

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

RODOLFO CRYSTELLO DAVARIZ

**PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE PROJETO DE REDE  
LOGÍSTICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Luiz Antônio Silveira Lopes -  
D. Sc.

Rio de Janeiro  
2006

c2006

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ

CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

D245 Davariz, Rodolfo Crystello

Procedimento para Análise de Projeto de Rede Logística / Rodolfo Crystello Davariz – Rio de Janeiro : Instituto Militar de Engenharia, 2006.

133 p.: il., tab.

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, 2006.

1. Logística. 2. Redes logísticas, Planejamento. 3. Localização de instalações. I. Instituto Militar de Engenharia. II. Título.

CDD 658.5

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**RODOLFO CRYSTELLO DAVARIZ**

**PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE PROJETO DE REDE  
LOGÍSTICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof. Luiz Antônio Silveira Lopes - D. Sc.

Aprovada em 09 de maio de 2006 pela seguinte Banca Examinadora:

---

Prof. Luiz Antônio Silveira Lopes – D.Sc. do IME – Presidente

---

Prof. Peter Wanke - D.Sc. do COPPEAD/UFRJ

---

Prof. Paulo Afonso Lopes da Silva – Ph.D. do IME

Rio de Janeiro  
2006

À minha mãe Arlete.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida e pela oportunidade de me tornar a cada dia um ser humano melhor.

Ao Instituto Militar de Engenharia, pela possibilidade de realização deste mestrado, e a CAPES pelo apoio financeiro durante o curso.

Ao meu orientador, professor Luiz Antônio Silveira Lopes, pelos ensinamentos, pelo apoio e, principalmente, pelas críticas sempre construtivas.

Aos professores Peter Wanke, D.Sc. e Paulo Lopes, Ph.D. por terem aceitado gentilmente o convite para integrar a banca examinadora e pelo tempo dedicado a apreciação desta dissertação.

A todos os demais professores do Mestrado em Engenharia de Transportes pelos conhecimentos transmitidos que em muito contribuíram para o meu crescimento profissional.

A ABML, por conceder-me o primeiro lugar com a apresentação deste trabalho no VI Prêmio AMBL de Logística Edição 2005 na categoria Estudante de Logística.

A minha mãe, pelo amor e pela criação. Sou eternamente agradecido. E por acreditar que eu devia correr atrás dos meus sonhos, mesmo que para isso eu tivesse que me mudar.

A minha madrinha Ana e às minhas tias Arminda e Selma, que desde que cheguei ao Rio para a realização deste mestrado, me deram apoio incondicional, não apenas com o suporte material, mas psicológico também. Obrigado por confiarem em mim.

Aos meus amigos Fernando e Herlander, que ao dividirem comigo a baía de estudos, dividimos também nossos pensamentos, dificuldades e alegrias nestes dois anos.

A todos os amigos e colegas do IME, em especial Amílcar, Karina, Michelly, Monique, Gleicy, Cap. Rubiulli e Cap. Emanuel.

A todos os demais familiares e amigos que torceram pelo meu sucesso. E a todas as pessoas que, indiretamente, contribuíram para a elaboração deste trabalho ou torceram por esta conquista.

Dois marmoreiros trabalhavam na reconstrução da catedral de St. Paul, em Londres, quando Sir Christopher Wren perguntou-lhes o que faziam. O primeiro respondeu: “Corto mármore”. Já o segundo garantiu: “Estou construindo uma catedral”.

CHRISTOPHER WREN

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	10
LISTA DE TABELAS .....	11
LISTA DE SIGLAS.....	12
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 Considerações Iniciais .....	15
1.2 Objetivo da Dissertação .....	16
1.3 Justificativa e Relevância .....	17
1.4 Metodologia de Pesquisa .....	17
1.5 Desenvolvimento da Dissertação .....	18
<b>2 PROJETO DE REDE LOGÍSTICA .....</b>	<b>19</b>
2.1 Definição do Problema .....	19
2.2 Aspectos das Cadeias de Suprimento que Influenciam o Projeto de Rede Logística .....	20
2.2.1 Produto e Demanda .....	20
2.2.2 Operações .....	27
2.2.3 Custos Logísticos .....	31
2.3 Considerações Finais .....	38
<b>3 MODELAGEM MATEMÁTICA DE REDES LOGÍSTICAS .....</b>	<b>39</b>
3.1 Problemas de Localização de Instalações .....	39
3.2 Classificação dos Modelos de Programação Matemática .....	41
3.2.1 Problemas Capacitados e Não-capacitados .....	42
3.2.2 Número de Produtos Movimentados .....	43
3.2.3 Número de Períodos de Planejamento .....	43
3.2.4 Número de Estágios Intermediários .....	43
3.2.5 Tipos de Instalações a Serem Localizadas .....	44
3.2.6 Restrições de Atendimento ao Mercado .....	44
3.2.7 Abrangência Geográfica .....	44
3.2.8 Flexibilidade de Modelagem .....	45

3.2.9	Outros Critérios .....	45
3.3	Revisão dos Modelos Matemáticos Existentes .....	45
3.3.1	Problemas Não-capacitados de Localização de Instalações .....	46
3.3.2	Problemas Capacitados de Localização de Instalações .....	47
3.3.3	Problemas de Localização de Instalações Intermediárias .....	48
3.3.4	Problemas de Localização de Instalações Considerando o Fluxo de Múltiplos Produtos .....	49
3.3.5	Problemas de Localização de Instalações de Produção .....	52
3.3.6	Problemas de Localização de Instalações Considerando Custos de Estoque.....	54
3.4	Considerações Finais .....	58
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTO PROPOSTO .....</b>	<b>60</b>
4.1	Identificação da Necessidade de Planejamento .....	60
4.2	Definição do Escopo do Projeto .....	62
4.3	Identificação de Estratégias Logísticas a Serem Avaliadas .....	64
4.4	Modelagem Matemática .....	65
4.5	Levantamento e Tratamento dos Dados .....	66
4.6	Implementação Computacional .....	69
4.7	Validação do Modelo e dos Dados .....	71
4.8	Análise de Sensibilidade .....	72
4.9	Cronograma de Implantação .....	72
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO: PROJETO DE REDE LOGÍSTICA DO BIODIESEL DE MAMONA NO NORDESTE BRASILEIRO .....</b>	<b>75</b>
5.1	Identificação da Necessidade de Planejamento .....	75
5.2	Definição do Escopo do Projeto .....	78
5.3	Identificação de Estratégias Logísticas a Serem Avaliadas .....	82
5.4	Modelagem Matemática .....	83
5.5	Levantamento e Tratamento de Dados .....	87
5.5.1	Mercado de Diesel e Demanda de Biodiesel .....	87
5.5.2	Zonas de Plantio de Mamona .....	89
5.5.3	Bases Coletoras de Álcool .....	91



5.5.4	Esmagadoras e Usinas de Biodiesel .....	91
5.5.5	Bases de Distribuição de Combustíveis .....	93
5.5.6	Transportes .....	94
5.6	Implementação Computacional em GAMS .....	95
5.7	Validação do Modelo e dos Dados .....	97
5.8	Análise de Sensibilidade .....	103
5.8.1	Sensibilidade da Solução à Variação da Demanda .....	103
5.8.2	Sensibilidade da Solução à Variação dos Custos Logísticos .....	104
5.8.3	Sensibilidade da Solução à Variação do Nível de Serviço .....	105
5.9	Cronograma de Implantação .....	106
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>108</b>
6.1	Conclusões .....	108
6.2	Recomendações .....	110
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>111</b>
<b>8</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>116</b>
I	Locais Potenciais de Instalação de Esmagadoras e Usinas de Biodiesel ...	117
II	Código do Modelo Matemático Desenvolvido em GAMS .....	118
III	Exemplo de Relatório de Saída de Resultados .....	130

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1	Representação genérica da curva do ciclo de vida dos produtos .....	24
FIG. 2.2	Grau de certeza de demanda ao longo da cadeia de suprimento .....	26
FIG. 2.3	Relações genéricas de custo de transporte .....	34
FIG. 2.4	Exemplificação de políticas de estoque .....	35
FIG. 2.5	Representação genérica das compensações de custos no problema de localização de instalações .....	37
FIG. 4.1	Representação genérica dos <i>inputs</i> e <i>outputs</i> do modelo matemático .....	69
FIG. 4.2	Representação genérica de um SSD .....	70
FIG. 4.3	Fluxograma do procedimento proposto .....	74
FIG. 5.1	Mamona .....	78
FIG. 5.2	Cadeia de suprimentos do biodiesel de mamona .....	79
FIG. 5.3	Balanços de massa .....	80
FIG. 5.4	Usina de produção de biodiesel .....	82
FIG. 5.5	Representação genérica da rede logística do biodiesel de mamona com as variáveis de decisão e custos envolvidos .....	87
FIG. 5.6	Vendas de óleo diesel pelas distribuidoras no Nordeste .....	88
FIG. 5.7	Regiões consideradas aptas ao plantio de mamona (áreas em destaque) ..	90
FIG. 5.8	Bases de distribuição de combustíveis que operam diesel no Nordeste ....	93
FIG. 5.9	Vista do banco de dados em Access .....	96
FIG. 5.10	Vista do GAMS .....	97
FIG. 5.11	Fluxos de biodiesel de mamona no Nordeste em 2013 .....	102

## LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1	Características dos produtos segundo FISHER (1997) .....	21
TAB. 2.2	Características das cadeias de suprimento segundo FISHER (1997) .....	22
TAB. 2.3	Estratégias de entrega dos produtos de acordo com PCPC .....	25
TAB. 3.1	Quadro comparativo dos modelos revisados .....	58
TAB. 5.1	Demanda estimada de biodiesel B100 com base no mercado de diesel (m <sup>3</sup> ) .....	88
TAB. 5.2	Áreas plantada, produção e produtividade dos estados nordestinos produtores de mamona na safra 2004/2005 .....	89
TAB. 5.3	Número de municípios aptos ao plantio da mamona por estado .....	90
TAB. 5.4	Investimentos em usinas de biodiesel .....	93
TAB. 5.5	Produção por esmagadora no modelo livre em 2013 .....	98
TAB. 5.6	Produção por usina de biodiesel no modelo livre em 2013 .....	99
TAB. 5.7	Composição dos custos no modelo capacitado em 2013 .....	99
TAB. 5.8	Composição dos custos no modelo capacitado com estoques em 2013 .	100
TAB. 5.9	Composição dos custos no modelo de múltiplos períodos .....	101
TAB. 5.10	Esmagadoras selecionadas e utilização da capacidade .....	102
TAB. 5.11	Usinas de biodiesel selecionadas e utilização da capacidade .....	103
TAB. 5.12	Custos marginais de atendimento a demanda nas bases de distribuição	104
TAB. 5.13	Custos marginais do fornecimento de mamona nas zonas de plantio ....	105
TAB. 5.14	Cronograma de abertura e estimativa total de investimentos em esmagadoras .....	107
TAB. 5.15	Cronograma de abertura e estimativa total de investimentos em usinas	107

## LISTA DE SIGLAS

ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CD	Centro de distribuição
CIF	<i>Cost Insurance Fee</i>
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CSCMP	<i>Council of Supply Chain Management Professionals</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FOB	<i>Free on board</i>
GAMS	<i>General Algebraic Modeling System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PAPC	Ponto de atendimento do pedido do cliente
PCPC	Ponto de colocação do pedido do cliente
PIB	Produto Interno Bruto
PLIM	Programação linear inteira mista
PMDM	Ponto de mediação de demanda do mercado
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
SIFRECA	Sistema de informações de fretes
SSD	Sistema de suporte a decisão
TL	<i>Truckload</i>

## RESUMO

Ao longo das últimas décadas, fatores como a globalização de economia, o aumento do nível de exigência dos clientes, a diminuição do ciclo de vida dos produtos e o avanço das tecnologias de informação, têm exercido fortes pressões sobre o sistema logístico das empresas. Isso aumentou a necessidade das empresas revisarem seus sistemas logísticos com maior frequência. Diante deste cenário, o conhecimento de técnicas e procedimentos que permitam planejar a rede logística torna-se de extrema relevância nos dias atuais. Considerado um dos principais problemas no planejamento logístico, o “Projeto de Rede Logística”, como é conhecido na literatura, foi objeto de estudo de diversos autores em abordagens qualitativa e quantitativa. O objetivo do presente trabalho é propor um procedimento para a análise de projetos de rede logística, buscando conciliar ambas as abordagens. O estudo inclui ainda um levantamento dos principais aspectos das cadeias de suprimentos que influenciam o projeto de rede logística, uma revisão bibliográfica dos modelos existentes e um estudo de caso da cadeia de biodiesel de mamona no Nordeste brasileiro.

## **ABSTRACT**

During last decades, factors as the economic globalization, the increase of requirement level of customers, the reduction of products cycle life and the advance of information technology, have applied strong pressures on the logistic system of enterprises. It increased the necessary of enterprises review its logistic systems more often. In this scenario, the knowledge of techniques and procedures that allow planning the logistic network become extremely relevant nowadays. “Logistic Network Design”, as it is known in the literature, is considered one of the main problems in logistic planning, and was object of study of several authors in qualitative and quantitative approaches. This work aims to propose a procedure to analyze logistic network designs, searching to conciliate both approaches. The study includes also a survey of the main aspects of supply chain that affect logistic network design, a bibliographical review of the existing models, and a case study of Biodiesel made with castor oil’s chain in the Brazilian northeast.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Graças ao acirramento da competição global dos mercados, à diminuição do ciclo de vida dos produtos e ao aumento das expectativas dos clientes, as empresas se viram forçadas a investir e focar sua atenção nos seus sistemas logísticos. Somado a isso, o avanço das tecnologias de informação e de comunicação, ocorrido ao longo da década de 1990, tem motivado a contínua evolução do gerenciamento de cadeias de suprimentos, passando a ser vista como potencial fonte de vantagem competitiva.

