, M. W., O'KELLY, M. E., 2001, "Embedding economies of scale concepts for hub network design". *Journal of Transport Geography*, v. 9, pp. 255-265.
- IMS, 2007. NETHS of Institute of Mechatronic Systems. Disponível em:  
<<http://www.ims.zhwin.ch/typo3temp/pics/4a2de562ce.jpg>>. Acessado em: 11 ago. 2007, 12:13:21.
- JONG, G., 2000, "Value of Freight Travel-Time Savings". In: Hensher, D. A., Button,

- K. J. (eds), *Handbook of Transport Modelling*, 1 ed., chapter 34, New York, USA, Pergamon - Elsevier Science.
- KARA, B. Y., TANSEL, B. C., 2000, "On the single-assignment p-hub center problem". *European Journal of Operational Research*, v. 125, pp. 648-655.
- KARA, B. Y., TANSEL, B. C., 2003, "The single-assignment hub covering problem: Models and linearizations". *Journal of the Operational Research Society*, v. 54, pp. 59-64.
- KLINCEWICZ, J. G., 1996, "A dual algorithm for the Uncapacitated Hub Location Problem". *Location Science*, v. 4, n. 3, pp. 173-184.
- KLINCEWICZ, J. G., 2002, "Enumeration and Search Procedures for a Hub Location Problem with Economies of Scale". *Annals of Operations Research*, v. 110, pp. 107-122.
- LABBÉ, M., YAMAN, H., GOURDIN, E., 2005, "A branch and cut algorithm for hub location problems with single assignment". *Mathematical Programming A*, v. 102, pp. 371-405.
- LIEBERT, P., 2008, "Frota paulistana próxima de seis milhões." O Estado de São Paulo. Disponível em:  
<[http://blog.estadao.com.br/blog/media/Congestionamento\\_02.jpg](http://blog.estadao.com.br/blog/media/Congestionamento_02.jpg)>. Acessado em: 14 jul. 2008, 09:43:38.
- LOG-IN, 2008. Serviço Atlântico Sul da Log-In Logística Intermodal. Disponível em:  
<[http://www.loginlogistica.com.br/html/mod\\_cabotagem.asp](http://www.loginlogistica.com.br/html/mod_cabotagem.asp)>. Acessado em: 12 nov. 2008, 14:52:09.
- MARÍN, A., 2005, "Formulating and solving Capacitated Multiple Allocation Hub Location Problem". *Computers & OR*, v. 32, pp. 3093-3109.
- MARÍN, A., CÁNOVAS, L., LANDETE, M., 2006, "New formulations for the uncapacitated multiple allocation hub location problem". *European Journal of Operational Research*, v. 172, pp. 274-292.
- MAYER, G., WAGNER, B., 2002, "Hub Locator: An exact solution method for the Multiple Allocation Hub Location Problem". *Computers & Operations Research*, v. 29, pp. 715-739.
- MILLER, H. J. e SHAW, S.-L., 2001, *Geographic Information Systems for Transportation*. 1 ed. New York, Oxford University Press.
- MONTENEGRO, L. C. S., 2006, *Diretrizes para o Entendimento do Transporte Multimodal no Brasil*. Dissertação de Especialização, NCE/UFRJ, Rio de Janeiro,

RJ, Brasil.

- MULLER, G., 1995, *Intermodal Freight Transportation*. 3 ed. Lansdowne (EUA), Eno Transportation Foundation Inc..
- NOVAES, A. G., 1986, *Sistemas de Transportes - Volume 1- Análise da Demanda*. 1 ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda.
- O'KELLY, M. E., 1987, "A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities". *European Journal of Operational Research*, v. 32, pp. 393-404.
- O'KELLY, M. E., 1992, "Hub facility location with fixed costs". *Papers in Regional Science*, v. 71, pp. 293-306.
- O'KELLY, M. E., BRYAN, D., SKORIN-KAPOV, D., SKORIN-KAPOV, J., 1996, "Hub network design with single and multiple allocation: A Computational study". *Location Science*, v. 4, n. 3, pp. 125-138.
- O'KELLY, M. E., BRYAN, D., 1998, "Hub location with flow economies of scale". *Transportation Research B*, v. 32, n. 8, pp. 605-616.
- O'KELLY, M. E., BRYAN, D., 2002, "Interfacility interaction in models of hub and spoke networks". *Journal of Regional Science*, v. 42, n. 1, pp. 145-164.
- O'KELLY, M. E., MILLER, H. J., 1994, "The hub network design problem". *Journal of Transport Geography*, v. 2, pp. 31-40.
- ORTÚZAR, J. D., WILLUMSEN, L. G., 1995, *Modelling Transport*. 1 ed. West Sussex (Inglaterra), John Wiley & Sons Ltd.
- PERRET, R., BORGES, M.R.S., SANTORO, F.M., 2004, "Applying Group Storytelling in Knowledge Management". *Lecture Notes in Computer Science*, v. 3198, pp. 34-41.
- SKORIN-KAPOV, D., SKORIN-KAPOV, J., O'KELLY, M., 1996, "Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problem". *European Journal of Operational Research*, v. 94, pp. 582-593.
- RACUNICA, I., WYNTER, L., 2005, "Optimal location of intermodal freight hubs". *Transportation Research Part B*, v. 39, pp. 453-477.
- RODRÍGUEZ-MARTÍN, I., SALAZAR-GONZÁLEZ, J. J., 2008, "Solving a capacitated hub location problem". *European Journal of Operational Research*, v. 184, pp. 468-479.
- SIFRECA, 2007, Sistema de Informações de Fretes, ESALQ, USP. Disponível em: <<http://sifreca.esalq.usp.br/sifreca/en/freighths/road/index.php>>. Acessado em: 29 nov. 2007, 15:32:49.

- SUNG, C. S., JIN, H. W., 2001, "Dual-based approach for a hub network design problem under non-restrictive policy". *European Journal of Operational Research*, v. 132, pp. 88-105.
- THOMPSON, L. S., 1994, "Assessing Energy Use in the Transport Sector". *OECD Conference on Clean Transport*. World Bank, Cidade do México, 1994.
- TOPCUOGLUA, H., CORUTA, F., ERMISB, M., YILMAZA, G., 2005, "Solving the uncapacitated hub location problem using Genetic Algorithms". *Computers & Operations Research*, v. 32, pp. 967-984.
- TRIPLECROWN, 2007. Bi-Modal Transportation Triple Crown Services. Disponível em: < <http://www.triplecrownsvc.com/Bimodal.html>>. Acessado em: 03 out. 2007, 17:54:23.
- UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development). 1996, *Multimodal Transport Handbook for Officials and Practitioners*. 1 ed. Nova York, United Nations Ed..
- WAGNER, B., 2007, "An exact solution procedure for a cluster hub location problem". *European Journal of Operational Research*, v. 178, pp. 391-401.
- ZUIDWIJK, A. Z., 2002, *Multimodal Transport Perspective*. Research Report, IMMTA (International Multimodal Transport Association), Geneva.

## ANEXO 1 - Macro ParesODContribuintesNasContagensDeTrafego.RSC

```
//=====
Macro 'ParesODContribuintesNasContagensDeTrafego'
// Ambiente de Programação TRANSCAD 4.5 (CALLIPER)
//=====

// Para cada um dos 120 postos de contagem de trafego, esta macro identifica os pares
// OD cujos fluxos passam pelo posto (em ambos sentidos). Referido no item 5.4.3.

curr_layer = GetLayer()

line_layer = "LINKS_MULTIMODAL"
node_layer = "No_MULTIMODAL"

SetLayer(line_layer)

linkflds = { {"DISTANCIA", line_layer+".DISTANCIA",
              line_layer+".DISTANCIA"} }

shared net

net =
  CreateNetwork("Rodoviario",GetTempFileName("*.net"),"Network",linkflds,,)

SetLayer(curr_layer)

CountStationNumber = 127

// LINKS ONDE INSTALARAM-SE POSTOS DE CONTAGEM DE TRÁFEGO
dim CountStationLink[CountStationNumber]
CountStationLink = { 111339, 111334, 110126, 112190, 110144, 109170, 108223,
                    108980, 107933, 108602, 108869,
                    110482}
CountStationLink = InsertArrayElements(CountStationLink,
    CountStationLink.length+1, { 110542, 110450, 109969, 109920, 112566,
    109970, 111045, 111112, 111145, 110941, 111629, 111192})
CountStationLink = InsertArrayElements(CountStationLink,
    CountStationLink.length+1, { 110745, 110707, 110675, 110649, 110723,
    100980, 104882, 104998, 104471, 103220, 105155, 104942})
CountStationLink = InsertArrayElements(CountStationLink,
    CountStationLink.length+1, { 104494, 104519, 103244, 103976, 104421,
    111823, 103226, 103243, 104938, 104830, 104215, 111539})
CountStationLink = InsertArrayElements(CountStationLink,
    CountStationLink.length+1, { 111546, 100721, 100602, 111231, 111249,
    111232, 110621, 112154, 110232, 110138, 110193, 110156})
CountStationLink = InsertArrayElements(CountStationLink,
    CountStationLink.length+1, { 110214, 110610, 110458, 110415, 110600,
    106143, 105729, 105227, 106340, 106577, 105918, 105675})
```

```

CountStationLink = InsertArrayElements(CountStationLink,
    CountStationLink.length+1, {109834, 109875, 109638, 111863, 109855,
    112131, 110236, 110234, 112115, 111367, 99689, 99733})
CountStationLink = InsertArrayElements(CountStationLink,
    CountStationLink.length+1, {98870, 99587, 99489, 98644, 98837,
    99413, 98646, 105923, 105874, 105571, 47600, 105200, 105242})
CountStationLink = InsertArrayElements(CountStationLink,
    CountStationLink.length+1, {105180, 106276, 105181, 110049, 110076,
    104015, 101792, 101184, 103032, 110664, 110887, 110976})
CountStationLink = InsertArrayElements(CountStationLink,
    CountStationLink.length+1, {110635, 111210, 100735, 111739, 103476,
    103591, 112486, 111545, 106322, 106580, 101988, 106242})
CountStationLink = InsertArrayElements(CountStationLink,
    CountStationLink.length+1, {105764, 105990, 105825, 105220, 105314,
    99024})

// Esta rotina lê os centroides da rede e verifica se alguns não estão conectados aos
// arcos
Centroides = OpenFile("C:\\Temp\\Dutra\\Add_Ins\\CentroidesDaRedeMM.txt", "r")
Centr = ReadArray(Centroides)
CloseFile(Centroides)
for kk = 1 to Centr.length do
    mm = 0
    bool1=false
    while mm <> NetworkNodes(net) and bool1=false do
        mm = mm + 1
        if S2I(Centr[kk])=NetworkNodeID(net, mm) then bool1=true
    end // while
    if bool1=false then Centr = ExcludeArrayElements(Centr, kk, 1)
end // kk

//The final results will be written in TrafficCountsContributingODs.txt
dim Result[CountStationNumber*2]
for pp = 1 to CountStationNumber do
    Result[pp] =
    OpenFile("C:\\Temp\\Dutra\\Add_Ins\\CountStationLinks\\"+I2S(CountStationLink[pp]
    )+".txt", "a")
    Result[pp+CountStationNumber] =
    OpenFile("C:\\Temp\\Dutra\\Add_Ins\\CountStationLinks\\"+I2S(CountStationLink[pp]
    )+"b.txt", "a")
end // pp

//ROTINA PRINCIPAL DO PROGRAMA
n_nodes = Centr.length

for i = 1 to n_nodes do
    node_i = S2I(Centr[i])
    for j = 1 to i-1 do
        node_j = S2I(Centr[j])