Segundo CHRISTOPHER (1998) *apud* LAMBERT (1998), a gestão de negócios está entrando na era da competição intra-redes e o sucesso de uma única empresa irá depender da habilidade em gerenciar a integração de sua complexa rede de relacionamentos com fornecedores e clientes. Deste modo, para LAMBERT (1998), um dos elementos-chave do gerenciamento da cadeia de suprimentos é ter o explícito conhecimento e entendimento de como a cadeia de suprimentos está estruturada.

Para SHAPIRO (2001), a cadeia de suprimentos de uma empresa é compreendida de instalações dispersas geograficamente, onde matérias-primas, produtos intermediários ou produtos acabados são adquiridos, transformados, estocados e vendidos, e de ligações de transporte, que conectam as instalações ao longo das quais os produtos fluem. Essas instalações podem ser operadas pela companhia, ou por fornecedores, prestadores de serviços logísticos, clientes, ou outras empresas com as quais a companhia tenha negócios.

De acordo com BALLOU (2001a), uma outra maneira de ver a cadeia de suprimentos é abstraí-la como uma rede com nós e arcos. Os arcos da rede representam o movimento de bens entre vários pontos de estocagem. E estes pontos de estocagem – lojas de varejo, depósitos, fábricas ou distribuidores – por sua vez, são os nós. Há vários arcos entre qualquer par de nós, que representam formas alternativas de transportes, diferentes rotas e diferentes produtos. Os nós representam pontos onde

o fluxo de bens está temporariamente parado, por exemplo, em um depósito, antes de ser transportado para uma loja de varejo e para o consumidor final.

A ocorrência de mudanças no ambiente de negócios ou mesmo alterações nos objetivos estratégicos da companhia, fazem com que, periodicamente, a estrutura da cadeia de suprimentos tenha de ser revista, face às novas condicionantes. Configurações inadequadas da rede podem implicar em custos operacionais acima do necessário durante anos. Ou, podem ainda, ser a causa da perda de receitas, pela ineficiência em atender ao nível de serviço exigido pelo mercado.

Isso faz com que o problema de configuração de redes logísticas seja de grande importância para a alta gerência. De acordo com BALLOU (2001a), a revisão da rede logística, por meio do uso de modelos matemáticos, pode gerar economias anuais da ordem de 5% a 15% dos custos logísticos totais. Além de afetar drasticamente a rentabilidade da empresa, a revisão pode trazer benefícios para o serviço ao cliente e a competitividade do negócio.

De acordo com GOETSCHALCKX *et al* (2002), a sobrevivência em longo prazo das empresas será muito difícil de se atingir sem planos estratégicos e táticos de logística altamente otimizados. Entretanto, estes planos estão frequentemente baseados em conhecimento “intuitivo” prévio e não em investigação sistemática.

Faz-se necessário, portanto, criar e desenvolver técnicas e procedimentos para o planejamento e análise de redes logísticas, que resultem em planos e projetos consistentes de forma a contribuir para tomada de decisão e a alocação de recursos de investimento.

## 1.2. OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

O objetivo do presente trabalho é propor um procedimento para a análise de projetos de rede logística, buscando conciliar uma abordagem quantitativa e qualitativa do problema. O procedimento pretende orientar o trabalho de profissionais de logística na elaboração de projetos de rede logística, identificando a melhor alternativa de rede e servindo como subsídio à tomada de decisão.



### 1.3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Segundo CHRISTOPHER (1997), ainda que num passado distante, gerais e marechais já tivessem reconhecido o papel crítico da logística, o reconhecimento da mesma como aspecto fundamental para a obtenção de vantagem competitiva só chegou até as empresas num passado recente. Em consequência disso, tem-se que a maioria das grandes empresas experimentou um crescimento pouco estruturado no diz respeito à visão integrada da logística.

Erros de configurações da rede implicam em custos maiores do que o necessário durante toda vida útil das instalações, geralmente superior a 10 anos. Mesmo pequenas diferenças no custo total, se perpetuadas, podem inviabilizar investimentos.

Não obstante, uma vez decidida a configuração, o custo de mudanças pode ser proibitivo. Frequentemente, isso envolve importantes decisões difíceis de serem desfeitas, como a compra de terras, realização de fusões e aquisições, construção de instalações e/ou assinatura de contratos de prestação de serviço de longo prazo.

Do exposto, verifica-se que o conhecimento de técnicas e procedimentos para o adequado planejamento de redes logísticas é de suma importância para as empresas na busca por vantagem competitiva. Isso torna-se ainda mais relevante no caso do Brasil, onde os custos logísticos chegam a representar 12,6% do PIB (LIMA, 2006).

### 1.4. METODOLOGIA DE PESQUISA

De acordo com as formas de classificação de pesquisas enunciadas por SILVA e MENEZES (2001), esta pesquisa pode ser classificada como:

- Do ponto de vista da sua natureza, é uma pesquisa aplicada, pois objetiva gerar conhecimento para aplicação prática dirigidos à solução do problema de configuração de redes logísticas;
- Do ponto de vista de seus objetivos, é uma pesquisa exploratória, pois visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo

explícito. Adota como procedimentos técnicos, a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso.

- Do ponto de vista da forma de abordagem do problema, esta pesquisa busca conciliar a abordagem qualitativa e quantitativa do problema.

## 1.5. DESENVOLVIMENTO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. No primeiro, apresentam-se as considerações iniciais, o objetivo e as justificativas do estudo, a metodologia da pesquisa, além de sua estrutura.

No segundo, o conceito de projeto de rede logística é apresentado, assim como são abordados os principais aspectos das cadeias de suprimento que influenciam a configuração da rede. Descrevem-se as estratégias logísticas que podem ser adotadas pelas empresas, de acordo com as características dos produtos e da demanda. Assim como, os tipos de operações desempenhados ao longo da cadeia e os principais custos logísticos envolvidos.

No terceiro capítulo, apresentam-se uma revisão bibliográfica dos modelos matemáticos existentes aplicáveis na solução do projeto de rede logística, destacando as características das cadeias de suprimentos que foram incorporadas aos modelos.

No quarto capítulo, apresenta-se o procedimento proposto para a análise de projetos de rede logística, descrevendo as etapas necessárias desde a identificação da necessidade de se planejar até a proposta de implantação.

No quinto capítulo, apresenta-se um estudo de caso sobre o projeto de rede logística do biodiesel produzido a partir da mamona no Nordeste do país. Com este estudo, observa-se na prática a importância e a dificuldade de cada etapa do procedimento na definição da rede logística.

No sexto e último capítulo, apresentam-se as conclusões obtidas a partir da pesquisa realizada e as recomendações para o desenvolvimento de futuros trabalhos relacionados ao tema.

## 2. PROJETO DE REDE LOGÍSTICA

### 2.1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Localização de instalações, planejamento de redes logísticas e projeto de cadeias de suprimentos são alguns dos termos que têm sido utilizados na literatura para descrever o que os pesquisadores conhecem – e que será doravante adotado nesta pesquisa – como projeto de rede logística, traduzida do inglês *logistics network design*.

Segundo BALLOU (2001a), o problema de projeto de rede logística consiste em especificar a estrutura através da qual os produtos fluirão, de seus pontos de origem até os pontos de demanda. Envolve determinar quais instalações devem ser usadas, quantas devem existir, onde devem estar localizadas, quais produtos e clientes devem ser designados a elas, quais serviços de transporte devem ser usados entre elas e como as instalações devem ser atendidas.

Estas decisões possuem forte interdependência entre si e não devem, portanto, ser analisadas de forma seqüencial ou segmentada (LACERDA, 1999). Na sua análise, é preciso considerar as compensações de custos (*trade-offs*) existentes entre as decisões relacionadas ao número e localização das instalações, ao transporte e ao posicionamento do estoque na rede. O que se pretende é obter uma solução ótima, que atenda ao nível de serviço desejado ao menor custo total da operação.

Estas características tornam interessante a aplicação de ferramentas quantitativas de pesquisa operacional, em especial, a programação matemática, dado que esta, tem por objetivo geral, a otimização de uma determinada utilidade de interesse, sujeita ao atendimento de um conjunto de restrições.

Para FREITAS (2004), independentemente do método, a abordagem quantitativa do problema é indispensável na seleção do melhor projeto de rede. Os primeiros estudos nesta área datam dos anos de 1960, mas seus modelos ainda não possuíam ampla aplicação em situações reais, com inúmeras variáveis e restrições. Entretanto, modelos mais abrangentes e representativos dos sistemas logísticos

necessitam da manipulação de grandes volumes de dados, o que só se tornou possível com os recentes avanços tecnológicos da última década.

Em contrapartida, para FIUZA *et al* (2003), a abordagem qualitativa pode ser bastante proveitosa num primeiro momento. Para eles, antes de se realizar a modelagem, é necessário entender o problema em profundidade, dado a quantidade de fatores e incertezas associadas ao problema.

Em outras palavras, este problema deve ser tratado segundo uma visão prospectiva. Segundo GRUMBACH (1997), esta visão tem a finalidade de integrar todas as variáveis de um problema, de modo a permitir visualizar que impactos terão umas sobre as outras e, também, que impactos terão, em conjunto, sobre as ações que serão tomadas.

Diante deste contexto, conhecer os aspectos das cadeias de suprimento que influenciam as decisões do projeto de rede logística torna-se de suma importância.

Nas próximas seções deste capítulo, estes aspectos são reunidos em três grupos e abordados sob diferentes perspectivas da cadeia de suprimentos. No primeiro, o foco será nos tipos de produtos e o respectivo comportamento da demanda sob a ótica de toda a cadeia. No segundo, as características gerais da operação entre estágios distintos ganham atenção. E, por fim, no terceiro grupo, os custos logísticos associados às atividades desempenhadas ao longo da rede.

## 2.2. ASPECTOS DAS CADEIAS DE SUPRIMENTO QUE INFLUENCIAM O PROJETO DE REDE LOGÍSTICA

### 2.2.1. PRODUTO E DEMANDA

Para BALLOU (2001a), o produto deve ser o principal objeto de estudo no projeto de rede logística, pois ele representa o fluxo físico na cadeia de suprimentos, e em sua forma econômica, gera receita para a empresa. Um entendimento claro desse elemento básico é essencial para a análise de bons projetos de rede logística. Logo, a classificação de produtos torna-se uma ferramenta valiosa para sugerir estratégias logísticas, que em muitos casos, justificam por que os produtos são fornecidos e distribuídos da maneira como o são. Ou seja, presume-se que uma cadeia de

suprimentos será mais eficiente na medida em que for projetada segundo as características dos produtos que fluirão por sua rede. Essa teoria foi enunciada por FISHER (1997).

#### 2.2.1.1. RELAÇÃO ENTRE PRODUTOS E CADEIAS DE SUPRIMENTO

A base desta teoria afirma que os produtos podem ser classificados tanto como funcionais ou inovadores, dependendo do comportamento da demanda e das expectativas do mercado. Por outro lado, a cadeia de suprimentos pode enfatizar a função física de entregar bens ou a função de mediadora com o mercado na transferência de informações. A partir disso, assume-se que um produto funcional requer uma cadeia focada na eficiência física, enquanto um produto inovador requer uma cadeia focada na resposta rápida ao mercado.

Para serem classificados, os produtos dependem das suas características de demanda em termos de, quão extenso são seus ciclos de vida, previsibilidade da demanda, variedade de produtos e padrões de mercado para tempo de entrega e nível de serviço. De acordo com os estudos de caso realizados por FISHER (1997), as características dos produtos foram classificadas conforme tabela abaixo.

**TAB. 2.1** Características dos produtos segundo FISHER (1997)

Características dos produtos	Funcionais (demanda previsível)	Inovadores (demanda imprevisível)
Ciclo de vida do produto	Mais de 2 anos	3 meses a 1 ano
Margem de contribuição	5% a 20%	20% a 60%
Variedade de produtos	Baixa (10 a 20 variações por categoria)	Alta (freq. milhares de variações por categoria)
Média marginal de erro na previsão de demanda	10%	40% a 100%
Taxa média de falta de estoque	1% a 2%	10% a 40%
Taxa média de desconto para “queima de estoques”	0%	10% a 25%

Além disso, um conjunto de características das cadeias de suprimento adotadas pelas empresas foi identificado como forma de correlacioná-las com seus produtos.

**TAB. 2.2** Características das cadeias de suprimento segundo FISHER (1997)

Características das cadeias de suprimento	Eficiência física	Resposta rápida ao mercado
Propósito principal	Suprir a demanda prevista eficientemente ao menor custo possível.	Responder rapidamente a colocação de pedido minimizando falta de estoque, descontos e obsolescência.
Estratégia de precificação	Margens mais baixas, porque o preço é o principal direcionador do cliente.	Margens mais altas, pois o preço não é o principal direcionador do cliente.
Estratégia no desenvolvimento de produtos	Maximização do desempenho e minimização do custo.	Uso de módulos para a diferenciação de produtos o mais próximo possível da colocação do pedido.
Estratégia de seleção de fornecedores	Seleciona prioritariamente pelo custo e qualidade.	Seleciona prioritariamente pela velocidade, flexibilidade e qualidade.
Estratégia de produção	Manter alta a taxa média de utilização da cadeia.	Usar capacidade extra.
Estratégia de estoque	Garantir alto giro de estoque, minimizando-o ao longo de toda a cadeia.	Usar significativo estoque extra de partes e produtos acabados.
Estratégia de entrega	Tempos de entrega reduzidos o suficiente para que não haja aumento dos custos.	Investe agressivamente em meios para a redução do tempo de entrega.
Estratégia de transporte	Grande dependência por modos de baixo custo,	Grande dependência por modos mais velozes.

FISHER (1997) concluiu que demanda estável, com grandes volumes e longos ciclos de vida caracterizam produtos funcionais, e uma cadeia que foca na minimização do custo e no alto nível de utilização dos recursos deveria movimentar este tipo de produto. Enquanto, grandes variações de demanda e curtos ciclos de vida caracterizam produtos inovadores, e cadeias mais flexíveis, com capacidade extra e habilidade em processar informações do mercado movimentariam esses produtos mais apropriadamente.

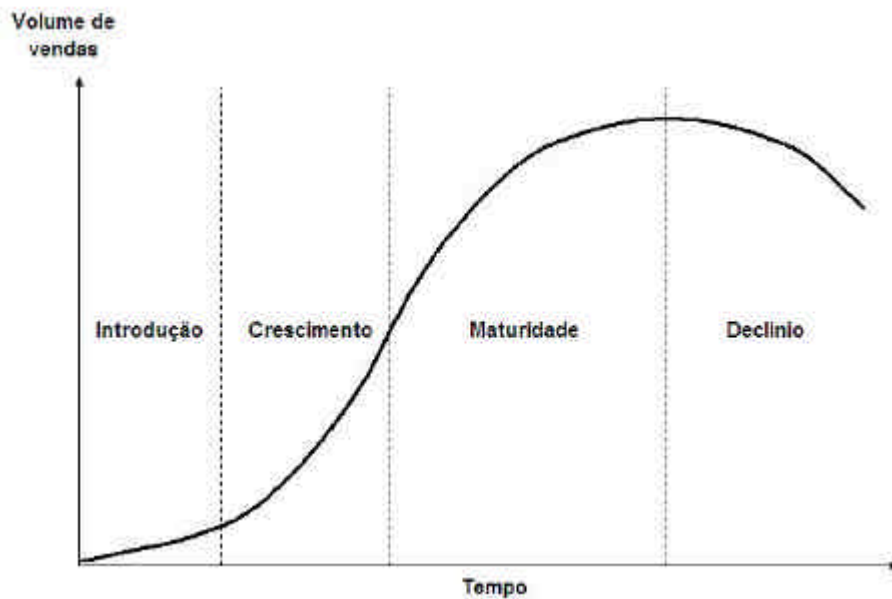
SELLDIN (2005) realizou um estudo exploratório com diversas empresas para verificar se a Teoria de FISHER (1997) apresentava aderência estatística com a prática, e chegou a interessantes considerações e extensões acerca dessa teoria. As duas questões básicas que procurou responder foram: (a) se as características do produto e da cadeia de suprimentos das empresas analisadas apresentavam alta correlação, e (b) se as que apresentavam alta correlação demonstravam melhores desempenhos do que as que apresentavam baixa correlação<sup>1</sup>.

Os resultados deram algum suporte a Teoria de FISHER (1997). Segundo SELLDIN (2005), as empresas têm a tendência de buscar cadeias de suprimentos adequadas aos seus produtos, e quando o fazem, apresentam desempenho significativamente melhor, com destaque para os parâmetros custo, tempo de entrega e confiabilidade na entrega. Ainda assim, um número relevante de empresas apresentou baixa correlação entre as características dos seus produtos e de suas cadeias de suprimentos.

Uma das possíveis causas apontadas para isso é a tentativa de algumas empresas em transformar seus produtos funcionais em inovadores pela introdução de novos produtos para proteger ou aumentar suas margens de lucratividade, mas mantendo o foco na eficiência física da cadeia. Por outro lado, o movimento de produtos ao longo da curva do ciclo de vida da fase de introdução para a fase de maturidade (Ver Fig. 2.1) pôde ter implicado em mudanças nas características dos produtos que alteraram sua classificação de inovador para funcional, enquanto a empresa decidiu manter a cadeia com foco na resposta rápida ao mercado.

---

<sup>1</sup> SELLDIN (2005) considerou apenas a principal linha de produtos da empresa e a correspondente cadeia de suprimentos. Além de características gerais das empresas, a pesquisa identificou características dos produtos, das cadeias de suprimentos e medidas de desempenho, segundo uma escala *Likert*, sendo o desempenho baseado na comparação da empresa com seu principal competidor.



**FIG. 2.1** Representação genérica da curva do ciclo de vida dos produtos

Para SELLDIN (2005), na verdade, não haveria uma classificação binária dos produtos, e sim, uma escala de variação de produtos dos mais funcionais aos mais inovadores. Independentemente disso, a introdução de novos conceitos de gerenciamento da cadeia de suprimentos e avanços tecnológicos estariam possibilitando cada vez mais que as empresas configurem suas cadeias de suprimento de forma a atuarem com eficiência física e resposta rápida ao mercado simultaneamente.

Ainda assim, limitações de recursos ou relações de dependência com outros membros da cadeia poderiam estar entre as causas das empresas não configurarem suas cadeias de suprimentos da forma mais adequada ou de acordo com suas escolhas.

#### 2.2.1.2. VISIBILIDADE DA DEMANDA AO LONGO DA CADEIA

Ainda do ponto de vista da configuração de cadeias de suprimentos, o fluxo de informações dos produtos representa um aspecto-chave no desempenho futuro da cadeia. Partindo de conceitos como ponto de colocação do pedido do cliente (PCPC) (HOEKSTRA e ROMME *apud* SELLDIN, 2005) ou localização da fronteira da operação empurrada/puxada na cadeia (CHOPRA e MEINDL, 2001), observa-se que o fluxo de informações relativo à demanda dos produtos apresenta características



distintas a montante e a jusante desse ponto. Como consequência disso, a cadeia de suprimentos deve refletir em sua estrutura as mudanças no perfil da informação.

De maneira geral, os estágios iniciais de uma cadeia de suprimentos operam de acordo com uma previsão de demanda, estimada com base na observação de padrões históricos de comportamento da demanda. Enquanto os estágios finais e mais próximos do mercado operam de acordo com os pedidos dos clientes, que representam a demanda real do mercado. Ou seja, o PCPC visa separar a cadeia em duas partes, onde na primeira, os produtos ainda não possuem um “destino certo”, e na segunda, esses já estão alocados aos seus clientes.

A determinação da localização deste ponto é uma complexa tarefa, que depende de muitos fatores, tais como flexibilidade do processo de produção e tempo de processamento. Este ponto pode estar posicionado nas cadeias de suprimentos em diferentes estágios de acordo com a estratégia de entrega de produtos, como mostra a figura a seguir. As setas tracejadas representam as operações empurradas ou o fluxo de produtos baseado na previsão de demanda, enquanto as setas contínuas representam as operações puxadas ou o fluxo de produtos baseado no pedido dos clientes.

**TAB. 2.3** Estratégias de entrega dos produtos de acordo com o PCPC

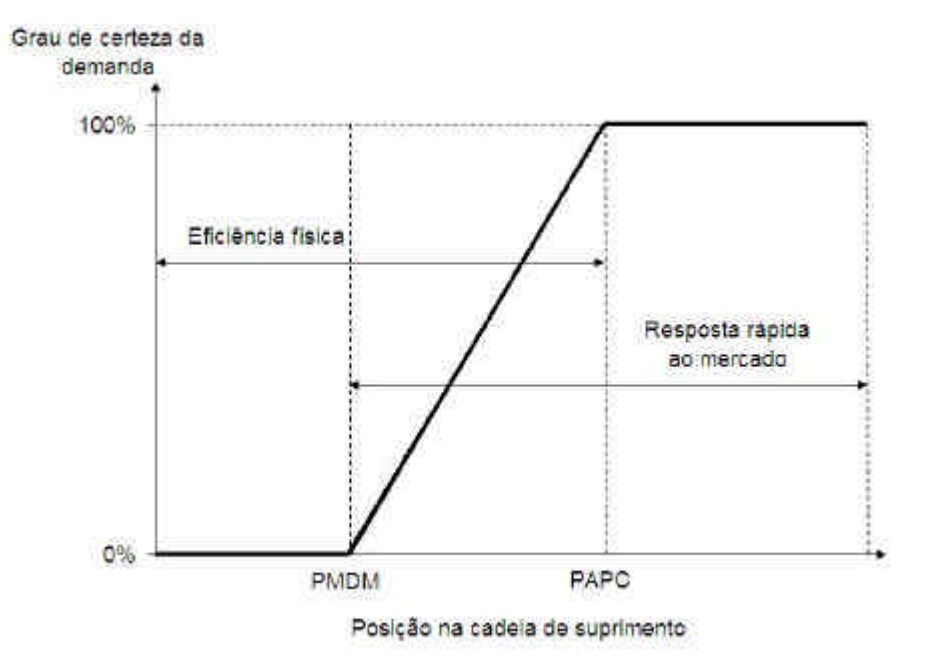
Estratégia de entrega dos produtos	Aquisição e produção	Montagem final	Embarque
Produzir para estocar	----->----->		
Montar para atender	----->	----->	
Produzir para atender	----->	----->	

Fonte: Adaptado de SELLDIN (2005)

Do ponto de vista da demanda, na prática não existe um único ponto na cadeia que separe os produtos que fluem sob previsão dos sob encomenda. Por isso, o PCPC deve ser dividido em dois pontos, quais sejam: ponto de mediação da demanda do mercado (PMDM), onde a informação relativa à demanda inicia a conversão de demanda prevista para demanda efetiva, e ponto de atendimento do pedido do cliente (PAPC), onde todos os produtos já se encontram designados aos seus respectivos clientes.

Buscando aprofundar a análise da configuração de cadeias de suprimento, SELLDIN (2005) estabeleceu um paralelo entre esses conceitos e a Teoria de FISHER (1997), onde identificou que a classificação adotada de cadeias de suprimento seria melhor aplicada a partes da cadeia e não mais a toda a cadeia.

Conforme pode ser visto na Figura 2.2, a zona, que compreende o início da cadeia ao PMDM, não dispõe de qualquer informação de demanda efetiva, o que torna difícil uma reação a mudanças no mercado. O objetivo deste trecho da cadeia é produzir para estocar baseado na previsão de demanda e a característica da cadeia que deve ser enfatizada é a eficiência física.



**FIG. 2.2** Grau de certeza de demanda ao longo da cadeia de suprimento

Na zona intermediária, SELLDIN (2005) sugere uma combinação entre as características que visam a eficiência física e a resposta rápida ao mercado, uma vez que é neste trecho que o grau de certeza da demanda se torna crescente<sup>2</sup>.

Por fim, a zona que se estende do PAPC ao cliente final contém operações que são desempenhadas durante o tempo de entrega do pedido do cliente e estão baseadas na completa informação no que diz respeito aos pedidos dos clientes. Desta forma, o principal objetivo de desempenho é a velocidade de entrega e a confiabilidade na entrega. O excesso de capacidade aqui é importante para atender a variabilidade da

<sup>2</sup> A forma da curva pode variar caso a caso. A linha reta na zona intermediária da figura 2.2 é meramente uma ilustração do comportamento crescente do grau de certeza da demanda.

demanda, mas a possibilidade de operar a baixo custo é reduzida. Assim, a característica da cadeia a ser enfatizada neste trecho é a resposta rápida ao mercado.

### 2.2.2. OPERAÇÕES

Ainda que os conceitos de cadeia de suprimentos reforcem a necessidade de uma visão sistêmica e ampla da cadeia como um todo, por questões práticas, é conveniente segmentá-la em partes de acordo com aspectos relacionados à operação, de forma que a sua caracterização reflita particularidades relevantes ao projeto de rede logística. Do ponto de vista da empresa que é foco do projeto de rede logística, ou simplesmente, empresa focal, a cadeia de suprimentos pode ser dividida em três subsistemas logísticos: suprimento, produção e distribuição (CHING, 2001).

#### 2.2.2.1. SUBSISTEMA DE SUPRIMENTO

O subsistema de suprimento corresponde a parte da cadeia que está a montante da empresa e é responsável pelo processo de fornecimento das plantas industriais por insumos e matérias-primas. Assim, participam deste processo, fornecedores, transportadores e fabricantes.

Em geral, quanto mais a montante da cadeia estiver o fornecedor, mais restritas serão as opções de localização do fabricante, em função da dependência de recursos naturais. É o caso, por exemplo, das atividades de mineração, lavra e manufatura pesada, pois exigem instalações que consomem capital intensivamente, cobrem grandes áreas geográficas e usam grandes quantidades de matérias-primas pesadas e volumosas. Seus processos de produção se desfazem de grandes quantidades de refugo, fazendo com que o total de saídas acabadas pese muito menos do que as entradas totais de matérias-primas, além de seus produtos serem embarcados somente para alguns poucos clientes. Consequentemente, essas instalações tendem a ser localizadas próximo de suas fontes de matérias-prima e não de seus mercados, de forma a minimizar os custos de transporte totais de entradas e saídas (GAITHER e FRAIZER, 2004).

A decisão de localização depende também do poder de barganha de cada estágio na indústria, representado pela porcentagem das compras/vendas de um elo da cadeia em relação a outro. Por exemplo, se as compras de um cliente representam uma porcentagem alta do faturamento de um fornecedor, mas o fornecedor não representa uma porcentagem alta das compras do cliente, diz-se que o cliente representa o elo forte da cadeia. Neste caso, a relação de dependência do fornecedor somada a competição com outros fornecedores, contribuem para que esses busquem localizar suas instalações próximas de seus clientes. Vale ressaltar aqui que a definição de fornecedor e cliente dentro de uma cadeia de suprimento é relativa. Uma planta industrial é, ao mesmo tempo, fornecedora de seus clientes e cliente de seus fornecedores.

Em ambientes de negócios mais agressivos, como na indústria automobilística, as relações fornecedor-cliente e operador logístico-cliente têm se tornado cada dia mais estreita através de parcerias e alianças estratégicas que permitem estabelecer relacionamentos baseados no melhor desempenho da cadeia como um todo. Esta nova postura reflete a política de redução do número de fornecedores e prestadores de serviço e de centralização do suprimento como forma de obter economias de escala em compras e em transportes (ROBLES, 2001).