```

```

// Calculate the shortest path between two points using the first network
// field (DISTANCIA). Only do this if the two nodes are not the same,
// otherwise, network_distance = 0.
// Also, gather the list of link IDs and directions that form the best network
// path.
if node_i <> node_j then do
  sp = ShortestPath(net, {node_i, node_j}, 1, )
  network_distance = sp[1]
  links = sp[2]
  directions = sp[3]
  for k = 1 to links.length do
    m = 0
    while m <> CountStationLink.length do
      m = m + 1
      if links[k] = CountStationLink[m] then do
        if directions[k] = 0 then do
          WriteLine(Result[m], I2S(node_i)+" "+I2S(node_j))
          WriteLine(Result[m+CountStationNumber],
                    I2S(node_j)+" "+I2S(node_i))
        end // if
      else do
        WriteLine(Result[m+CountStationNumber],
                  I2S(node_i)+" "+I2S(node_j))
        WriteLine(Result[m], I2S(node_j)+" "+I2S(node_i))
      end // else
      m = CountStationLink.length
    end // if
  end // m loop
end // end k loop
end // if
//else network_distance = 0
end // end j loop
end // end i loop

for qq = 1 to CountStationNumber*2 do
  CloseFile(Result[qq])
end // qq

//=====
endMacro
//=====

```

## ANEXO 2 – Programa GeracaoMatrizOD.MOS

```
!=====
! GeracaoMatrizOD.mos
! Ambiente de Desenvolvimento XPRESS-IVE (LINGUAGEM MOSEL)
!=====
! Este programa tentou implementar o algoritmo do método de Maximização da
! Entropia para geração de uma matriz origem-destino de fluxos de carga. Referido no
! item 5.4.4.

model GeneratingODMatrix

uses "mmxprs"
uses "mmive"

parameters
  path="
end-parameters

forward procedure Read_Data

declarations
  Centr: set of integer
  SDem: array(integer,integer) of real           ! Demand seed matrix tij
  RDem: array(Centr,Centr) of mpvar             ! Demand real matrix Tij
  P: array(integer,integer,integer) of integer
  CtStLkCode: array(integer) of string
  LinkCount: array(integer) of real
  CtStLkNumber: integer
  SmallDemand: real
  r: integer
  s: integer
end-declarations

Read_Data

forall(i in Centr, j in Centr) create(RDem(i,j))

!Funcao Objetivo
MinusEntropy:=sum(i in Centr, j in Centr) RDem(i,j)*(ln(RDem(i,j)/SDem(i,j))-1)

!Constraint:
forall(a in 1..2*CtStLkNumber) LinkCountCtr(a):= sum(i in Centr, j in Centr|
exists(P(a,i,j))) RDem(i,j) = LinkCount(a)

!Constraint: RDem >= 0
forall(a in 1..2*CtStLkNumber) LinkCountCtr(a):= sum(i in Centr, j in Centr|
exists(P(a,i,j))) RDem(i,j) = LinkCount(a)
```



```

writeln("Begin running model!")

minimize(MinusEntropy)

writeln("Fim do Modelo!")

! Print_Sol

!-----
procedure Read_Data

CtStLkNumber := 127
SmallDemand := 0.001

! Leitura de contagem de tráfego
fopen(path+"Counts.dat",F_INPUT)
    ! writeln("IO Status = ",getparam("IOSTATUS"))
    ! if (getparam("IOSTATUS")=0) then forall(a in 1..CtStLkNumber) do
forall(a in 1..CtStLkNumber) do
    read(CtStLkCode(a))
    CtStLkCode(a+CtStLkNumber):=CtStLkCode(a)+"b"
    read(LinkCount(a))
    read(LinkCount(a+CtStLkNumber))
end-do
fclose(F_INPUT)

! Leitura dos pares OD
forall(a in 1..2*CtStLkNumber) do
fopen(path+CtStLkCode(a)+".dat",F_INPUT)
r:=0
s:=0
while(not iseof) do
    r:=r+1
    s:=s+1
    read(r)
    read(s)
    P(a,r,s):=1
end-do
fclose(F_INPUT)
end-do

! Leitura dos Centroides
initializations from 'ODCentroids.dat'
end-initializations
(!fopen(path+"ODCentroids.dat",F_INPUT)
i:=0
while(not iseof) do
    i:=i+1
    read(Centr(i))
end-do

```

```

close(F_INPUT)
CentrNumber = XPRMgetarrsize(Centr); !)

! Inicia Matriz Semente
forall(i in Centr, j in Centr) do
  SDem(i,j):= SmallDemand
end-do
fopen(path+"DemandSeedMatrix.dat",F_INPUT)
while(not iseof) do
  read(r) ! Origem
  read(s) ! Destino
  read(SDem(r,s))
end-do
fclose(F_INPUT)

!finalize(P); finalize(CtStLkCode); finalize(LinkCount); finalize(SDem)
!Contents cannot be modified any more

end-procedure

!-----
(! procedure Print_Sol
writeln
writeln("Maxima economia de recursos: R$ ", getobjval)
writeln
write("Novos Hubs Instalados:")
forall(i in pothub) write(if(getsol(Open(i))=1, " "+i, ""))
writeln
writeln
writeln("Novos caminhos em uso:")
forall(i in term, j in term, k in hub, m in hub) do
  if (getsol(Flow(i,j,k,m))=1) then
    writeln("From ",i," to ",j," by hubs ",k," and ",m," (",RSav(i,j,k,m),").")
!Modified
  end-if
end-do
end-procedure !)

end-model

```

### ANEXO 3 - Macro ODMatrix\_1.M

```
%=====
%   ODMatrix_1.m
%   Ambiente de Desenvolvimento MATLAB 7.2
%=====
% Este programa implementou um algoritmo do método de Maximização da
% Entropia para geração de uma matriz origem-destino de fluxos de carga, mas não
% houve convergência na solução do sistema de equações não lineares (base do
% método). Referido no item 5.4.4.

% Leitura das contagens de tráfego em ambas as direções de cada posto
fid = fopen('Counts2.dat', 'r');
    Counts = fscanf(fid, '%d %f %f', [3 inf]);
fclose(fid);
CtStLkCode = zeros(size(Counts,2), 'int32');
CountVol = zeros(2*size(Counts,2), 'double');
for i=1:size(Counts,2)
    CtStLkCode(i)=Counts(1,i);
    CountVol(i)=Counts(2,i);
    CountVol(i+size(Counts,2))=Counts(3,i);
end

% Definição de códigos para os centroides
fid = fopen('ODCentroids.dat', 'r');
    ODC = fscanf(fid, '%d', inf);
fclose(fid);
for i=1:length(ODC)
    CentrCode(ODC(i))=i;
end

% Leitura da matriz demanda de referência
fid = fopen('DemandSeedMatrix.dat', 'r');
    Seed = fscanf(fid, '%d %d %f', [3 inf]);
fclose(fid);
t = zeros(length(ODC),length(ODC),'double');
for i=1:length(ODC)
    for j=1:length(ODC)
        t(i,j)=0.001; %evitando zeros na matriz por meio de números muito baixos
    end
end
for i=1:size(Seed,2)
    t(CentrCode(Seed(1,i)),CentrCode(Seed(2,i))) = Seed(3,i);
end

% Definindo os pares OD ("ij") que contribuem em cada contagem de tráfego "a"
P = zeros(2*size(Counts,2),length(ODC),length(ODC),'int8');
for a=1:size(Counts,2)
```

```

file = [int2str(CtStLkCode(a)), '.txt'];
fid = fopen(file, 'r');
    PCentr = fscanf(fid, '%d %d', [2 inf]);
fclose(fid);
for i=1:size(PCentr,2)
    P(a,CentrCode(PCentr(1,i)),CentrCode(PCentr(2,i)))=1;

P(a+size(Counts,2),CentrCode(PCentr(2,i)),CentrCode(PCentr(1,i)))=1;% direção
                                                                    % oposta

end
PCentr(:,i) = [];end

% Resolvendo o sistema de equações não-lineares
cc=0;
x0 = ones(1,2*size(Counts,2)) + rand(1,2*size(Counts,2));
[B,fval,exitflag]
fsolve(@(x)ConstraintFun(x,size(Counts,2),length(ODC),CountVol,t,P),x0);
while exitflag == -2 && cc < 1
    cc = cc + 1;
    x0 = ones(1,2*size(Counts,2)) + rand(1,2*size(Counts,2));
    [B,fval,exitflag] =
    fsolve(@(x)ConstraintFun(x,size(Counts,2),length(ODC),CountVol,t,P),x0);
end
disp(exitflag);
disp(cc);

% Construindo a matriz resultante
% T = zeros(length(ODC),length(ODC),'double');
% for i = 1:length(ODC)
%     for j = 1:length(ODC)
%         T(i,j) = t(i,j);
%         for d = 1:2*size(Counts,2)
%             if P(d,i,j) == 1
%                 T(i,j) = T(i,j) * B(d);
%             end
%         end
%     end
% end
% end

save('ODResult2.txt','t','-ASCII');

function F = ConstraintFun(x,CtStNr,CentrNr,CtVol,OD,Pr)
F = zeros(2*CtStNr, 1, 'double');
for b=1:2*CtStNr
    F(b) = -1 * CtVol(b);
    for i = 1:CentrNr
        for j = 1:CentrNr
            Prod = OD(i,j) * Pr(b,i,j);
            if Prod ~= 0
                for c = 1:2*CtStNr

```

```
    %Prod = Prod * (x(c)^Pr(c,i,j));
    if Pr(c,i,j) == 1
        Prod = Prod * x(c);
    end
end
F(b) = F(b) + Prod;
end
end
end
end
```

## ANEXO 4 – Macro ODMatrix\_2.m

```
%=====
% ODMatrix_2.m
% Ambiente de Desenvolvimento MATLAB 7.2
%=====
% Este programa implementou o Algoritmo Multi-Proporcional de Furness que,
% finalmente conseguiu gerar a matriz origem-destino de fluxos de carga para o estudo
% de caso desta pesquisa. Referido no item 5.4.4.

% Leitura das contagens de tráfego em ambas as direções de cada posto
fid = fopen('Counts2.dat', 'r');
Counts = fscanf(fid, '%d %f %f', [3 inf]);
fclose(fid);
CtStLkCode = zeros(size(Counts,2), 'int32');
CountVol = zeros(2*size(Counts,2), 'double');
for i=1:size(Counts,2)
    CtStLkCode(i)=Counts(1,i);
    CountVol(i)=Counts(2,i);
    CountVol(i+size(Counts,2))=Counts(3,i);
end

% Definição de códigos para os centroides
fid = fopen('ODCentroids.dat', 'r');
ODC = fscanf(fid, '%d', inf);
fclose(fid);
for i=1:length(ODC)
    CentrCode(ODC(i))=i;
end

% Leitura da matriz demanda de referência
fid = fopen('DemandSeedMatrix.dat', 'r');
Seed = fscanf(fid, '%d %d %f', [3 inf]);
fclose(fid);
t = zeros(length(ODC),length(ODC),'double');
for i=1:length(ODC)
    for j=1:length(ODC)
        t(i,j)=0.001; %evitando zeros na matriz por meio de números muito baixos
    end
end
for i=1:size(Seed,2)
    t(CentrCode(Seed(1,i)),CentrCode(Seed(2,i))) = Seed(3,i);
end

% Definindo os pares OD ("ij") que contribuem em cada contagem de tráfego "a"
P = zeros(2*size(Counts,2),length(ODC),length(ODC),'int8');
for a=1:size(Counts,2)
```

```

file = [int2str(CtStLkCode(a)), '.txt'];
fid = fopen(file, 'r');
    PCentr = fscanf(fid, '%d %d', [2 inf]);
fclose(fid);
for i=1:size(PCentr,2)
    P(a,CentrCode(PCentr(1,i)),CentrCode(PCentr(2,i)))=1;

P(a+size(Counts,2),CentrCode(PCentr(2,i)),CentrCode(PCentr(1,i)))=1;% direção
                                                                    % oposta

end
PCentr(:,i) = [];end

% Solução pelo Algoritmo Multi-Proporcional de Furness
Tol = 0;    NoI = 0;
while NoI < 6000 && Tol == 0
    Tol = 1;
    NoI = NoI + 1;
    disp(NoI);
    for b=1:2*size(Counts,2)
        TempCountVol = 0;% variavel temporaria - conta o volume de fluxo para cada
link b
        for i = 1:length(ODC)
            for j = 1:length(ODC)
                if P(b,i,j) == 1
                    TempCountVol = TempCountVol + t(i,j);
                end
            end
        end
        %disp(CountVol(b));
        Correct = CountVol(b) / TempCountVol;
        if Correct > 1.005 || Correct < 0.995 % 0,5% de precisao
            Tol = 0;
            disp(b);
            disp(Correct);
        end
        for i = 1:length(ODC)
            for j = 1:length(ODC)
                if P(b,i,j) == 1
                    t(i,j) = t(i,j) * Correct;
                end
            end
        end
    end
end
disp(NoI);

% Construindo a matriz resultante
save('ODResult2.txt','t','-ASCII');

```

## ANEXO 5 – Macro Temp&ValoresFreteDosParesOD\_Cabot2.RSC

```
//=====
Macro 'Temp&ValoresFreteDosParesOD_Cabot2'
//=====

// Esta macro calcula os tempos e valores de fretes unimodais e multimodais.
// Referido no item 5.5.1.

//=====
// DADOS INICIAIS
//=====
//
NrPrt = 10
dim Ports[NrPrt]
// Escalas dos portos:
// Manaus, Pecem, Suape, Maceio, Salvador, Vitoria, Itaguai, Santos, SFdoSul,RGrande
// Define array de códigos dos centroides dos portos
Ports = { 43352, 98652, 99005, 100585, 98963, 98988, 99067, 99130, 100594, 99883 }

Deadline = 0.5 // Tempo minimo de antecedencia ao ETA ("estimated
// time of arrival"), para entrega da carga no porto de origem

TempParaRetiradaCarg = 1 // Tempo considerado medio para o destinatário
// conseguir retirar a carga no porto de destino
// apos o ETA no destino

// Dimensiona Arrays
dim ODTT[NrPrt]
dim ODTTc[NrPrt]
dim ODFV[NrPrt]
for i = 1 to NrPrt do
    dim tmp1[NrPrt]
    dim tmp2[NrPrt]
    dim tmp3[NrPrt]
    ODTT[i] = tmp1
    ODTTc[i] = tmp2
    ODFV[i] = tmp3
end
for i = 1 to NrPrt do
    for j = 1 to NrPrt do
        ODTT[i][j] = 0 // Tempo de tráfego entre cada par de portos (ij) em dias
        ODTTc[i][j] = 0 // Numero de viagens por mes entre cada par de portos
    end
end

// ODFV[i][j] Valor de frete (R$/t) entre cada par de portos ij

ODFV[1] = { 0.0000, 78.4386, 100.4977, 100.4977, 0.0000, 160.7963,
```



```

                                251.0615,200.6299, 251.0615, 381.8912 }
ODFV[2] = { 0.0000, 0.0000, 143.4123, 0.0000, 0.0000, 0.0000, 244.9917,
                                171.4942, 244.9917, 0.0000 }
ODFV[3] = { 115.5188, 25.6708, 0.0000, 59.1866, 169.1046, 108.3307, 182.4379,
                                150.2429, 182.4379, 276.0714 }
ODFV[4] = { 114.0299, 0.0000, 20, 0.0000, 128.3454, 141.1799, 0.0000,
                                152.0399, 162.8999, 271.4998 }
ODFV[5] = { 0.0000, 0.0000, 90.9106, 100.0016, 0.0000, 0.0000, 0.0000,
                                89.8299, 0.0000, 0.0000 }
ODFV[6] = { 149.9024, 69.1857, 46.1238, 34.5929, 0.0000, 0.0000, 0.0000,
                                101.2790, 97.3210, 207.6182 }
ODFV[7] = { 0.0000, 73.8813, 52.7724, 0.0000, 0.0000, 20, 0.0000, 0.0000,
                                0.0000, 0.0000 }
ODFV[8] = { 184.9061, 0.0000, 74.7329, 90.1828, 0.0000, 24.6541, 0.0000,
                                0.0000, 113.1564, 167.2027 }
ODFV[9] = { 164.3411, 87.0041, 69.9313, 67.6699, 0.0000, 33.7471, 20, 20,
                                0.0000, 97.9084 }
ODFV[10] = { 324.5880, 0.0000, 181.4160, 194.6903, 0.0000, 141.1252,
                                0.0000, 125.5114, 97.2863, 0.0000 }