#### 2.2.2.2. SUBSISTEMA DE PRODUÇÃO

Os produtos, que os consumidores finais adquirem, normalmente não são produzidos numa única instalação. Aparelhos eletrônicos, por exemplo, têm sua montagem final realizada em instalações diferentes de onde seus componentes foram fabricados. Quando estas instalações pertencem a uma mesma empresa, chamamos a esta parte da cadeia de subsistema de produção, por onde fluem produtos em processo e o transporte é dito de transferência.

Esta possibilidade de configuração da cadeia de suprimentos tem impacto direto na análise de um projeto de rede logística, uma vez que influi em fatores como número de estágios do sistema, capacidade das instalações, número de produtos fabricados em cada unidade de produção e a respectiva alocação destes. Portanto, uma representação mais realista da cadeia requer a configuração do fluxo de materiais mesmo entre plantas industriais.

WOUDA *et al* (2002), em um projeto de rede logística na indústria alimentícia, considerou a possibilidade de escolha entre as seguintes estratégias de produção:

- Regionalização x Consolidação;
- Especialização no produto x Especialização no processo;

Na regionalização, cada planta serve a um mercado específico, sendo responsável por atender a demanda daquela região com um leque completo de produtos. Já na consolidação, toda a produção fica centralizada em uma única instalação, sendo responsável por suprir a demanda de todo o mercado atendido pela empresa.

Na estratégia de especialização no produto, cada planta produz um certo grupo de produtos e atende a todo o mercado, enquanto na especialização no processo, cada planta é especializada em certo estágio do processo de produção, como, por exemplo, fabricação de componentes, confecção de módulos e montagem final do produto. Neste caso, o cliente será sempre atendido pela planta do último estágio.

Entretanto, a adoção desta prática e sua consideração no projeto de rede logística exigem o conhecimento sobre o processo de fabricação dos produtos. Além disso, envolve a decisão *make-or-buy*, que não é uma decisão apenas logística.

Por conseguinte, alguns aspectos relacionados à estratégia de produção devem ser levados em consideração (GAITHER e FRAIZER, 2004), tais como:

- Economias de escala;
- Economias de escopo;
- Tecnologia de processo;
- Custos variáveis em função da localização geográfica, etc.

As economias de escala presentes na produção decorrem da redução do custo médio unitário à medida que o volume anual de saídas se eleva, até atingir o melhor nível operacional de uma dada instalação em particular. Assim, as configurações centralizadas em um número reduzido de plantas de grande capacidade, tornam-se mais econômicas. Entretanto, quando as economias de escala não são significativas e os custos de transportes são relevantes, é possível que a rede logística seja composta por um número maior de fábricas de menor capacidade, visando diminuir o custo de transporte.

As economias de escopo, por sua vez, referem-se à capacidade de produzir muitos modelos diferentes de produto numa instalação de produção altamente flexível

a um custo mais baixo do que em instalações de produção separadas. Entretanto, geralmente, produtos com processos de produção muito distintos geram deseconomias de escopo ao serem manufaturados numa mesma instalação, o que favorece a descentralização da produção em unidades especializadas.

Associado a estas duas medidas, deve-se ainda considerar diversas alternativas de tecnologias de processo, dado que influenciam, por exemplo, na capacidade e no *lead time* de produção. Porém, no projeto de rede logística deve-se buscar que todas as instalações de produção sejam planejadas segundo a mesma base tecnológica, a fim de se evitar a formação de estoque a montante de um recurso gargalo.

Além dos aspectos supramencionados, existem custos variáveis em função da localização geográfica das instalações, entre os quais destacam-se:

- Custo da mão-de-obra;
- Custo da terra;
- Custo de energia; e
- Incentivos fiscais.

### 2.2.2.3. SUBSISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Localizado a jusante da empresa na cadeia de suprimentos, refere-se ao conjunto de componentes e atividades envolvidas na entrega de produtos acabados das plantas até os clientes. CHOPRA (2003) identificou seis tipos de configuração possíveis para redes de distribuição, baseadas nos pontos de estocagem e na forma de entrega:

- Estocagem no fabricante com entrega direta;
- Estocagem no fabricante com entrega via CD;
- Estocagem no CD com entrega no varejo;
- Estocagem no CD com entrega direta;
- Estocagem no fabricante/CD com coleta a cargo do cliente; e
- Estocagem no varejo com coleta a cargo do cliente.

A escolha da configuração mais adequada deve levar em consideração o nível de serviço requerido pelos clientes e o custo total da configuração.

A alternativa de estocar produtos no fabricante resulta em baixos custos fixos de instalações por causa da centralização, e conseqüentemente em baixos custos de

estoques pela redução dos níveis de estoque de segurança. Estes benefícios são maiores para produtos de alto valor e baixa demanda em grande variedade, e deve ser considerada apenas quando o cliente admite esperar mais pela entrega.

Entretanto, a entrega direta ao cliente acarreta em custos de transportes mais elevados seja pela maior distância percorrida, pelo uso intensivo de modais mais velozes ou pelo fracionamento da carga. Uma forma de reduzir estes custos é o envio consolidado de produtos fabricados em locais distintos até um CD localizado mais próximo do mercado, para que seja feito o transbordo e a combinação entre cargas destinadas aos mesmos clientes. Esta abordagem é mais apropriada quando há um número reduzido de plantas.

Quando a exigência por menor tempo de entrega aumenta, a estocagem em CDs torna-se uma alternativa mais adequada. Em contrapartida, os custos de estoque e os custos fixos das instalações se elevam como consequência da desagregação da previsão de demanda pelos diversos CDs e da construção ou locação de novas instalações, respectivamente. Esta solução traz mais benefícios no caso de produtos com demanda de média a alta com pequena variedade.

Se o cliente está disposto a coletar o produto no ponto de estocagem, torna-se possível a conciliação entre baixo custo de transporte e de estoque. Entretanto, obviamente, esta estratégia exige a redução dos preços como forma de compensar o esforço adicional dos clientes.

Ainda, pode-se considerar a possibilidade de estocagem no varejo, especialmente para produtos de alta demanda e que exigem alta disponibilidade. Entretanto, com a dispersão ainda maior dos estoques, os custos de estoques se elevam bastante.

### 2.2.3. CUSTOS LOGÍSTICOS

A medida de desempenho mais comum em modelos de otimização da rede logística é o custo. Assim, o conhecimento da classificação geral de custos, dos elementos de composição dos custos logísticos e das compensações de custos entre atividades distintas é de suma importância na análise do projeto de rede logística. Os custos logísticos estão associados às atividades de suprimento, transporte, estoque, armazenagem, manuseio, produção, etc.

### 2.2.3.1. CLASSIFICAÇÃO GERAL DE CUSTOS

Nesta dissertação, são chamados de custos o que a teoria da contabilidade segrega em custos e despesas, onde os custos são gastos relacionados aos processos produtivos e as despesas são gastos incorridos no esforço de obter receitas.

Quanto ao relacionamento com o objeto de custo (cliente, produto ou regiões), segundo FARIA (2003), os custos podem ser classificados em:

- ✓ Custos diretos: São aqueles que podem ser diretamente apropriados a uma atividade, no momento de sua ocorrência.
- ✓ Custos indiretos: São aqueles que não podem ser diretamente apropriados a uma atividade, uma vez que, está associado a recursos que são utilizados em diversas atividades.

Uma forma para classificar os custos como diretos ou indiretos é através do estudo da relação existente de causa e efeito.

Outra classificação relevante dos custos é a realizada em função de seu comportamento diante do volume ou nível de atividade (CSCMP, 2003):

- ✓ Custos fixos: Correspondem a parcela do custo total que independe da variação do volume de atividades para um dado período de tempo. Nas cadeias de suprimentos, tais custos estão associados, por exemplo, aos custos de depreciação de ativos, impostos prediais, energia, etc.
- ✓ Custos variáveis: Correspondem a parcela do custo total que encontra estreita relação com a quantidade de produtos para um determinado período de tempo. Nas cadeias de suprimentos, estão associados, por exemplo, aos custos de combustíveis, mão-de-obra, matérias-primas, etc.

Nas cadeias de suprimento, o volume é um fator preponderante, pois se trabalha muito com volumes produzidos, movimentados, transportados, vendidos, distribuídos, etc. A flexibilidade requerida da rede logística é enorme. Muitas vezes os volumes oscilam acentuadamente, sendo este um dos elementos impulsionadores da terceirização por empresas preocupadas em tornar variáveis seus custos fixos.

Para BALLOU (2001a), todos os custos são em parte fixos e variáveis e a alocação de elementos de custos dentro de uma classe ou de outra é uma questão de perspectiva individual, o que impõem uma designação arbitrária de custos.



## 2.2.3.2. CARACTERÍSTICAS DOS CUSTOS LOGÍSTICOS

### 2.2.3.2.1. CUSTO DE AQUISIÇÃO

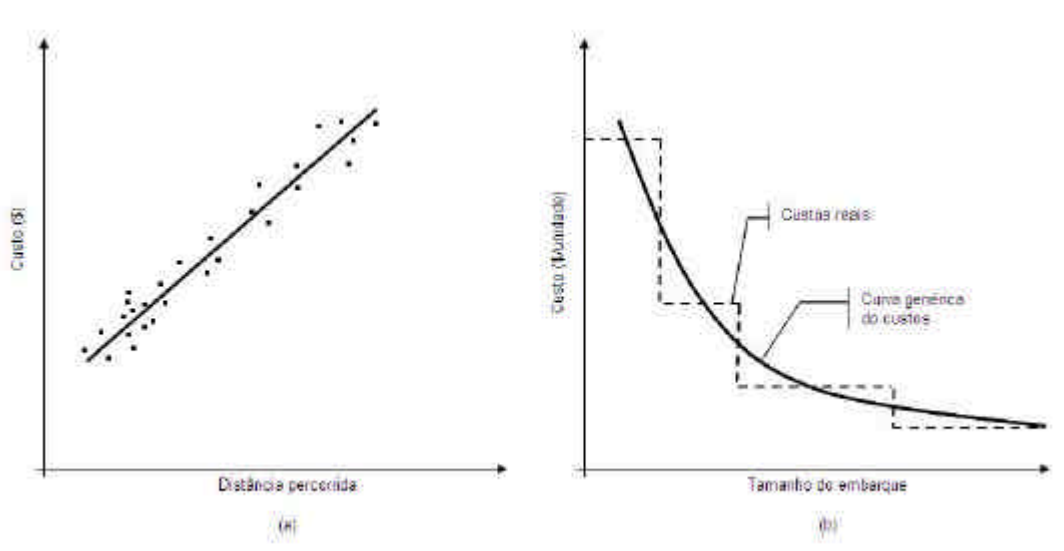
Os custos de aquisição correspondem ao custo de compra da matéria-prima e ao custo administrativo com o processamento do pedido. O custo unitário de compra decresce em relação ao tamanho do pedido devido aos descontos concedidos pelos fornecedores. O custo unitário de processamento de pedido é proporcional ao número de pedidos e inversamente proporcional ao tamanho do pedido.

A determinação do tamanho do pedido depende, por sua vez, da compensação entre custos de transporte e de estoque calculado pelo critério de lote econômico de pedido. Entretanto, do ponto de vista da análise do projeto de rede logística, o custo de aquisição pode ser considerado como uma função linear do volume movimentado entre fornecedores e plantas, onde o custo unitário de aquisição representa o custo médio esperado quando a cadeia estiver em operação.

Entretanto, ainda que este custo seja transferível ao longo da cadeia de suprimentos, a política de precificação adotada pelo fornecedor deve ser considerada na análise. Um fornecedor que vende seus produtos a preço C.I.F. dispensa seus clientes da responsabilidade pelas operações e custos de transportes, enquanto os que vendem a preço F.O.B. exigem que os custos de transporte do fornecedor até as plantas sejam considerados explicitamente.

### 2.2.3.2.2. CUSTO DE TRANSPORTE

Os custos de transporte correspondem ao custo de combustível, mão-de-obra, depreciação, manutenção, seguro do veículo, impostos, pedágios e administração. Um estudo de caso realizado por BALLOU (2001a), os custos de transporte dependem do volume embarcado e da distância percorrida (Vide Fig. 2.3). Uma amostragem realizada das taxas de transporte de caminhão de carga geral para embarques do tipo TL (*truckload*) a várias distâncias entre plantas e CDs revelou que a taxa de transporte pode ser razoavelmente aproximada por uma função linear.



**FIG. 2.3** Relações genéricas de custo de transporte

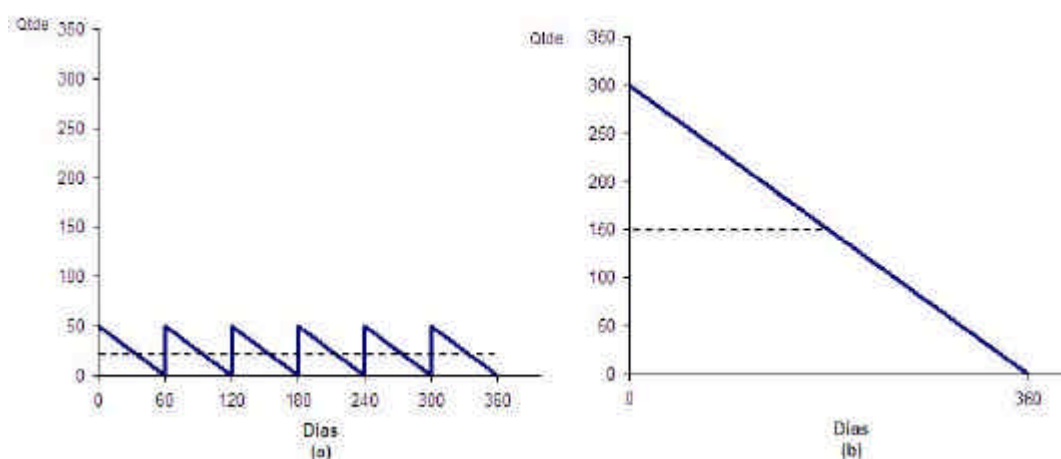
Quando comparados entre os modais de transporte, estes custos não apenas variam muito, como também varia a proporção entre os custos fixos e variáveis. Entretanto, deve-se ressaltar que a decisão de seleção do modal a ser utilizado na rede logística é uma tarefa que exige a consideração não somente de custos, mas também de outras medidas de desempenho, como tempo médio em trânsito, confiabilidade na entrega, índice de perdas de cargas e impactos ambientais. Assim, para fins de análise do projeto de rede logística, pressupõe-se que o serviço esteja disponível, tenha viabilidade técnica de ser utilizado e possa ser fornecido com a frequência mínima necessária para ser cogitado.