```

```
// Linhas de Cabotagem
```

```
NrLinhas = 6
```

```
dim TCiclo[NrLinhas] // Tempo de Ciclo
dim NrEsc[NrLinhas] // Número de Escalas
dim NrNv[NrLinhas] // Número de Navios
```

```
dim Esc[NrLinhas]
dim Lim[NrLinhas]
dim Temp[NrLinhas]
for i = 1 to NrLinhas do
    dim tmp1[4*NrPrt]
    dim tmp2[2*NrPrt]
    dim tmp3[4*NrPrt]
    Esc[i] = tmp1
    Lim[i] = tmp2
    Temp[i] = tmp3
end
```

```
// LINHA 1 (LOG-IN)
```

```
TCiclo[1] = 30 // 01 Log-In Manaus e Frotabelem (Sv Amazonas)
NrEsc[1] = 4
NrNv[1] = 2
Esc[1] = { 3, 8, 9, 10, 3, 8, 9, 10 } // escalas referentes a 2 ciclos da linha
Lim[1] = { 10, 10, 10, 3 } // Para cada porto de origem, estabelece-se o porto
// mais distante na rota que pode servir de destino
// do primeiro.
Temp[1] = { 0, 7, 11, 17, 30, 37, 41, 47 } // tempo em dias baseado no ETA
(inclui-se
```

```

//                                uma estimativa de atrasos do ataque)
//      0 7 4 9 11
//      0 7 4 6 14  Linhas de comentarios com apenas números são os intervalos
//      0 5 5 7 12  entre dois ETA consecutivos medidos no respectivo "time
//      0 8 5 3 14  table" (referentes a algumas viagens realizadas),cujas médias
//                                foram utilizadas para definir o array Temp(1,:).

// LINHA 2 (LOG-IN)
TCiclo[2] = 27           // 02 Frotario, Log-In Amazonia, Frotasantos e Log-In Pantanal
NrEsc[2] = 9            // (Sv Atlantico Sul)
NrNv[2] = 4
Esc[2] = { 1, 2, 3, 8, 9, 7, 6, 3, 2 } // EXCECAO ESTE CASO, em que não se
//                                repetiu o ciclo
//                                de escalas, pq o limite é a segunda esc. no
//                                porto 2, já que depois deste há um trecho pelo
//                                Mercosul. Por isso o tempo desse ciclo não bate
//                                com a sequencia de Temp(i).
Lim[2] = { 7, 7, 7, 9, 2, 2, 2, 2, 2 } // Para cada porto de origem, estabelece-se ...
Temp[2] = { 0, 2, 5, 9, 12, 14, 15, 19, 21 }

// LINHA 3 (MERCOSUL LINE)
TCiclo[3] = 33          // 03 Mercosul Manaus e Nedloid Liefde
NrEsc[3] = 7
NrNv[3] = 2
Esc[3] = { 10, 9, 8, 3, 2, 3, 8, 10, 9, 8, 3, 2, 3, 8 }
//                                // escalas (2 ciclos linha) Obs: trocou-se Paranag. por SF do Sul.
Lim[3] = { 2, 2, 2, 2, 10, 10, 10 }
Temp[3] = { 0, 9, 11, 15, 17, 19, 27, 33, 42, 44, 48, 50, 52, 60 }

// LINHA 4 (ALIANCA)
TCiclo[4] = 42          // 04 Alianca Brasil Cabotagem - Sling 1
NrEsc[4] = 13
NrNv[4] = 6
Esc[4] = { 10, 9, 8, 6, 4, 3, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 9, 8, 6, 4, 3, 1, 2, 3, 4, 6,
8, 9 } //Obs: trocou-se Paranag. por SF do Sul.
Lim[4] = { 1, 1, 1, 1, 1, 1, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10 }

Temp[4] = { 0, 6, 8, 10, 13, 14, 23, 25, 27, 28, 31, 34, 36, 42, 48, 50, 52, 55, 56, 65,
67, 69, 70, 73, 76, 78 }

// LINHA 5 (ALIANCA)
TCiclo[5] = 28          // 05 Alianca Brasil Cabotagem - Sling 2
NrEsc[5] = 5
NrNv[5] = 2
Esc[5] = { 3, 4, 6, 8, 10, 3, 4, 6, 8, 10 } // % escalas (2 ciclos linha)
Lim[5] = { 10, 10, 10, 10, 3 }
Temp[5] = { 0, 3, 7, 9, 17, 28, 31, 35, 37, 45 }

// LINHA 6 (ALIANCA)

```

```

TCiclo[6] = 14          // 06 Alianca Brasil Cabotagem - Sling 3
NrEsc[6] = 4
NrNv[6] = 2
Esc[6] = { 3, 4, 5, 8, 3, 4, 5, 8 } // escalas referentes a 2 ciclos da linha
Lim[6] = { 8, 8, 4, 4 } // Para cada porto de origem, ...
Temp[6] = { 0, 1, 4, 7, 14, 15, 18, 21 }

//=====
// GERACAO DA MATRIZ ODTT
// (tempo médio de espera para embarque + tempo médio de trânsito de cabotagem)
//=====

for i = 1 to NrLinhas do
  for j = 1 to NrEsc[i] do
    k = j
    while Esc[i][k] <> Lim[i][j] do
      k = k + 1
      Repeat = 0
      for m = j+1 to k-1 do
        if Esc[i][m] = Esc[i][k] then Repeat = 1
      end
      if Repeat = 0 then do
        ODTT[Esc[i][j]][Esc[i][k]] = ODTT[Esc[i][j]][Esc[i][k]] +
(NrNv[i]*30/TCiclo[i]) * (Temp[i][k] - Temp[i][j])
        ODTTc[Esc[i][j]][Esc[i][k]] = ODTTc[Esc[i][j]][Esc[i][k]] +
(NrNv[i]*30/TCiclo[i])
      end
    end
  end
end
for i = 1 to NrPrt do
  for j = 1 to NrPrt do
    if ODTTc[i][j] <> 0 then do
      ODTT[i][j] = ODTT[i][j] / ODTTc[i][j]
      ODTT[i][j] = ODTT[i][j] + (30/ODTTc[i][j]) + Deadline +
TempParaRetiradaCarg
    end
  end
end

//=====
// CRIA A REDE DIGITAL E VERIFICA QUAIS CENTROIDES DA AREA DE
// INFLUENCIA ESTAO CONECTADOS A MESMA
//=====

// Save the name of the current layer.
curr_layer = GetLayer()

// Set the line and node layer variables.
line_layer = "LINKS_MULTIMODAL"

```

```

node_layer = "No_MULTIMODAL"

// Set the current layer to the line layer.
SetLayer(line_layer)

// Define the fields in the network as length. The first element in the array is the
// field name you assign in the network. The second and third elements are the field
// names in the highway database in the forward and reverse directions.
linkflds = {"Length", line_layer+".Length", line_layer+".Length"},
           {"TMP_ADV", line_layer+".TMP_ADV", line_layer+".TMP_ADV"}}

// Share the network as you will need it in other macros in this file.
shared net

// Create the network and assign a temporary name to the network.
net = CreateNetwork("RodoviarioSemMercosul",GetTempFileName("*.net"),
                  "Network",linkflds,,)

// Calculate the travel time by the shortest path (using skims).
ChangeNetworkSettings(net,{ {"Use Skims", "True"}, {"Skim Settings",
                                                    {"TMP_ADV", "ALL"}} })

// Restore the current layer.
SetLayer(curr_layer)

//Read the centroids' file and verifies if some centroid are not connected to the net
Centroids = OpenFile("C:\\Dutra\\5_FuncaoDivModal\\
                    1_AreasInfluenDasAtuaisEscalasDaCabotagem\\ODCentroids.dat", "r")
Centr = ReadArray(Centroids)
CloseFile(Centroids)
for kk = 1 to Centr.length do
  mm = 0
  bool1="False"
  while mm <> NetworkNodes(net) & NOT bool1 do
    mm = mm + 1
    if S2I(Centr[kk])=NetworkNodeID(net, mm) then bool1="True"
  end // while
  if NOT bool1 then Centr = ExcludeArrayElements(Centr, kk, 1)
end // kk

// Reads the influence areas points and verifies which of them are
// micro-region's centroids
PontosAreaInfluen = OpenFile("C:\\Dutra\\5_FuncaoDivModal\\
                             1_AreasInfluenDasAtuaisEscalasDaCabotagem\\
                             PontosAreaInfluenCabotag.txt", "r")
CentrArInflu = ReadArray(PontosAreaInfluen)
CloseFile(PontosAreaInfluen)
kk = 1
NrPts = CentrArInflu.length
while kk <> (NrPts+1) do

```

```

mm = 0
bool1 = "False"
while mm <> Centr.length & NOT bool1 do
  mm = mm + 1
  if S2I(CentrArInflu[kk])=S2I(Centr[mm]) then do
    bool1 = "True"
    kk = kk + 1
  end // if
end // while
if NOT bool1 then do
  CentrArInflu = ExcludeArrayElements(CentrArInflu, kk, 1)
  NrPts = NrPts - 1
end // if
end // kk

//=====
// ROTINA PRINCIPAL DA MACRO
//=====

NrODPairs = 0
n_nodes = CentrArInflu.length

dim A_OrigDist[NrPrt]
dim A_OrigTime[NrPrt]
dim A_DestDist[NrPrt]
dim A_DestTime[NrPrt]

dim MM_Time[n_nodes]
dim MM_FreightValue[n_nodes]
dim UM_Time[n_nodes]
dim UM_FreightValue[n_nodes]
dim OriginPort[n_nodes]
dim DestinPort[n_nodes]
for i = 1 to n_nodes do
  dim tmp1[n_nodes]
  dim tmp2[n_nodes]
  dim tmp3[n_nodes]
  dim tmp4[n_nodes]
  dim tmp5[n_nodes]
  dim tmp6[n_nodes]
  MM_Time[i] = tmp1 // Multimodal total time (days)
  MM_FreightValue[i] = tmp2 // Multimodal total freight value (R$/t.km)
  UM_Time[i] = tmp3 // Unimodal total time (days)
  UM_FreightValue[i] = tmp4 // Unimodal total freight value (R$/t.km)
  OriginPort[i] = tmp5 // Origin Port (codes vary from 1 to 10 as the array
Ports)
  DestinPort[i] = tmp6 // Destin Port (codes vary from 1 to 10 as the array
Ports)
end
end