Decisões mais detalhadas como dimensionamento da frota, roteirização e programação de veículos e tamanho médio de embarque também influenciam nos custos de transporte, mas devem ser tomadas no âmbito do planejamento tático-operacional da rede.

#### 2.2.3.2.3. CUSTO DE ESTOQUE

Os custos de estoque dependem do estoque médio mantido nos CDs e dos fatores da taxa de estoque que se aplicam ao nível de estoque. Estes fatores incluem o custo de capital (que reflete o custo de oportunidade de manter estoques), de impostos sobre propriedade e de custos de seguro das mercadorias.

O nível de estoque médio, por sua vez, depende da política de estoque adotada pela empresa. Para WANKE (2003), um CD que possua uma determinada demanda anual por um produto, pode considerar diferentes frequências de re-suprimento, impactando diretamente no nível médio de estoque. Isso pode observado na Figura 2.4.



**FIG. 2.4** Exemplificação de políticas de estoque

Além dos estoques mantidos nas instalações, o custo de estoque também pode ser calculado para aqueles itens que se encontram em trânsito dentro dos veículos. Entretanto, diferentemente das instalações, o nível de estoque é constante e igual ao tamanho do pedido.

#### 2.2.3.2.4. CUSTO DE ARMAZENAGEM E MANUSEIO

Os custos de armazenagem e manuseio correspondem aos custos do conjunto de atividades necessárias para manter fisicamente e movimentar dentro das instalações os estoques. São compostos por: custos de depreciação ou aluguel dos CDs, mão-de-obra, equipamentos, administrativo e etc.

Uma empresa pode ter seus custos de armazenagem e manuseio associados a uma taxa cobrada por uma empresa terceirizada que oferece tais serviços ou aos seus próprios custos gerados pelo sistema de armazenagem controlado pela empresa. Outros aspectos como processo de unitização de cargas, leiaute do espaço e tipo de equipamento de estocagem e movimentação influenciam os custos de armazenagem e

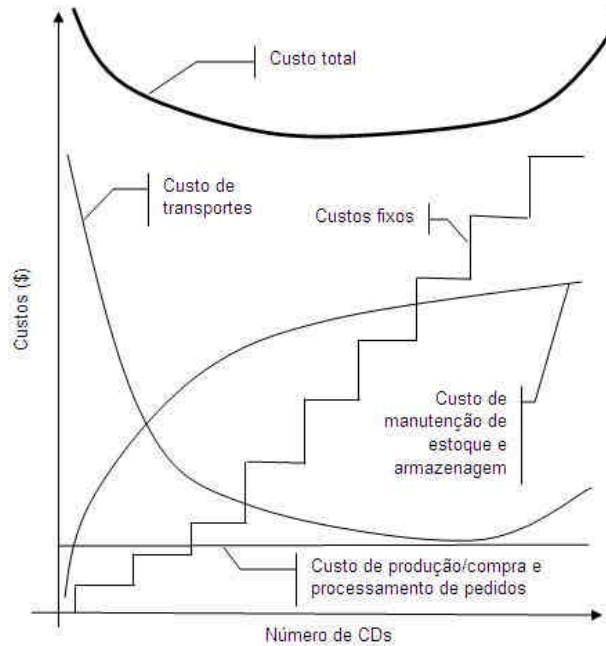
manuseio. Segundo BALLOU (2001a), a combinação entre estes fatores apresenta diferentes níveis de custos fixos e variáveis, fazendo com que sejam justificáveis de acordo com o volume processado.

#### 2.2.3.2.5. CUSTO DE PRODUÇÃO

Os custos de produção correspondem aos custos de instalações, mão-de-obra, equipamentos e administrativos utilizados nas atividades de transformação dos produtos. Ainda que o custo de produção não pertença ao centro de custo responsável pelas atividades logísticas, a consideração deste custo na análise do projeto de rede logística pode ser de grande relevância. Nos casos em que a rede considerada tem como fonte supridora plantas industriais já estabelecidas, o custo variável de produção é a principal parcela do custo a ser considerada, uma vez que, o custo variável unitário depende da planta (localização) e os custos fixos são considerados custos afundados. Em contrapartida, a decisão de construir uma planta nova ou expandir uma existente incorre em um dispêndio fixo ao longo da vida útil da instalação, como parcelas de amortização, depreciação e impostos.

#### 2.2.3.3. CONCEITO DE CUSTO TOTAL

No projeto de rede logística, é essencial a análise de compensações (*trade-off*), que por sua vez, leva ao conceito de custo total. A compensação entre custos é o reconhecimento de que os padrões de custo de várias atividades da empresa apresentam frequentemente características que as põe em conflito entre si. Esse conflito deve ser gerenciado pelo equilíbrio das atividades de forma que elas possam ser otimizadas conjuntamente. A melhor escolha econômica é o ponto mais baixo da curva de custo total, que representa a soma de todos os custos (Ver Fig. 2.5).



**FIG. 2.5** Representação genérica das compensações de custos no problema de localização de instalações

#### 2.2.3.3.1. COMPENSAÇÃO ENTRE CUSTOS DE TRANSPORTE E FIXOS

Assumindo-se a hipótese de um sistema determinístico, onde a taxa de produção, de consumo e os tempos de entrega sejam conhecidos, a análise do projeto de rede logística limita-se a localizar instalações de forma a minimizar os custos fixos de instalações e os custos de transportes associados.

A Figura 2.5 ilustra a compensação entre custos fixos de instalações e os custos de transporte em função do número de instalações na rede. À medida que novas instalações são incorporadas a rede, seus custos fixos associados aumentam. Em contrapartida, o aumento da quantidade de instalações para uma mesma região de demanda aproxima a empresa do mercado, diminuindo os custos de transporte. Entretanto, em determinado ponto, este volta a aumentar pela impossibilidade de formação de embarque de carga completa.

#### 2.2.3.4. Compensação entre custos de transporte e de estoque

Quando o sistema não puder ser considerado determinístico e o custo de estoque for significativo, a análise do projeto de rede logística deve considerar a influência dos estoques na configuração.

A compensação entre custos de transporte e de estoque ocorre em função do número de instalações na rede logística. Quanto maior o número de instalações na rede, o custo de transporte tende a diminuir como dito anteriormente. Em contrapartida, o volume de estoque tende a aumentar devido a desagregação do planejamento de estoque por quantidade maior de pontos.

Além disso, os custos de transporte e de estoque também apresentam comportamento conflitante em função do tamanho do lote de embarque. Na situação em que os clientes compram em pequenas quantidades, que implicam em entregas e/ou menores tempos de suprimento, os custos de transporte são altos devido a dificuldade em aproveitar as economias de escala que podem ser obtidas em grande carregamentos, enquanto o custo de estoque se reduz devido ao alto giro dos produtos. Em oposição, a aquisição de grandes quantidades pelos clientes, resulta em baixos custos unitários de transporte pela consolidação de carga, porém exige alto nível de estoque, resultando em significativo capital imobilizado.

### 2.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em última instância, a rede logística por meio da qual uma empresa opera e atende ao mercado é sua principal fonte de vantagem competitiva. Assim, a revisão da rede deve ser vista como uma importante forma das empresas aumentarem sua rentabilidade, melhorem o nível de serviço oferecido aos clientes e garantirem sua sustentabilidade. Entretanto, isso só será possível, com o correto entendimento dos fatores que influenciam as decisões do projeto de rede logística, dentre eles, os produtos e a demanda associada, os tipos de operações desempenhados e os custos logísticos envolvidos.

No capítulo seguinte será tratada a modelagem matemática de rede logística, apresentando-se o problema de localização de instalações e uma classificação dos modelos existentes de acordo com as características que são incorporadas aos modelos. Além disso, são revisados alguns dos principais modelos desenvolvidos.

### 3. MODELAGEM MATEMÁTICA DE REDES LOGÍSTICAS

Após a descrição do projeto de rede logística e dos aspectos da cadeia de suprimentos que influenciam na sua análise, torna-se preponderante a busca por métodos de solução que obtenham uma configuração eficaz da rede logística.

Assim, neste capítulo são estudados os modelos matemáticos que permitem dar ao projeto de rede logística uma abordagem quantitativa, classificando as características possíveis de ser modeladas e revisando alguns dos modelos existentes.

#### 3.1. PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES

A decisão mais importante do projeto de rede logística pode ser obtida pela solução do problema de localização de instalações. Modelos deste tipo podem ser classificados como contínuos ou discretos. Os modelos contínuos, dentre eles o método do centro de gravidade, determinam as coordenadas dentro de um plano, onde a instalação deve estar localizada de acordo com os pontos de demanda. Enquanto, os modelos discretos têm suas localizações definidas a partir de uma lista pré-selecionada de locais candidatos e aplicam-se a redes de operações.

De acordo com BALLOU (2001b), apesar de os modelos contínuos terem a vantagem de não ficarem limitados a um conjunto de locais candidatos, sua aplicação prática é limitada. Algumas das razões são falta de múltiplos estágios, de restrições da capacidade nas instalações, de restrições de serviço ao cliente e uma variedade de custos de configuração. Entretanto, os modelos contínuos ainda têm seu lugar no problema de localização de instalações, uma vez que podem ser utilizados para sugerir locais candidatos para serem analisados em modelos discretos. Por outro lado, a seleção prévia de locais propícios a receber novas instalações garante que a solução encontrada, além de economicamente ótima, é tecnicamente viável de ser implementada.

Dentre os métodos de solução mais utilizados em problemas de localização discreta estão os métodos heurísticos, a simulação e a otimização, mais especificamente a programação linear inteira mista (PLIM), sendo esta última, a técnica predominante na grande maioria das aplicações (LACERDA, 1999). Uma das suas vantagens principais é a capacidade de modelar adequadamente os custos fixos e

variáveis de uma rede logística. Além disto, por ser uma técnica otimizante, garante que as soluções encontradas são as melhores possíveis dentro do conjunto de premissas adotadas. Sua principal desvantagem é que, dependendo do tamanho do problema, são necessários longos tempos de processamento, podendo até tornar inviável sua resolução.

Os métodos heurísticos, ao contrário, exigem menos recursos computacionais, mas também são menos rigorosos na identificação das melhores alternativas. A heurística busca por uma solução satisfatória ao invés de uma solução ótima, por meio de regras ou conceitos que guiam a resolução do problema baseado num processo de tentativa e erro. O desempenho desta abordagem depende em grande parte da qualidade com que estas regras são criadas (BALLOU, 1989).

A simulação é utilizada para testar o desempenho de configurações selecionadas, possibilitando a reprodução em detalhes do comportamento dinâmico de um sistema real. Entretanto, sua aplicação pode ser considerada limitada quando existe um número elevado de configurações possíveis. Por exemplo, quando se deseja selecionar a localização de um centro de distribuição para a indústria petroquímica dentre cinco alternativas possíveis, o procedimento neste caso seria analisar separadamente por simulação cada uma das cinco alternativas e optar pela que apresentasse o melhor desempenho. Porém, quando se deseja selecionar a localização de cinco centros de distribuição para a indústria alimentícia dentre um conjunto de vinte alternativas possíveis, isso significaria analisar 15.504 configurações diferentes<sup>3</sup>. Além disso, comparado com outras técnicas, são requeridos mais dados, o que exige maior dispêndio de tempo para analisá-los e validá-los.

SHAPIRO (2001) após uma apresentação dos vários modelos existentes na literatura também aponta a PLIM como a mais promissora para a localização de instalações, opinião compartilhada por LACERDA (1999).

Segundo DASKIN (1985) *apud* FREITAS (2004), os problemas de localização discreta podem ainda ser classificados como modelos de cobertura e modelos de *p*-medianas. Problemas de cobertura podem ser formulados como a obtenção do menor número de instalações capaz de atender à demanda de determinada região ou, então, maximizar o atendimento à demanda a partir de um

---

<sup>3</sup> Calculado de acordo com seguinte análise combinatória:  $\binom{20}{5} = \frac{20!}{5!(20-5)!}$



número fixo das instalações. Tais formulações são típicas de problemas do setor público, onde a minimização de custos é uma questão secundária. Em contrapartida, problemas de  $p$ -medianas, que visam minimizar os custos de transporte, tidos como diretamente proporcionais a distância, são aplicáveis ao setor privado, onde o desempenho econômico é o principal objetivo.

Logo, é correto afirmar que o projeto de rede logística pode ser realizado por modelos de localização discreta com o uso de programação matemática, em particular por problemas do  $p$ -medianas, típicos do setor privado. Assim, esta dissertação limitar-se-á a revisão de modelos de programação matemática, cujo estudo é indispensável para o tema em questão. Após definir os critérios de classificação mais importantes na modelagem com programação matemática, os modelos mais representativos são revisados, onde se busca revelar a forma como a complexidade das cadeias de suprimento vem sendo inserida nos modelos de otimização, tornando-se aplicáveis em situações mais gerais.

### 3.2. CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

A literatura a respeito de modelos de programação matemática aplicado ao problema do projeto de rede logística é vasta, tendo sido, portanto, objeto de revisão de outros pesquisadores, como BRANDEAU e CHIU (1989), GEOFFRION e POWERS (1995), VIDAL e GOETSCHALCKX (1997) e SMITS (2001).

BRANDEAU e CHUI (1989) fizeram uma revisão abrangente sobre modelos de localização em geral e estabeleceram uma taxonomia completa de acordo com suas características. Todavia, não ativeram seu estudo na revisão de modelos voltados especificamente para o projeto de rede logística.

GEOFFRION e POWERS (1995), com base em duas décadas de experiência na área de pesquisa e consultoria, apontaram uma perspectiva evolutiva para o projeto de rede logística. Dentre alguns dos fatores que contribuíram para isso, os autores citaram a evolução dos algoritmos, da estrutura dos modelos, das ferramentas de coleta e armazenamento de dados, dos softwares e da importância da própria logística no ambiente empresarial. Eles afirmaram que a consideração do nível de serviço ao cliente irá permanecer como o aspecto mais fundamental para a pesquisa. Entretanto,

não se aprofundaram em detalhes de modelagem, referindo-se apenas aos principais modelos.

VIDAL e GOETSCHALCKX (1997) realizaram uma ampla revisão de modelos aplicados especificamente ao projeto de rede logística, especialmente os modelos de PLIM. Seguindo uma apresentação cronológica, os autores descreveram as principais características dos modelos. Ao final, estas informações são tabuladas para permitir a sua comparação.

SMITS (2001), tendo em vista o desenvolvimento de novo modelo matemático que mantivesse alinhadas decisões de nível estratégico e tático, apresentou uma revisão bibliográfica dos modelos de acordo com suas características.

A revisão realizada nesta dissertação reúne a taxonomia sugerida por esses autores em suas pesquisas. Entretanto, diferentemente de algumas dessas revisões, voltadas para o desenvolvimento de novos modelos e algoritmos, este trabalho não se detém ao estado da arte na modelagem. Assim, os principais critérios de classificação dos modelos de programação matemática são os enumerados a seguir:

- Problemas capacitados e não-capacitados;
- Número de produtos movimentados;
- Número de períodos de planejamento;
- Número de estágios intermediários;
- Tipos de instalações a serem localizadas;
- Restrições de atendimento ao mercado;
- Abrangência geográfica;
- Flexibilidade de modelagem;
- Outros critérios.

### 3.2.1. PROBLEMAS CAPACITADOS E NÃO-CAPACITADOS

Esta classificação relaciona-se à existência ou não de restrições de capacidade às instalações. Além disso, é possível adicionar mais duas características a este critério no caso dos problemas capacitados. Modelos mais complexos podem considerar, para uma mesma localização, a possibilidade de escolha entre diferentes portes de instalação, atribuindo os respectivos custos e capacidades. Esta consideração parte do princípio de que existem economias de escala significativas. Da mesma

forma, novas instalações podem também estar restritas a níveis mínimos de capacidade que justifiquem a sua abertura.

### 3.2.2. NÚMERO DE PRODUTOS MOVIMENTADOS

Os modelos mais antigos consideram que custos, demandas e capacidades de vários produtos podem ser agregados como um único produto. Esta simplificação é adequada no caso de produtos com características de demanda e de operação semelhantes. Mas, na medida em que essas semelhanças diminuem, a exatidão da solução tende a reduzir consideravelmente.

Nestes casos, um modelo de múltiplos produtos torna-se mais adequado, onde uma dimensão extra é adicionada a variável de decisão para possibilitar que o modelo considere mais de um produto. Entretanto, a consideração individual de cada produto pode tornar o problema muito complexo, devido ao grande número de variáveis. Logo, é recomendável que os produtos sejam agregados em famílias de produtos, de forma que os produtos de uma mesma família tenham características semelhantes entre si e distintas com produtos de outras famílias.

### 3.2.3. NÚMERO DE PERÍODOS DE PLANEJAMENTO

Este critério serve para classificar os modelos como dinâmicos ou estáticos. Quando os parâmetros do modelo são estacionários, ou seja, referentes a um único período, o comportamento do sistema pode ser representado por um modelo estático. Caso contrário, requer-se o uso de modelos dinâmicos, capazes de levar em consideração os efeitos da sazonalidade dentro de um período ou a evolução dos parâmetros em múltiplos períodos.

### 3.2.4. NÚMERO DE ESTÁGIOS INTERMEDIÁRIOS

Estágio intermediário pode ser definido como sendo o conjunto de instalações do mesmo nível hierárquico entre a origem supridora e o mercado consumidor. Um modelo sem estágios intermediários, por exemplo, é um modelo sem centros de distribuição, cujo problema é alocar os clientes às fábricas. Já em um modelo de múltiplos estágios, é definido que a primeira camada de centros de distribuição

entregará aos clientes, a segunda camada entregará a primeira e assim sucessivamente. Assim, o modelo deve refletir a cadeia de suprimentos com tanto estágios intermediários quantos forem necessários e/ou possíveis.

### 3.2.5. TIPOS DE INSTALAÇÕES A SEREM LOCALIZADAS

Modelos que incluem a decisão de localização de instalações de produção levam em conta os custos de produção e restrições que expressem que os produtos são combinações de matérias-primas/produtos intermediários, além da localização de seus fornecedores. Entretanto, modelos cujo principal tipo de instalação a ser localizada é um centro de distribuição, a localização das plantas industriais é considerada dado de entrada.

### 3.2.6. RESTRIÇÕES DE ATENDIMENTO AO MERCADO

ARNTZEN *et al* (1995) observou que as características de modelagem da rede logística divergem de acordo com a estratégia adotada pela empresa para o atendimento ao mercado. Em uma delas, quando se deseja que os clientes tenham seus pedidos atendidos por uma única instalação, é adicionada uma restrição de alocação dos clientes às instalações. Enquanto que, quando os clientes podem ser atendidos por mais de um centro de distribuição, esta restrição não está presente.

Esta lógica também é válida quando se deseja que produtos e instalações estejam vinculados. Uma rede logística onde os produtos são supridos por uma única instalação é chamada de rede divergente e essa é uma importante propriedade no gerenciamento de estoques.

### 3.2.7. ABRANGÊNCIA GEOGRÁFICA

A grande maioria dos modelos de projeto de rede logística foi desenvolvida para empresas cuja área de atuação tivesse abrangência nacional. Entretanto, segundo BEAMON (1998), com o crescimento da globalização dos mercados e da internacionalização das empresas, é crescente o número de modelos que levam em consideração as particularidades das cadeias de suprimento internacionais, que afetam

o desempenho do sistema, como impostos de importação/exportação, taxas de câmbio e regionalização de produtos.

### 3.2.8. FLEXIBILIDADE DE MODELAGEM

Este critério refere-se à possibilidade do modelo considerar particularidades da cadeia de suprimento ou condições especiais de operação da empresa, tais como:

- Restrições de serviço ao cliente;
- Incorporação de restrições arbitrárias, como a abertura obrigatória de instalações;
- Alocações compulsórias entre fornecedores e plantas, plantas e CDs, plantas e cliente e/ou CDs e clientes;
- Consideração da prática de *postponement*.

### 3.2.9. OUTROS CRITÉRIOS

Além dos critérios anteriormente mencionados, podem ainda os modelos de programação matemática ser classificados pela:

- Função-objetivo;
- Existência de parâmetros estocásticos;
- Linearização de custos.

## 3.3. REVISÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS EXISTENTES

Os primeiros modelos encontrados na literatura remontam à década de 60 como EFROYNSON e RAY (1966) e SPIELBERG (1969). Nestas últimas quatro décadas, muito tem sido estudado e vários modelos têm sido desenvolvidos tanto no exterior (ELLWEIN e GRAY, 1971; GEOFFRION e GRAVES, 1974; ERLKOTTER, 1978; GLOVER, 1979; BROWN *et al*, 1987; LOVE *et al*, 1988; JAYARAMAN, 1998; DOGAN e GOETSCHALCKX, 1999; KARAKABAL *et al*, 2000; GOETSCHALCKX *et al*, 2002; JANG *et al*, 2002; WOUDA *et al*, 2002; AMBROSINO e SCUTELLÀ, 2005; CROXTON e ZINN, 2005) como no Brasil (MARTOS, 2000; BRITO JUNIOR, 2004; FREITAS, 2004).

### 3.3.1. PROBLEMAS NÃO-CAPACITADOS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES

O problema de  $p$ -medianas consiste na localização de  $p$  instalações numa rede logística, com o objetivo de minimizar o custo de transporte (proporcional à distância). Considera as seguintes premissas gerais: as demandas são determinísticas e agregadas por regiões; as distâncias de transporte são calculadas em relação ao centróide ou ao maior consumidor da zona de consumo; o conjunto de localizações possíveis é conhecido; e as instalações são consideradas de capacidade ilimitada.

Esta formulação pressupõe que os custos fixos das instalações sejam irrelevantes para a solução do problema, isto é, que sejam desprezíveis em relação ao custo total, ou idênticos para todas as instalações. A formulação é dada por:

$$\text{Min } Z = \sum_{i,j} c_{ij} x_{ij} \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_i x_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (3.2)$$

$$\sum_i y_i = p \quad (3.3)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \forall i, j \quad (3.4)$$

$$x_{ij}, y_i \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (3.5)$$

Onde:

$c_{ij}$  Custo de transporte da instalação  $i$  para a zona de consumo  $j$ .

$x_{ij}$  Percentual da demanda da zona de consumo  $j$  atendida pela instalação  $i$ .

$y_i$  Variável indicadora da abertura (1) ou não (0) da instalação  $i$ .

A restrição (3.2) indica que a zona de consumo precisa ser atendida apenas por uma instalação, a (3.3) define o número de instalações a serem abertas, a (3.4) estabelece restrições lógicas de que só deve haver alocação se uma instalação for aberta e (3.5) indica que as variáveis são binárias.

Entretanto, para suprir os casos em que a inclusão dos custos fixos se fazia necessária, EFROYMSON e RAY (1966) propuseram um modelo, que posteriormente foi aperfeiçoado por ERLINKOTTER (1978). Sua formulação é dada por:

$$\text{Min } Z = \sum_{i,j} c_{ij}x_{ij} + \sum_i f_i y_i \quad (3.6)$$

Sujeito a:

$$\sum_i x_{ij} = 1 \quad \forall j \quad (3.7)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \forall i, j \quad (3.8)$$

$$x_{ij} \geq 0, \forall i, j; y_i \in \{0,1\}, \forall i \quad (3.9)$$

Onde:

$f_i$  Custo de fixo de abertura e operação da instalação  $i$ .

Este problema não possui restrições quanto ao número de instalações abertas, entretanto com a consideração dos custos fixos na função objetivo (3.6), a solução ótima buscará conciliá-los com os custos de transporte.

A aplicabilidade deste modelo limita-se a problemas onde os custos fixos não variam em função do porte da planta. Caso contrário, ao empregar um modelo não-capacitado é preferível empregar um problema de  $p$ -medianas e acrescentar posteriormente os custos fixos, já considerando o porte da instalação.

### 3.3.2. PROBLEMAS CAPACITADOS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES

A categoria de problemas de localização anterior pressupõe que a instalação aberta será capaz de suprir as zonas de consumo designadas. Todavia, premissas mais realistas devem impor limites mínimos para a abertura de uma instalação, bem como capacidades máximas de atendimento. A primeira formulação eficiente de modelo capacitado de localização de instalações foi proposta por ELLWEIN e GRAY (1971) e consistem em:

$$\text{Min } Z = \sum_{i,j} c_{ij}x_{ij} + \sum_i f_i y_i \quad (3.10)$$

Sujeito a:

$$\sum_i x_{ij} \geq D_j \quad \forall j \quad (3.11)$$

$$\sum_j x_{ij} \leq \bar{V}_i y_i \quad \forall i \quad (3.12)$$

$$\sum_i y_i \leq p \quad \forall i \quad (3.13)$$

$$x_{ij} \geq 0, \forall i, j; y_i \in \{0,1\}, \forall i \quad (3.14)$$

Onde:

$x_{ij}$  Quantidade de fluxo de materiais da instalação  $i$  para a zona de consumo  $j$ .

$D_j$  Demanda da zona de consumo  $j$ .

$\bar{V}_i$  Capacidade máxima da instalação  $i$ .

$p$  Número máximo de instalações a serem abertas.

O problema consiste na minimização dos custos de transporte e de abertura e operação de uma instalação, podendo incluir, ainda, os custos de armazenagem e manuseio. A restrição (3.11) determina que toda a demanda deve ser atendida, (3.12) limita a capacidade de movimentação/produção da instalação, sendo possível incluir limites inferiores de movimentação para a abertura de uma instalação. Esta restrição implica também em restrições lógicas ao sistema, cujas instalações só poderão movimentar/fabricar produtos se estiverem abertas. A restrição (3.13) limita o número de instalações a serem abertas, de forma similar à restrição (3.3) do problema de  $p$ -medianas.

Este modelo é aplicável quando as decisões de localização podem ser definidas somente em função do mercado. Porém, esta formulação permite localizar apenas um tipo de instalação no sistema logístico, inviabilizando configurar uma cadeia de suprimentos, principalmente, CDs e armazéns que recebam carga de instalações da própria organização, por não incluir custos associados ao transporte de entrada. Ao incorporar restrições de capacidade, os modelos matemáticos de localização foram capazes de definir também as capacidades ótimas de cada instalação, ampliando a sua aplicabilidade no suporte a decisões estratégicas.