```

```

for i=1 to n_nodes do
  for j=1 to n_nodes do
    MM_Time[i][j] = 0
    UM_Time[i][j] = 0
    MM_FreightValue[i][j] = 0
    UM_FreightValue[i][j] = 0
    OriginPort[i][j] = 0
    DestinPort[i][j] = 0
  end
end

Iteracao = 0
Result =
OpenFile("C:\\Dutra\\5_FuncaoDivModal\\3_Temp&ValoresDeFrete_Transcad\\Result
ado.txt", "a")
WriteLine(Result, "Nr of Nodes: "+I2S(n_nodes))

for i = 1 to n_nodes do
  node_i = S2I(CentrArInflu[i])
  for j = 1 to n_nodes do
    node_j = S2I(CentrArInflu[j])
    Iteracao = Iteracao + 1
    // Calculate the shortest path between two points using the first network
    // field (DISTANCIA). Only do this if the two nodes are not the same,
otherwise,
    // network_distance = 0. Also, gather the list of link IDs and directions that
    // form the best network path.
    pos_i = ArrayPosition(Ports, {node_i}, )
    pos_j = ArrayPosition(Ports, {node_j}, )
    if node_i<>node_j & pos_i=0 & pos_j=0 then do
      sp = ShortestPath(net, {node_i, node_j}, 1, )
      Road_Distance = sp[1]
      //links = sp[2]
      //directions = sp[3]
      RoadDrive_Time = sp[4]
      if Road_Distance >= 1000 then do
        for k = 1 to Ports.length do
          A_OrigDist[k]=0
          A_OrigTime[k]=0
          A_DestDist[k]=0
          A_DestTime[k]=0
        end // k
        bool3 = "False"
        bool4 = "False"
        for k = 1 to Ports.length do
          sp = ShortestPath(net, {node_i, Ports[k]}, 1, )
          if sp[1] < 400 then do
            bool3 = "True"
            A_OrigDist[k] = sp[1]
            Aux = sp[4]

```

```

        A_OrigTime[k] = Aux[1][2]/12
                                                // 12 h of driving per day
                                                // day because of stops
    end
end // k
= ShortestPath(net, {node_j, Ports[k]}, 1, )
    if sp[1] < 400 then do
        bool4 = "True"
        A_DestDist[k] = sp[1]
        Aux = sp[4]
        A_DestTime[k] = Aux[1][2]/12
    end
end // k
if bool3 & bool4 then do
    Auxiliar = 1000
    for k = 1 to Ports.length do
        if A_OrigDist[k]<>0 then do
            for m = 1 to Ports.length do
                if A_DestDist[m]<>0 & k<>m &
                    ODTT[k][m]<>0 then do
                    Ex = 3 * (1.2*A_OrigTime[k]/2) * ODTTc[k][m]/30
                        //Temp_RodoIda = 3 * (1.2*OrigTime/2)
                    ProbInfluRodoMM = 1 - (1/Pow(2.718281828459,Ex))
                        //Ex = Temp_RodoIda*ODTTc[OrigPort][DestPort]/30
                    InfluRodoMM = 3 * (1.2*A_OrigTime[k]/2) *
                        (1 - (1/Pow(2.718281828459,Ex)))
                        //ProbInfluRodoMM = 1 - (1/Pow(2.718281828459,Ex))
                    MM_Time_Aux = InfluRodoMM + ODTT[k][m] +
                        1.2*A_DestTime[m]/2
                        //InfluRodoMM = Temp_RodoIda * ProbInfluRodoMM
                    // Divide-se A_DestTime[m] por 2 pq, neste caso, não há
                    // descansos prolongados, já que são distâncias menores
                    // que 400 e ainda dá pra planejar o momento ideal de
                    // chegada ao porto. Mas acrescenta-se 20% de paradas
                    // curtas.
                    if MM_Time_Aux < Auxiliar then do
                        Auxiliar = MM_Time_Aux
                        OrigPort = k
                        DestPort = m
                        OrigTime = A_OrigTime[k]
                        OrigDist = A_OrigDist[k]
                        DestTime = A_DestTime[m]
                        DestDist = A_DestDist[m]
                    end // if
                end // if
            end // m
        end // if
    end // k
    if Auxiliar<>1000 then do

NrODPairs = NrODPairs + 1

```

```

WriteLine(Result, I2S(NrODPairs)+" "+I2S(Iteracao)+"
"+I2S(node_i)+" "+I2S(OrigPort)+" "+I2S(DestPort)+" "+I2S(node_j))

        OriginPort[i][j] = OrigPort
        DestinPort[i][j] = DestPort
        MM_Time[i][j] = Auxiliar
        FreteRodo_Orig = 2.5001 / Pow(2*OrigDist,0.4808)
        FreteRodo_Dest = 2.5001 / Pow(2*DestDist,0.4808)
        MM_FreightValue[i][j] = FreteRodo_Orig +
            FreteRodo_Dest + ODFV[OrigPort][DestPort]
        UM_Time[i][j] = RoadDrive_Time[1][2]/12 // days
        UM_FreightValue[i][j] =
            Road_Distance * 6.7484 / Pow(Road_Distance, 0.5617)
            end // if
        end // if
    end // if
end // end j loop
end // end i loop

```

```
CloseFile(Result)
```

```

MMTime =
OpenFile("C:\\Dutra\\5_FuncaoDivModal\\3_Temp&ValoresDeFrete_Transcad\\MMTime.txt", "a")
UMTime =
OpenFile("C:\\Dutra\\5_FuncaoDivModal\\3_Temp&ValoresDeFrete_Transcad\\UMTime.txt", "a")
MMFrVl =
OpenFile("C:\\Dutra\\5_FuncaoDivModal\\3_Temp&ValoresDeFrete_Transcad\\MMFrVl.txt", "a")
UMFrVl =
OpenFile("C:\\Dutra\\5_FuncaoDivModal\\3_Temp&ValoresDeFrete_Transcad\\UMFrVl.txt", "a")
OrgPrt =
OpenFile("C:\\Dutra\\5_FuncaoDivModal\\3_Temp&ValoresDeFrete_Transcad\\OrgPrt.txt", "a")
DstPrt =
OpenFile("C:\\Dutra\\5_FuncaoDivModal\\3_Temp&ValoresDeFrete_Transcad\\DstPrt.txt", "a")
CtArIf =
OpenFile("C:\\Dutra\\5_FuncaoDivModal\\3_Temp&ValoresDeFrete_Transcad\\CtArIf.txt", "a")

```

```

for i=1 to n_nodes do
    WriteArray(MMTime, MM_Time[i])
    WriteArray(UMTime, UM_Time[i])
    WriteArray(MMFrVl, MM_FreightValue[i])
    WriteArray(UMFrVl, UM_FreightValue[i])
    WriteArray(OrgPrt, OriginPort[i])

```



```
        WriteArray(DstPrt, DestinPort[i])
end
WriteArray(CtArIf, CentrArInflu)
```

```
CloseFile(MMTime)
CloseFile(UMTime)
CloseFile(MMFrV1)
CloseFile(UMFrV1)
CloseFile(OrgPrt)
CloseFile(DstPrt)
CloseFile(CtArIf)
```

```
endMacro
```



```

for i = 1:size(ODRes,1)
    for j = 1:size(ODRes,2)
        t(i,j) = ODRes(j,i);
    end
end

%Correcao da região metropolitana de Manaus
% 1. Tabela de fluxos consolidados
% Manaus(t/ano) Maritimo Hidrov.Mad. Hidrov.Amazonas
% Embarque 360000 500000 500000
% Desembarque 420000 550000 550000
% 2. Fluxos de e para Manaus (100216):
% Centroides { Fortaleza, Recife, SPaulo, Rio, Curitiba, PAlegre }
ID = [ 99352 99192 93160 98862 43264 ];
FromMAO = [ 136000 136000 544000 272000 272000 ];
ToMAO = [ 152000 152000 608000 304000 304000 ];
j = 1;
while 100216 ~= ODC(j)
    j = j + 1;
end
MAOCod = j;
disp(MAOCod);
for i = 1:length(ID)
    j = 1;
    while ID(i) ~= ODC(j)
        j = j + 1;
    end
    t(MAOCod,j) = t(MAOCod,j) + FromMAO(i);
    t(j,MAOCod) = t(j,MAOCod) + ToMAO(i);
    disp(ID(i));
    disp(j);
    disp(t(MAOCod,j));
    disp(t(j,MAOCod));
end

NrPorts = 10;

%CargFlow = [ 406081 1003995 1354519 627567 24239 402315 60547 320398
255341 367518 209375 1097134 1390450 557549 9272 145777 27913 634844 334663
415543 ];
%CargFlow = [ 406081 1003995 1354519 627567 24239 422315 60547 320398
241041 367518 205375 1097134 1390450 557549 9272 150777 27913 658444 210663
415543 ];
CargFlow = [ 406081 1003995 1354519 627567 24239 422315 59354 320398
240541 367518 205375 1126345 1412160 557549 9272 159245 27913 634844 210663
415543 ];

fid = fopen('MMTime.txt', 'r');
Aux1 = fscanf(fid, '%f', [1 inf]);
fclose(fid);