### 3.3.3. PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES INTERMEDIÁRIAS

Os modelos apresentados até agora não são adequados para localizar instalações em estágios intermediários da cadeia de suprimentos recebendo fluxos físicos de entrada. Surgiram, então, as formulações com estágios intermediários, capazes de equilibrar os custos de transporte de entrada com os de saída.

A primeira formulação para este problema foi proposta por ELLWEIN e GRAY (1971), no mesmo artigo:



$$\text{Min } Z = \sum_{h,i} c'_{hi} x'_{hi} + \sum_{i,j} c_{ij} x_{ij} + \sum_i f_i y_i \quad (3.15)$$

Sujeito a:

$$\sum_i x_{ij} \geq D_j \quad \forall j \quad (3.16)$$

$$\sum_j x_{ij} \leq \bar{V}_i y_i \quad \forall i \quad (3.17)$$

$$\sum_i x'_{hi} \leq S_h \quad \forall h \quad (3.18)$$

$$\sum_h x'_{hi} = \sum_j x_{ij} \quad \forall i \quad (3.19)$$

$$x'_{hi}, x_{ij} \geq 0, \forall i, j; y_i \in \{0,1\}, \forall i \quad (3.20)$$

Onde:

$c'_{hi}$  Custo de transporte do fornecedor  $h$  para a instalação  $i$  (podendo incluir ainda o custo de aquisição).

$x'_{hi}$  Quantidade de fluxo do fornecedor  $h$  para a instalação  $i$ .

$S_h$  Disponibilidade máxima de material no fornecedor  $h$ .

O modelo (3.15) a (3.20) é bastante semelhante ao modelo (3.10) a (3.14). Além da parcela relacionada aos custos de transporte de materiais do fornecedor  $h$  até a instalação  $i$ , foram adicionadas as restrições de capacidade de suprimento do fornecedor (3.18) e de equilíbrio de fluxo de materiais recebidos e expedidos nas instalações intermediárias (3.19).

Este modelo possui grande aplicação prática, pois implica em localizar instalações considerando o fluxo de materiais recebidos dos fornecedores e enviados para os clientes. Permite, assim, localizar CDs ou outras instalações intermediárias, que recebam carga de outra instalação da própria organização.

### 3.3.4. PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES CONSIDERANDO O FLUXO DE MÚLTIPLOS PRODUTOS

Tais modelos ainda possuíam a limitação de considerar o fluxo de apenas um único produto (ou um produto genérico) dentro da rede. Isso certamente torna estes modelos extremamente simplistas diante das cadeias de suprimentos reais, por onde

são movimentados inúmeros produtos, cujos fluxos podem diferir bastante em termos de demanda (quantidade e destino) e disponibilidade (quantidade e origem).

A primeira formulação eficiente para este tipo de modelo foi proposta por GEOFFRION e GRAVES (1974), consistindo da minimização dos custos de transporte entre plantas e CDs e entre CDs e clientes, custos de manuseio de cargas no CD e custos fixos de abertura de CDs. O modelo também pode custear economias com o fechamento de CDs, sendo a formulação é dada por:

$$\text{Min } Z = \sum_{ijkl} c_{ijkl} x_{ijkl} + \sum_k \left[ f_k z_k + v_k \sum_{il} D_{il} y_{kl} \right] \quad (3.21)$$

Sujeito a:

$$\sum_{kl} x_{ijkl} \leq S_{ij} \quad \forall i, j \quad (3.22)$$

$$\sum_j x_{ijkl} \geq D_{il} y_{kl} \quad \forall i, k, l \quad (3.23)$$

$$\sum_k y_{kl} = 1 \quad \forall i, j \quad (3.24)$$

$$\underline{V}_k z_k \leq \sum_{il} D_{il} y_{kl} \leq \bar{V}_k z_k \quad \forall k \quad (3.25)$$

$$x_{ijkl} \geq 0, \forall i, j, k, l; z_k \in \{0,1\}, \forall k; y_{kl} \in \{0,1\}, \forall k, l \quad (3.26)$$

Onde:

- $i$  Índice para produtos
- $j$  Índice para plantas industriais
- $k$  Índice para possíveis centros de distribuição
- $l$  Índice para zonas de consumo
- $s_{ij}$  Oferta (capacidade de produção) do produto  $i$  na planta  $j$
- $D_{il}$  Demanda do produto  $i$  na zona de consumo  $l$
- $\underline{V}_k$  Movimentação mínima no CD  $k$
- $\bar{V}_k$  Movimentação máxima no CD  $k$
- $f_k$  Custos fixos do CD  $k$
- $v_k$  Custo variável de movimentação no CD  $k$
- $c_{ijkl}$  Custo médio de produção e transporte do produto  $i$  na planta  $j$ , distribuído pelo CD  $k$  à zona de consumo  $l$

- $x_{ijkl}$  Quantidade do produto  $i$  enviado da planta  $j$  para a zona de consumo  $l$  pelo CD  $k$
- $y_{kl}$  Variável binária que indica se o CD  $k$  serve a zona de consumo  $l$  (1) ou não (0)
- $z_k$  Variável binária que indica se CD  $k$  é aberto (1) ou não (0)

Nesta formulação, as variáveis de decisão são fluxos de produtos que percorrem a rede (do produtor ao cliente), além das variáveis indicadoras de alocação de um CD a uma zona de consumo e de abertura de CDs.

São parcelas do custo total (3.21), respectivamente: o custo de transportes, considerado proporcional ao fluxo; custos de instalação do CD, fixos mais variáveis (proporcionais à demanda atendida).

São impostas restrições de limite superior de oferta de produção (3.22), restrições de atendimento à demanda (3.23), restrições de atendimento à zona de consumo (3.24) e restrições de capacidade mínima e máxima para um CD (3.25). Além disso, são acrescentadas restrições de não negatividade e integralidade para as variáveis (3.26).

Tal modelo permite, ainda, a inclusão de outras restrições, como:

- Limites inferiores e superiores ao número de CDs abertos (restrições orçamentárias);
- Restrições à abertura de CDs num determinado subconjunto de possíveis locações;
- Alocação prévia de zona de consumo a CD;
- Restrições de capacidade combinada de CDs; e
- Restrições de nível de serviço expressas por:

$$\sum_{kl} t_{ikl} D_{il} y_{kl} / \sum_l D_{il} \leq T_i \quad (3.27)$$

Onde:

$t_{ikl}$  Tempo médio de entrega do produto  $i$  à zona de consumo  $l$  pelo CD  $k$

$T_i$  Tempo médio de entrega do produto  $i$

Ao trabalhar com variáveis de decisão que representam o fluxo desde a planta até o cliente final, é possível limitar o tempo do ciclo do pedido no atendimento ao cliente e modelar estratégias combinadas de entrega de itens.

Da forma como foi modelado, o problema pode ser decomposto num problema de transporte (considerando  $z_k$  e  $y_{kl}$  fixos e viáveis) e um problema de localização.

Devido à restrição de atendimento dos clientes por apenas um CD, o problema de transporte é facilmente solucionável para cada produto  $i$  de forma independente.

Em trabalhos posteriores, o modelo de GEOFFRION e GRAVES (1974) foi ampliado para configurar cadeias com mais de um estágio, ou seja, uma cadeia que possa localizar plantas de fabricação de componentes e de montagem de produtos finais e, concomitantemente, localizar CDs centrais e regionais.

### 3.3.5. PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES DE PRODUÇÃO

Embora os modelos matemáticos até então desenvolvidos tivessem sido idealizados para quaisquer tipos de instalações, estudos de localização de plantas industriais difere sobremaneira da determinação dos melhores locais para armazéns e centros de distribuição. Conforme discutido no capítulo anterior, o subsistema de produção apresenta particularidades que devem ser consideradas no projeto de rede logística, tais como as economias/deseconomias de escala e de escopo.

BROWN *et al.* (1987) propuseram um modelo que permite planejar quais instalações colocar em cada planta industrial e limitar o número de produtos a ser produzido numa instalação, através de uma adaptação do modelo de GEOFFRION e GRAVES (1974).

A formulação é dada por:

$$\text{Min } z = \sum_{i,j,k,l} x_{ijkl} (c_{ijk} + f_{ikl}) + \sum_{j,k} G_{jk} w_{jk} + \sum_k F_k z_k \quad (3.28)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j,k} x_{ijkl} = D_{il} \quad \forall i, l \quad (3.29)$$

$$\sum_l x_{ijkl} \leq s_{ijk} \quad \forall i, j, k \quad (3.30)$$

$$\underline{V}_{jk} w_{jk} \leq \sum_i s_{ijk} / Y_{ijk} \leq \bar{V}_{jk} w_{jk} \quad \forall j, k \quad (3.31)$$

$$\underline{V}_{jk} w_{jk} \leq \sum_i U_{ijk} s_{ijk} \leq \bar{V}_{jk} w_{jk} \quad \forall j, k \quad (3.32)$$

$$\underline{N}_k z_k \leq \sum_j w_{jk} \leq \bar{N}_k z_k \quad \forall k \quad (3.33)$$

$$\sum_k w_{jk} = 1 \quad \forall j \quad (3.34)$$

$$x_{ijkl} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l; \quad 0 \leq s_{ijk} \leq S_{ijk}, \quad \forall i, j, k; \quad w_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall j, k; \quad z_k \in \{0,1\} \quad \forall k \quad (3.35)$$

Onde:

- $i$  Índice para produtos
- $j$  Índice para facilidades
- $k$  Índice para plantas industriais
- $l$  Índice para zonas de consumo
- $D_{il}$  Demanda do produto  $i$  na zona de consumo  $l$
- $\underline{V}_{jk}$  Capacidade mínima da facilidade  $j$  na planta  $k$
- $\bar{V}_{jk}$  Capacidade máxima da facilidade  $j$  na planta  $k$
- $Y_{ijk}$  Rendimento do produto  $i$  quando processado na facilidade  $j$  da planta  $k$
- $U_{ijk}$  Utilização da facilidade  $j$  pelo produto  $i$  na planta  $k$
- $\underline{N}_k$  Número mínimo de plantas
- $\bar{N}_k$  Número máximo de plantas
- $S_{ijk}$  Capacidade de produção para o produto  $i$  na facilidade  $j$  da planta  $k$
- $c_{ijk}$  Custo médio variável de produção do produto  $i$  na facilidade  $j$  da planta  $k$
- $f_{ikl}$  Custo médio de transporte do produto  $i$  da planta  $k$  para a zona de consumo  $l$
- $G_{jk}$  Custo fixo anual de operação da facilidade  $j$  na planta  $k$
- $F_k$  Custo fixo anual de operação da planta  $k$
- $x_{ijkl}$  Quantidade do produto  $i$  produzido pela facilidade  $j$  da planta  $k$  e enviado para a zona de consumo  $l$
- $s_{ijk}$  Quantidade do produto  $i$  produzido pela facilidade  $j$  da planta  $k$
- $w_{jk}$  Variável binária que indica se a facilidade  $j$  é alocada à planta  $k$  (1) ou não (0)
- $z_k$  Variável binária que indica se a planta  $k$  é aberta (1) ou não (0)

O problema consiste em minimizar os custos de produzir e distribuir o produto  $i$ , somados aos custos fixos de abertura da planta  $k$  e da alocação da facilidade  $j$ , sujeito ao atendimento da demanda das zonas de consumo (3.29), às restrições lógicas de que o produto só pode ser distribuído se for produzido (3.30), aos limites de capacidade das facilidades, tanto no que se refere ao rendimento do processo quanto à

utilização dos equipamentos (3.31 e 3.32), às imposições orçamentárias (3.33) e às restrições de que uma facilidade seja alocada apenas a uma instalação (3.34).

Apesar das hipóteses mais realistas, o modelo de BROWN *et al.* (1987) não é capaz de configurar a cadeia de suprimento inteira, pressupondo que todas as remessas são feitas diretamente das plantas para o consumidor.

### 3.3.6. PROBLEMAS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES CONSIDERANDO CUSTOS DE ESTOQUE

Ainda que fosse sabido da existência de *trade-off* entre os custos de transporte e de estoques, os modelos até então desenvolvidos negligenciavam a influência dos custos de estoque na configuração da rede logística.

JAYARAMAN (1998) propôs um modelo que permite minimizar os custos logísticos totais, levando em consideração os custos de estoques.