```

```

fid = fopen('UMTime.txt', 'r');
    Aux2 = fscanf(fid, '%f', [1 inf]);
fclose(fid);
fid = fopen('MMFrVl.txt', 'r');
    Aux3 = fscanf(fid, '%f', [1 inf]);
fclose(fid);
fid = fopen('UMFrVl.txt', 'r');
    Aux4 = fscanf(fid, '%f', [1 inf]);
fclose(fid);
fid = fopen('OrgPrt.txt', 'r');
    Aux5 = fscanf(fid, '%d', [1 inf]);
fclose(fid);
fid = fopen('DstPrt.txt', 'r');
    Aux6 = fscanf(fid, '%d', [1 inf]);
fclose(fid);
fid = fopen('CtArIf.txt', 'r');
    Aux7 = fscanf(fid, '%d', [1 inf]);
fclose(fid);

MM_Time = zeros(length(Aux7),length(Aux7),'double');
UM_Time = zeros(length(Aux7),length(Aux7),'double');
MM_FrVl = zeros(length(Aux7),length(Aux7),'double');
UM_FrVl = zeros(length(Aux7),length(Aux7),'double');
OrigPrt = zeros(length(Aux7),length(Aux7),'int16');
DestPrt = zeros(length(Aux7),length(Aux7),'int16');
ArInfCentr = zeros(length(Aux7),'int32');

for i=1:length(Aux7)
    ArInfCentr(i) = Aux7(1,i);
    for j=1:length(Aux7)
        Ord = (i-1)*length(Aux7)+j;
        MM_Time(i,j) = Aux1(1,Ord);
        UM_Time(i,j) = Aux2(1,Ord);
        MM_FrVl(i,j) = Aux3(1,Ord);
        UM_FrVl(i,j) = Aux4(1,Ord);
        OrigPrt(i,j) = Aux5(1,Ord);
        DestPrt(i,j) = Aux6(1,Ord);
    end
end

CorrespCentr = zeros(length(ArInfCentr), 1, 'int16');
for i=1:length(ArInfCentr)
    k = 0;
    Bool = 0;
    while k ~= length(ODC) && Bool == 0
        k = k + 1;
        if ArInfCentr(i) == ODC(k)
            Bool = 1;
            CorrespCentr(i) = k;
        end
    end
end

```

```

    end
end
disp(length(CorrespCen));

% Resolvendo o Sistema de Equacoes Nao-Lineares (PortsFlowFun.m)

function PF = PortsFlowFun(x,PortsNr,NrAICentr,PortFlow,OD,CorrespCen,UMFrVl,MMFrVl,UMTime,MMTime,OrPort,DsPort)

PF = zeros(2*PortsNr, 1, 'double');
for b = 1:2*PortsNr
    PF(b) = -1 * PortFlow(b);
end
for i = 1:NrAICentr
    for j = 1:NrAICentr
        if MMTime(i,j)~=0 && UMFrVl(i,j)>MMFrVl(i,j) &&
            MMTime(i,j)>UMTime(i,j)
            Contribution = OD(CorrespCen(i),CorrespCen(j)) / ( 1 +
                (x(OrPort(i,j))^UMFrVl(i,j)-MMFrVl(i,j))) *
                (x(OrPort(i,j)+PortsNr)^UMTime(i,j)-MMTime(i,j))) );
            PF(OrPort(i,j)) = PF(OrPort(i,j)) + Contribution;
            % Utiliza-se 0.1 do FrVl p/ evitar valores muito grandes
            PF(DsPort(i,j)+PortsNr) = PF(DsPort(i,j)+PortsNr) +
                Contribution;
        end
    end
end
end

cc=0;

[B,fval,exitflag] = fsolve(@(x)
PortsFlowFun(x,NrPorts,length(ArInfCentr),CargFlow,t,CorrespCen,UM_FrVl,MM_
FrVl,UM_Time,MM_Time,OrigPrt,DestPrt),x0,optimset('TolFun',36000));% optimset('
MaxFunEvals',1000000,'MaxIter',10000,'TolFun',400)

while exitflag == -2 && cc < 5
    cc = cc + 1;
    x0 = B;
    [B,fval,exitflag] = fsolve(@(x)
PortsFlowFun(x,NrPorts,length(ArInfCentr),CargFlow,t,
CorrespCen,UM_FrVl,MM_FrVl,UM_Time,MM_Time,OrigPrt,DestPrt),
x0,optimset('TolFun',36000));% optimset('MaxFunEvals',1000000,
'MaxIter',10000,'TolFun',400)
    disp(cc);
    disp(fval);
end
disp(exitflag);
SqSum = 0;
for i= 1:2*NrPorts
    SqSum = SqSum + fval(i)^2;
end

```

```
end  
disp(sqrt(SqSum));
```

## ANEXO 7 – Programa NewHubsLocation.MOS

```
!=====
! NewHubsLocation.mos
! Ambiente de Desenvolvimento XPRESS-IVE (LINGUAGEM MOSEL)
!=====
!
! Este programa implementa o MODELO FUNDAMENTAL desta pesquisa
! detalhado no item 4.3.2.

model NewHubsLocation

  uses "mmxprs"
  uses "mmive"

  parameters
    path="
  end-parameters

  forward procedure Input_Data
  forward procedure Print_Sol

!-----
! Fase 1 – Declaração de variáveis globais

declarations
  OKHub: set of integer           ! Locais onde já há hubs instalados
  PotHub: set of integer         ! Loc. onde pode ser inst. novos Hubs
  Hub: set of integer            ! OKHub U PotHub – união dos conjuntos
  InterlCentr: integer
  OpenC: array(integer) of real  ! Custo para instalação de um novo hub
  Id_AllCentr: array(integer) of integer
  Id_InterlCentr: array(integer) of integer
  C: array(integer,integer) of real ! Custo de transporte direto
  COijpq: array(integer,integer) of real ! Custo de transp. via hubs pré-existentes
  CO: array(integer,integer,integer,integer) of real !Custo de transp. via novos hubs
  NetTotalCost: real
end-declarations

!-----
! Fase 2 – Codificação dos hubs existentes e dos
! possíveis locais de instalação de novos hubs

OKHub:= { 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 12 } ! Rio Grande, S. Francisco do Sul, Santos,
                                         ! Itaguaí, Salvador, Maceió, Suape, Pecém e
                                         ! Manaus
PotHub:= { 5, 10, 11 }                 ! Anchieta, Belém e São Luís
Hub := { 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 }
```

```
finalize(Hub); finalize(OKHub); finalize(PotHub)
```

```
N_Hubs := getsize(Hub)  
DoubleHubs := 2 * N_Hubs
```

```
!-----  
! Fase 3 – Entrada de Dados e Cálculo dos  
!           Parâmetros  $C$ ,  $CO_{ijpq}$  e  $CO$ 
```

```
Input_Data
```

```
!-----  
! Fase 4 – Declaração das variáveis do problema  
!   a serem otimizadas:  $Flow = x_{ijkm}$   
!            $Open = y_k$ 
```

```
declarations
```

```
Flow: dynamic array(1..InterlCentr, 1..InterlCentr, Hub, Hub) of mpvar  
                                     ! Novos caminhos via hubs  
Open: array(PotHub) of mpvar          ! Novos hubs a instalar  
FlowD: dynamic array(1..InterlCentr, 1..InterlCentr) of mpvar  
      (! A variável  $FlowD(i,j)$  representa o fluxo pelo caminho direto  
      entre  $ij$  ou o o fluxo via hubs existente antes da instalação dos  
      novos hubs, isto é, o custo  $C(i,j)$  é o custo mais barato entre  
      os custos destes dois referidos caminhos.  
      Conforme se verifica na procedure Input_Data. E no caso do  
      caminho via hubs existentes, o custo é o do tipo  $C^o_{ijpq}$ . !)
```

```
end-declarations
```

```
forall(i in 1..InterlCentr, j in 1..InterlCentr | exists(C(i,j))) create(FlowD(i,j))  
      ! Ver observação a seguir  
forall(i in 1..InterlCentr, j in 1..InterlCentr, k in Hub, m in PotHub |  
      exists(CO(i,j,k,m))) create(Flow(i,j,k,m))  
forall(i in 1..InterlCentr, j in 1..InterlCentr, k in PotHub, m in OKHub |  
      exists(CO(i,j,k,m))) create(Flow(i,j,k,m))  
forall(i in 1..InterlCentr, j in 1..InterlCentr | exists(C(i,j))) FlowD(i,j) is_binary  
forall(i in 1..InterlCentr, j in 1..InterlCentr, k in Hub, m in PotHub |  
      exists(CO(i,j,k,m))) Flow(i,j,k,m) is_binary  
forall(i in 1..InterlCentr, j in 1..InterlCentr, k in PotHub, m in OKHub |  
      exists(CO(i,j,k,m))) Flow(i,j,k,m) is_binary  
      (!  $Flow(i,j,k,m)$  é declarada binária e não  
      como maior que zero por causa das características  
      específicas da instância do problema em análise,  
      em que não se considera mais de um fluxo via  
      hubs pré-existente intermediando um mesmo par  
       $ij$ , o que descarta a possibilidade da exceção  
      tratada em 4.3.2.3 !)
```

```
forall(k in PotHub) Open(k) is_binary
```



(! O objetivo principal deste programa é identificar quais hubs devem ser instalados e, para cada par  $ij$ , quais hubs devem intermediar seus fluxos  $ij$  (i. e., definir os valores das variáveis  $y(k)$  e das  $x(i,j,k,m)$  para a solução ótima do problema). Caso o valor absoluto do custo total da rede fosse de interesse desta análise, teriam que ser determinados todos os custos de transporte diretos ( $C(i,j)$ ), bem como as respectivas variáveis. Entretanto, para atingir o “objetivo principal” (referido no início desta observação), não são necessárias as variáveis referentes aos pares  $ij$  cujas limitações mostram que os fluxos do par não têm condições práticas de seguir por caminhos via hubs, já que, no processo de otimização, sabe-se que estas variáveis seriam sempre constantes, isto é, a variável de fluxo direto seria sempre igual a 1, enquanto todas as demais variáveis de fluxo via hubs seriam nulas (i. e.,  $\text{FlowD}(i,j) = 1$  e  $\text{FlowD}(i,j,k,m) = 0$  quaisquer que sejam “ $k$ ” e “ $m$ ”), de modo que não há como modificar estas variáveis para gerar uma solução de menor custo.

Portanto não foi necessário mantê-las na formulação, já que, conforme já referido, não foi interesse a determinação do custo total da rede.

Nesta aplicação, os pares cujas variáveis não foram utilizadas são aqueles em que

- o hub de origem é o mesmo que o hub de destino;
- o custo via hubs é maior que o custo do transporte direto  
( $\text{MMFrVI} > \text{UMFrVI}$ ) ou ( $\text{NewMMFrVI} > \text{NewUMFrVI}$ );
- a distância entre  $i$  e  $j$  é menor que 1000 km;
- a distância entre origem e hub da origem ou entre destino e hub do destino é maior que 400 km;
- as distâncias referidas na alínea anterior são adequadas mas não há serviço de cabotagem disponível entre os portos (hubs) de origem e destino.

A segunda e a terceira condições foram justificadas no item 5.1 (antes de 5.1.1) da tese. !)

!-----

! Fase 5 – Formulação do problema

! (função objetivo e restrições)

!Função Objetivo

HubNetCost:=sum(i in 1..InterlCentr, j in 1..InterlCentr, k in Hub, m in Hub | exists(Flow(i,j,k,m))) CO(i,j,k,m) \* Flow(i,j,k,m) +  
sum(k in PotHub) OpenC(k) \* Open(k) +  
sum(i in 1..InterlCentr, j in 1..InterlCentr | exists (FlowD(i,j))) C(i,j)\*FlowD(i,j)

!Constraints 1: para cada par  $ij$  há apenas um ou nenhum caminho via hubs  
forall(i in 1..InterlCentr, j in 1..InterlCentr | exists(FlowD(i,j))) NewPath(i,j):=  
sum(k in Hub, m in Hub|exists(Flow(i,j,k,m))) Flow(i,j,k,m) + FlowD(i,j) = 1

!Constraints 2: só pode haver novos caminhos via um hub  $k$  se este for instalado  
forall(i in 1..InterlCentr, j in 1..InterlCentr, k in PotHub) OpenHubFlow(i,j,k):=  
sum(m in Hub | exists(Flow(i,j,k,m))) Flow(i,j,k,m) + sum(m in Hub| exists(Flow(i,j,m,k))) Flow(i,j,m,k) - Open(k) <= 0

(! As restrições 13e-13j do item 4.3.2 não foram implementadas porque (na rede considerada) os *hubs* (portos) não funcionam como origem ou destino dos fluxos, sendo apenas pontos de consolidação e desconsolidação de cargas. !)

!-----

! Fase 6 – Execução da Otimização  
!           (por meio do Xpress-Optimizer)

writeln("Begin running model!")

minimize(HubNetCost)

writeln("End running model!")

!-----

! Fase 7 – Apresentação dos resultados

Print\_Sol

!=====

! Declaração das Rotinas Utilizadas (Procedures)

!=====

!-----

procedure Input\_Data

declarations

AllCentr: integer

UM\_ODPairs: integer

MM\_ODPairs: integer

OrgNode: integer

DstNode: integer

OrgPort: integer

DstPort: integer

MMPProb: real

NewMMPProb: real

Dem: array(integer,integer) of real

CorrespCentr: array(integer) of integer

MMFrVl: array(integer,integer) of real

MMTime: array(integer,integer) of real

UMFrVl: array(integer,integer) of real

UMTime: array(integer,integer) of real

OrgPrt: array(integer,integer) of integer

X: array(integer) of real

NewMMFrVl: array(integer,integer,integer,integer) of real

NewMMTime: array(integer,integer,integer,integer) of real

NewUMFrVl: array(integer,integer) of real

NewUMTime: array(integer,integer) of real

end-declarations

! LEITURA DE DADOS BÁSICOS

```
fopen(path+"BasicData.dat",F_INPUT)
writeln("IO Status = ",getparam("IOSTATUS"))
if (getparam("IOSTATUS")=0) then
  readln(AllCentr)
  readln(InterlCentr)
  readln(UM_ODPairs)
  readln(MM_ODPairs)
  forall(i in PotHub) do
    read(OpenC(i))
  writeln("OpenC(",i,") = ",OpenC(i))
  end-do
end-if
fclose(F_INPUT)
```

! LEITURA DOS CENTROIDES

```
fopen(path+"ODCentroids.dat",F_INPUT)
writeln("IO Status = ",getparam("IOSTATUS"))
if (getparam("IOSTATUS")=0) then
  forall(i in 1..AllCentr) do
    read(Id_AllCentr(i))
  end-do
end-if
fclose(F_INPUT)
writeln("The ",AllCentr,"th centroid (last one) is ",Id_AllCentr(AllCentr))
```

! LEITURA DA MATRIZ OD DE DEMANDA

```
fopen(path+"ODResult2.dat",F_INPUT)
writeln("IO Status = ",getparam("IOSTATUS"))
if (getparam("IOSTATUS")=0) then
  forall(i in 1..AllCentr) do
    forall(j in 1..AllCentr) do
      read(Dem(i,j))
    end-do
  end-do
end-if
fclose(F_INPUT)
writeln("The last OD Matrix' element is ",Dem(AllCentr,AllCentr))
```

! Corrigindo dados da matriz od para a localidade de Manaus

! 1. Manaus' In and Out Flows (t/year)

! Maritime Madeira River Amazonas River

! Load 360000 500000 500000

! Unload 420000 550000 550000

! 2. Detailed flows (from and to Manaus - 100216):

declarations

ID: array(1..5) of integer

FromMAO: array(1..5) of integer

ToMAO: array(1..5) of integer

```

        end-declarations
!   Centroides { Fortaleza, Recife, S.Paulo, Rio, Curitiba, P.Alegre }
    ID :: [ 99352, 99192, 93160, 98862, 43264 ]
        FromMAO :: [ 136000, 136000, 544000, 272000, 272000 ]
        ToMAO :: [ 152000, 152000, 608000, 304000, 304000 ]
        MAOCod := 1
    while (100216 <> Id_AllCentr(MAOCod)) do
        MAOCod += 1
    end-do
    forall(j in 1..getsize(ID)) do
        kk := 1
        while (ID(j) <> Id_AllCentr(kk)) do
            kk += 1
        end-do
        Dem(MAOCod,kk) := Dem(MAOCod,kk) + FromMAO(j)
        Dem(kk,MAOCod) := Dem(kk,MAOCod) + ToMAO(j)
        writeln("Port ",ID(j)," - ToMAO = ",Dem(kk,MAOCod)," /
                FromMAO = ",Dem(MAOCod,kk))
    end-do

! LEITURA DOS CENTROIDES DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA DOS PORTOS
fopen(path+"InterlandCentroids.dat",F_INPUT)
writeln("IO Status = ",getparam("IOSTATUS"))
if (getparam("IOSTATUS")=0) then
    forall(i in 1..InterlCentr) do
        read(Id_InterlCentr(i))
    end-do
end-if
fclose(F_INPUT)
writeln("The ",InterlCentr,"th interland centroid (last one) is
        ",Id_InterlCentr(InterlCentr))

! RELACIONA CODIGOS Id_InterlCentr(i) AOS CODIGOS Id_AllCentr(j)
forall(i in 1..InterlCentr) do
    jj := 0
    Bool := 0
    while ((jj <> AllCentr) and (Bool = 0)) do
        jj := jj + 1
        if (Id_InterlCentr(i) = Id_AllCentr(jj)) then
            Bool := 1
            CorrespCentr(i) := jj
        end-if
    end-do
end-do

! LEITURA dos Valores de Frete Multimodais
fopen(path+"MMFrVl.dat",F_INPUT)
writeln("IO Status = ",getparam("IOSTATUS"))
if (getparam("IOSTATUS")=0) then
    forall(i in 1..InterlCentr) do

```

```

        forall(j in 1..InterlCentr) do
            read(MMFrVl(i,j))
        end-do
    end-do
end-if
fclose(F_INPUT)

! LEITURA dos Dados de Tempo de Serviço Multimodal
fopen(path+"MMTime.dat",F_INPUT)
writeln("IO Status = ",getparam("IOSTATUS"))
if (getparam("IOSTATUS")=0) then
    forall(i in 1..InterlCentr) do
        forall(j in 1..InterlCentr) do
            read(MMTime(i,j))
        end-do
    end-do
end-if
fclose(F_INPUT)

! LEITURA dos Valores de Frete Unimodais
fopen(path+"UMFrVl.dat",F_INPUT)
writeln("IO Status = ",getparam("IOSTATUS"))
if (getparam("IOSTATUS")=0) then
    forall(i in 1..InterlCentr) do
        forall(j in 1..InterlCentr) do
            read(UMFrVl(i,j))
        end-do
    end-do
end-if
fclose(F_INPUT)

! LEITURA dos Dados de Tempo de Serviço Unimodal
fopen(path+"UMTime.dat",F_INPUT)
writeln("IO Status = ",getparam("IOSTATUS"))
if (getparam("IOSTATUS")=0) then
    forall(i in 1..InterlCentr) do
        forall(j in 1..InterlCentr) do
            read(UMTime(i,j))
        end-do
    end-do
end-if
fclose(F_INPUT)

! LEITURA dos Dados dos Portos já Instalados
fopen(path+"OrgPrt.dat",F_INPUT)
writeln("IO Status = ",getparam("IOSTATUS"))
if (getparam("IOSTATUS")=0) then
    forall(i in 1..InterlCentr) do
        forall(j in 1..InterlCentr) do
            read(OrgPrt(i,j))
        end-do
    end-do
end-if
fclose(F_INPUT)

```

```

    end-do
  end-do
end-if
fclose(F_INPUT)

```

! LEITURA dos parametros das funções de divisão modal

```

fopen(path+"X.dat",F_INPUT)
writeln("IO Status = ",getparam("IOSTATUS"))
if (getparam("IOSTATUS")=0) then
  forall(i in 1..DoubleHubs) do
    read(X(i))
  end-do
end-if
fclose(F_INPUT)

```

! LEITURA dos NOVOS Valores de Frete e Tempo Multimodais

```

fopen(path+"NewMMTimes&Fr.dat",F_INPUT)
writeln("IO Status = ",getparam("IOSTATUS"))
if (getparam("IOSTATUS")=0) then
  forall(p in 1..MM_ODPairs) do
    read(OrgNode)
    read(DstNode)
    read(OrgPort)
    read(DstPort)
    read(NewMMFrVI(OrgNode,DstNode,OrgPort,DstPort))
    read(NewMMTime(OrgNode,DstNode,OrgPort,DstPort))
  end-do
end-if
fclose(F_INPUT)

```

! LEITURA dos NOVOS Valores de Frete e Tempo Unimodais

```

fopen(path+"NewUMTimes&Fr.dat",F_INPUT)
writeln("IO Status = ",getparam("IOSTATUS"))
if (getparam("IOSTATUS")=0) then
  forall(p in 1..UM_ODPairs) do
    read(OrgNode)
    read(DstNode)
    read(NewUMFrVI(OrgNode,DstNode))
    read(NewUMTime(OrgNode,DstNode))
  end-do
end-if
fclose(F_INPUT)

```

!-----

! Calcula C<sup>o</sup>ijklm

```

NetTotalCost := 0
forall(i in 1..InterlCentr, j in 1..InterlCentr) do
  !MMProb := 0
  if (UMFrVI(i,j) <> 0) then

```

```

        (!No arquivo UMFrvl.dat há pares ij (da área de influência
        dos novos hubs) para os quais não haviam sido feito cál-
        culos (conforme explicado em observação acima) e nestes
        o valor determinado para o par foi zero.          !)
    C(i,j) := Dem(CorrespCentr(i),CorrespCentr(j)) * UMFrvl(i,j)
    if ((MMFrVl(i,j) < 0) and (UMFrVl(i,j) > MMFrVl(i,j))) then
        (!Para determinação dos
        fluxos via hubs pré-existentes, foram considerados somente
        os pares ij que tinham opção via hubs antes da instalação
        dos novos hubs e em que o transporte via hubs tinha custo
        menor que o do transporte direto.          !)
        case OrgPrt(i,j) of ! Este case é devido à inclusão de Belem e S.Luis
            0..9 : OPrt := OrgPrt(i,j)
            10  : OPrt := OrgPrt(i,j) + 2
        end-case
        MMProb := 1 / ( 1 + ((X(OPrt)^(UMFrVl(i,j)-MMFrVl(i,j))) *
            (X(OPrt+N_Hubs)^(UMTime(i,j)-MMTime(i,j))))))
        COijpq(i,j) := Dem(CorrespCentr(i),CorrespCentr(j)) *
            (MMFrVl(i,j)*MMProb + (1-MMProb)*UMFrVl(i,j))
        C(i,j) := COijpq(i,j)
    end-if
    NetTotalCost += C(i,j)
end-if
bool1 := 0
forall(k in Hub, m in Hub) do
    if (((k in PotHub) or (m in PotHub)) and exists(NewMMFrVl(i,j,k,m))) then
        (! Somente são considerados como novos caminhos via hubs
        possíveis, os caminhos ijk m que atenderem as seguintes
        condições:
        - pelo menos um dos dois hubs componetes seja novo e
        - a combinação dos quatro vértices (i,j,k,m) não se enquadre
        em alguma das quatro condições listadas na observação
        logo abaixo da declaração de variáveis deste programa.  !)
        NewMMProb := 1 / ( 1 + ((X(k)^(NewUMFrVl(i,j)-
            NewMMFrVl(i,j,k,m)))*(X(k+N_Hubs)^(NewUMTime(i,j)-
            NewMMTime(i,j,k,m))))))
        CO(i,j,k,m) := Dem(CorrespCentr(i),CorrespCentr(j)) *
            (NewMMFrVl(i,j,k,m)*NewMMProb +
            (1-NewMMProb)*NewUMFrVl(i,j))
        bool1 := 1
    end-if
end-do
if (not exists (C(i,j)) and bool1 = 1) then
    (! Na rede pré-existente antes da instalação dos novos hubs,
    o par ij não era considerado porque pelo menos um de seus
    vértices i e j, não estava a menos de 400 km de algum porto.
    Portanto seu custo direto não foi calculado na construção do
    arquivo UMFrvl.dat. E deve ser calculado a partir do arquivo
    NewUMFrVl.dat que inclui os pares que podem se passar a ser
    utilizados com a instalação de novos hubs.  !)

```

```

        C(i,j) := Dem(CorrespCentr(i),CorrespCentr(j)) * NewUMFrVl(i,j)
        NetTotalCost += C(i,j)
    end-if

end-do

end-procedure

!-----
procedure Print_Sol
!-----
declarations
    HubName: array(Hub) of string
end-declarations
HubName(1) := 'RIG'
HubName(2) := 'SFS'
HubName(3) := 'SSZ'
HubName(4) := 'ITG'
HubName(5) := 'ACH'
HubName(6) := 'SSA'
HubName(7) := 'MCZ'
HubName(8) := 'SUA'
HubName(9) := 'PEC'
HubName(10) := 'SLS'
HubName(11) := 'BLM'
HubName(12) := 'MAO'
writeln
writeln("Custo mínimo da rede considerada: R$ ", getobjval)
writeln
writeln("Economia de Recursos: R$ ", (NetTotalCost-getobjval))
writeln
write("Hubs Sugeridos para a Instalação:")
forall(i in PotHub) write(if(getsol(Open(i))=1, " "+i, ""))
writeln
end-procedure

!-----

end-model

```



## ANEXO 8 – Simplificação da Formulação de Maximização da Entropia

Na geração da matriz de demanda de carga geral (item 5.4) foi utilizado o método de Maximização da Entropia (formulação 17a-17c, recomendado por ORTÚZAR e WILLUMSEN, 1995). Numa das tentativas de solução do problema utilizou-se um processo para simplificar a formulação de otimização de que constitui o método, a fim de transformá-la em um sistema de equações não-lineares.

Sendo assim, seguindo recomendação dos citados autores, simplificou-se o problema com os passos **a** até **d** a seguir.

As variáveis não declaradas neste anexo estão definidas no início do item 5.4.

**a.** Relaxação lagrangeana ( $L$ ) de todas das restrições 17b;

$$Fun.Obj = \underset{w_{ij}}{Max} \left( - \sum_{i,j} w_{ij} \cdot \ln \frac{w_{ij}}{R_{ij}} - w_{ij} \right)$$
$$L = - \sum_{i,j} \left( w_{ij} \cdot \ln \frac{w_{ij}}{R_{ij}} - w_{ij} \right) + \sum_a \alpha_a \left( V_a - \sum_{i,j} w_{ij} \cdot P_{aij} \right)$$

**b.** Derivação do lagrangeano em relação a cada uma das variáveis  $w_{ij}$ ,

$$\frac{\partial L}{\partial w_{ij}} = - \ln \frac{w_{ij}}{R_{ij}} - \sum_a (\alpha_a \cdot P_{aij})$$

**c.** Obtenção dos valores de  $w_{ij}$  em função dos multiplicadores de Lagrange ao igualar cada uma destas derivadas a zero (devido à condição de ser um máximo da função);

$$0 = -\ln \frac{w_{ij}}{R_{ij}} - \sum_a (\alpha_a \cdot P_{a ij})$$

$$\ln \frac{w_{ij}}{R_{ij}} = -\sum_a (\alpha_a \cdot P_{a ij})$$

$$\frac{w_{ij}}{R_{ij}} = e^{-\sum_a (\alpha_a \cdot P_{a ij})} = \prod_a (e^{-\alpha_a})^{P_{a ij}}$$

*fazendo*

$$\chi_a = e^{\alpha_a}$$

*tem-se*

$$w_{ij} = R_{ij} \cdot \prod_a \chi_a^{P_{a ij}}$$

**d.** Substituição destes novos valores de  $w_{ij}$ , nas restrições 17b da formulação inicial, gerando um sistema de equações não-lineares cujas variáveis são os  $\chi_a$ . Tal sistema possui tantas equações quanto o número de restrições do tipo 17b, isto é, a quantidade de contagens de tráfego.

$$\sum_{i,j} w_{ij} \cdot P_{g ij} = V_g$$

$$\sum_{i,j} \left[ \left( R_{ij} \cdot \prod_a \chi_a^{P_{a ij}} \right) \cdot P_{g ij} \right] = V_g$$