A formulação é dada por:

$$\text{Min } z = \sum_j F_j z_j + \sum_{i,j,l,r} (T_{ijlr} + C_{lr} L_{ijlr} + \frac{CP_{il}}{2.F_{ijlr}} + \frac{CW_{il}}{2.F_{ijlr}}) x_{ijlr} + \sum_{j,k,l,r} d_{jklr} y_{jklr} + \sum_i O_i p_i \quad (3.36)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j,r} y_{jklr} = D_{kl} \quad \forall k,l \quad (3.37)$$

$$\sum_{k,l,r} y_{jklr} \leq W_j z_j \quad \forall j \quad (3.38)$$

$$\sum_j z_j \leq NW \quad (3.39)$$

$$\sum_k y_{jklr} \leq \sum_i x_{ijlr} \quad \forall l,r,j \quad (3.40)$$

$$\sum_{j,r,l} x_{ijlr} \leq G_i p_i \quad \forall i \quad (3.41)$$

$$\sum_i p_i \leq NP \quad (3.42)$$

$$x_{ijlr}, y_{jklr} \geq 0, \forall i,j,k,l,r; z_j, p_i \in \{0,1\}, \forall i,j \quad (3.43)$$

Onde:

$T_{ijlr}$  Custo unitário de transporte do produto  $l$  da planta  $i$  para o CD  $j$  pelo transporte  $r$

- $F_{ijlr}$  Frequência de embarque do produto  $l$  da planta  $i$  para o CD  $j$  usando o transporte  $r$
- $d_{jklr}$  Custo unitário de transporte do produto  $l$  da planta  $i$  para o CD  $j$  pelo transporte  $r$
- $L_{ijlr}$  Tempo de entrega médio do produto  $l$  da planta  $i$  para o CD  $j$  pelo transporte  $r$
- $L_{ijlr}$  Tempo de entrega médio do produto  $l$  da planta  $i$  para o CD  $j$  pelo transporte  $r$
- $CP_{il}$  Custo de estoque, armazenagem e manuseio do produto  $l$  na planta  $i$
- $CW_{jl}$  Custo de estoque, armazenagem e manuseio do produto  $l$  no CD  $j$
- $C_{lr}$  Custo de estoque em trânsito do produto  $l$  no transporte  $r$  por unidade de tempo
- $D_{kl}$  Demanda pelo produto  $l$  na zona de consumo  $k$
- $W_j$  Capacidade do CD  $j$
- $G_i$  Capacidade da planta  $i$
- $F_j$  Custo fixo de abertura e operação do CD  $j$
- $O_i$  Custo fixo de abertura e operação da planta  $i$
- $NW$  Número de CDs a abrir
- $NP$  Número de plantas a abrir
- $x_{ijlr}$  Quantidade do produto  $l$  embarcado da planta  $i$  para o CD  $j$  pelo transporte  $r$
- $y_{jklr}$  Quantidade do produto  $l$  embarcado do CD  $j$  para a zona de consumo  $k$  pelo transporte  $r$
- $z_j$  Variável binária que indica se o CD  $j$  é aberto (1) ou não (0)
- $p_i$  Variável binária que indica se a planta  $i$  é aberta (1) ou não (0)

O problema consiste em minimizar os custos de transporte entre plantas e CDs e entre CDs e zonas de consumo, de abertura e operação de instalações (plantas e CDs) e de estoques médios nas instalações e em trânsito. Quanto às restrições, nenhuma impõe novas condições à configuração da rede, quando comparadas com as até então apresentadas. Entretanto, a inclusão dos custos de estoque, permite a avaliação de diferentes tipos de transporte, pela possibilidade de consideração dos *trade-offs* existentes.

Entretanto, ainda que mais realista, o modelo de JAYARAMAN (1998) ignora a existência de estoques de segurança. Posteriormente, CROXTON e ZINN (2005) viriam a considerar explicitamente a influência da centralização/descentralização dos estoques na configuração de uma rede logística.

A formulação é dada por:

$$\text{Min } z = \sum_j F_j y_j + \sum_{i,j,h} T_{ij} v_{ijh} + \sum_{j,k,h} T_{jk} x_{ijh} + \sum_{s,h} I_{sh} w_{sh} \quad (3.44)$$

Sujeito a:

$$\sum_i v_{ijh} = \sum_k x_{ijh} \quad \forall j, h \quad (3.45)$$

$$\sum_i v_{ijh} \leq C_{ih} \quad \forall i, h \quad (3.46)$$

$$\sum_i x_{ijh} \geq D_{kh} \quad \forall k, h \quad (3.47)$$

$$v_{ijh} \leq C_{ih} y_{ih} \quad \forall i, j, h \quad (3.48)$$

$$x_{ijh} \leq D_{kh} y_{ih} \quad \forall j, k, h \quad (3.49)$$

$$y_{jh} \leq y_j \quad \forall j, h \quad (3.50)$$

$$\sum_j y_{jh} = \sum_s S w_{sh} \quad \forall h \quad (3.51)$$

$$\sum_s w_{sh} = 1 \quad \forall h \quad (3.52)$$

Onde:

- $F_j$  Custo fixo de abertura e operação do CD  $j$
- $T_{ij}$  Custo de transporte entre o fornecedor  $i$  e o CD  $j$
- $T_{jk}$  Custo de transporte entre o CD  $j$  e a zona de consumo  $k$
- $C_{ih}$  Capacidade do fornecedor  $i$  para o produto  $h$
- $D_{kh}$  Demanda do produto  $h$  na zona de consumo  $k$
- $I_{sh}$  Custo de estoque do produto  $h$  em  $S$  CDs (equivale ao  $SS_n$  e é calculado usando a equação (3.53))
- $v_{ijh}$  Quantidade de produtos  $h$  embarcados entre fornecedor  $h$  e CD  $j$
- $x_{jkh}$  Quantidade de produtos  $h$  embarcados entre CD  $j$  e zona de consumo  $k$
- $y_j$  Variável binária que indica se o CD  $j$  é selecionado (1) ou não (0)



$y_{jh}$  Variável binária que indica se o CD  $j$  é selecionado para armazenar o produto  $h$  (1) ou não (0)

$w_{sh}$  Variável binária que indica se  $S$  CDs são abertos (1) ou não (0)

A função objetivo (3.44) minimiza a soma dos custos fixos de abertura e operação dos CDs, dos custos de transporte entre plantas e CDs e entre CDs e zonas de consumo, e custos de estoque médio e de segurança. Para isso, eles consideraram no cálculo do custo de estoque, o uso da “Regra da raiz quadrada”. Modelo que tem como premissas a variância igual e a independência da demanda entre os produtos. Premissas consideradas razoáveis para o nível de agregação requerido no projeto de rede logística.

O modelo de custo de estoque segundo a “Regra da raiz quadrada” (MAISTER, 1976 *apud* CROXTON e ZINN, 2005) é dada por:

$$SS_n = SS_1 \sqrt{n} \quad (3.53)$$

Onde:

$SS_n$  Estoque de segurança requerido na rede se o estoque é descentralizado em  $n$  CDs.

$SS_1$  Estoque de segurança requerido se o estoque é centralizado em um único CD.

A equação para  $SS_1$  é dada por:

$$SS_1 = k \sqrt{t s_d^2 + d^2 s_t^2} \quad (3.54)$$

Onde:

$k$  Número de desvios-padrão da demanda requerido para um dado nível de serviço

$t$  Tempo de entrega médio (em dias)

$s_d$  Desvio-padrão da demanda diária

$d$  Demanda média diária

$s_t$  Desvio-padrão do tempo de entrega (em dias)

Na prática, tal flexibilidade é limitada, pois o modelo assume que o tempo de entrega médio de todos os CDs é igual e independe do número de CDs. Mas esta simplificação pode ser admitida, pois o tempo de entrega é apenas uma parcela do tempo de ciclo do pedido. De acordo o CSCMP (2003), o tempo do ciclo do pedido é composto pelo tempo de entrega, ou seja, o lapso necessário para que o produto seja

movimentado da origem ao destino, e pelo tempo de processamento de pedido, que consiste das atividades de preparação, verificação e consolidação do pedido. E freqüentemente, o tempo de processamento de pedido é responsável por parte substancial do tempo de ciclo do pedido.

### 3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As principais características levantadas dos modelos revisados estão resumidas na Tabela 3.1. Verifica-se que para o projeto de rede logística, deve-se buscar um modelo matemático que seja capacitado, de múltiplos produtos, possua pelo menos um estágio intermediário, considere os custos de estoque e tenha flexibilidade para inclusão de particularidades da cadeia de suprimento.

**TAB 3.1** Quadro comparativo dos modelos revisados.

Modelos	Capac.	Estágios intermed.	Multi Produto	Custos de estoque	Inst. de produção	Flexib. de config.
EFROYMSON e RAY (1966)	-	0	-	-	-	-
ERLENKOTTER (1978)	-	0	-	-	-	-
ELLWEIN e GRAY (1971a)	X	0	-	-	-	-
ELLWEIN e GRAY (1971b)	X	1	-	-	-	-
GEOFFRION e GRAVES (1974)	X	$\geq 1$	X	-	-	X
BROWN <i>et al</i> (1987)	X	0	X	-	X	X
JAYARAMAN (1998)	X	1	X	X	-	-
CROXTON e ZINN (2005)	X	1	X	X	-	X

Dentre os modelos revisados, destacam-se:

- ELLWEIN e GRAY (1971a e 1971b) pela inclusão de restrições de capacidade e consideração de transportes de entrada e saída com inclusão do estágio intermediário;
- GEOFFRION e GRAVES (1974) pela consideração de múltiplos produtos;
- JAYARAMAN (1998) pela inclusão dos custos de estoque.

Deve-se observar, entretanto, que na medida em que os diversos aspectos das cadeias de suprimento são incorporados aos modelos, aumenta a sua complexidade de análise e reduzem-se suas possibilidades de solução. Na prática, a determinação de quais aspectos serão incorporados ao modelo deve ser definido caso a caso, de acordo com os recursos existentes, a relevância e o impacto na decisão final.

Neste capítulo, foram revisados os principais modelos aplicáveis ao projeto de rede logística. Ainda que a modelagem possa ser considerada o “cerne” do projeto de rede, não foi objetivo deste capítulo esgotar o estado da arte no desenvolvimento de novos modelos, mas tanto somente ilustrar o potencial da programação linear inteira mista como ferramenta para análise do projeto de rede logística pela sua flexibilidade de representação.

No próximo capítulo, propõem-se um procedimento para o projeto de rede logística.

## 4. PROCEDIMENTO PROPOSTO

O aumento da competição imposta pela combinação da abertura comercial com a estabilização econômica tem causado mudanças significativas nas empresas brasileiras de um modo geral. Se, por um lado, a estabilização econômica reduziu drasticamente as possibilidades de ganhos inflacionários, forçando as empresas a focar nas atividades fins do negócio, por outro lado, a maior disponibilidade de produtos similares, com a chegada dos importados, aumentou ainda mais a competição no mercado (LAVALLE e FLEURY, 2000).

Deste modo, os erros admissíveis nos processos de decisão tornam-se cada vez menores, retirando muitas empresas da “zona de conforto” em que operavam no passado. No caso do projeto de rede logística, modelos matemáticos são excelentes ferramentas de suporte à decisão, reduzindo as possibilidades de erro. Entretanto, estes devem ser vistos apenas como parte de um processo, que envolve outras etapas, tão importantes quanto, para a redução das possibilidades de erro.

Essencialmente, este processo pode ser visto como um estudo de pesquisa operacional. HILLIER e LIEBERMAN (1988) resumiram as etapas usuais a serem seguidas em um estudo de pesquisa operacional, indicando estas como sendo a forma como estudos bem-sucedidos são conduzidos, quais sejam: formulação do problema, construção do modelo matemático, derivação de uma solução, teste do modelo e da solução e implementação.

Neste capítulo, são apresentadas as etapas básicas de um procedimento para a análise de projetos de rede logística. Adotou-se como referencial as etapas descritas acima e consideraram-se algumas outras etapas adicionais, com o objetivo de dar suporte ao processo de tomada de decisão. Assim, o procedimento se inicia na identificação da necessidade de planejamento.

### 4.1. IDENTIFICAÇÃO DA NECESSIDADE DE PLANEJAMENTO

O primeiro passo no processo de análise do projeto de rede logística, assim como em qualquer outro problema, é a identificação da necessidade de se planejar. Diversas podem ser as razões que justificam o início do processo. No caso de uma empresa recém-criada, cujas operações ainda não foram iniciadas, a necessidade de

planejamento é óbvia e deve ser vista como uma oportunidade de configurar a rede da forma mais adequada aos objetivos da empresa.

Entretanto, há situações, onde a empresa já existe e possui uma rede logística definida. Nestes casos, BALLOU (2001a) recomenda que se observe a ocorrência de mudanças em determinados aspectos ou decisões tomadas em outras esferas da empresa, que por vezes, justificam a necessidade de se re-planejar a rede logística. Dentre estes aspectos, pode-se citar:

- Variações da demanda
- Introdução de novos produtos
- Entrada em novos mercados
- Alteração dos custos logísticos
- Criação e/ou modificação de regulamentação
- Exigência dos clientes por melhores níveis de serviço

A demanda é o principal elemento de sustentação da empresa e é o que justifica a sua existência. Assim, a identificação de variações da demanda, tanto no que se refere à tendência de crescimento do mercado quanto à alteração da sua dispersão geográfica, podem justificar a revisão da rede logística. Dentre as causas estão: a possibilidade de a empresa ser incapaz em atender ao mercado e o aumento das distâncias médias de transporte.

A decisão de introduzir novos produtos no mercado é outro fator que deve ser considerado. Ainda que a demanda inicial por novos produtos seja baixa na fase de introdução, o sucesso da sua aceitação depende fortemente da capacidade da empresa em disponibilizá-los ao mercado. Capacidade insuficiente da rede atual e/ou instalações inadequadas às características dos novos produtos são algumas das razões.

Mas, ainda que os produtos sejam os mesmos, uma outra decisão relevante é a entrada em novos mercados, pois isso representa a ampliação da abrangência geográfica da rede. Adotando uma trajetória incremental, em um primeiro momento, a empresa pode decidir apenas por comercializar seus produtos em novos mercados, aumentando as distâncias médias de transporte e/ou exigindo a utilização de outros modos. Entretanto, assim que a aceitação dos produtos nos novos mercados se confirma e os volumes demandados aumentam, a empresa pode decidir em um segundo momento, por operar suas próprias instalações nestes mercados, aproximando-se fisicamente de seus clientes e melhorando os níveis de serviço. Este

tipo de comportamento é frequentemente observado em empresas que buscam a internacionalização de seus negócios, como apontou DELOITTE (2005).

Entretanto, independentemente de variações da demanda e de decisões de expansão voltadas para o mercado, a alteração perene e relativa dos custos logísticos pode transformar configurações que no passado eram consideradas ótimas em configurações sub-ótimas. Um aumento percentual maior de custos de transporte, por exemplo, por elevação dos preços dos combustíveis, em detrimento aos demais custos logísticos, pode alterar a relação ótima de *trade-off* entre estes custos. Deste modo, redes que antes privilegiavam o uso intensivo de transportes podem ser revistas para uma estratégia de maior consolidação de estoques. O mesmo raciocínio pode ser aplicado na situação inversa, quando o aumento dos custos de capital se sobressai.

A criação e/ou modificação de regulamentações que afetem a operação da empresa também deve ser considerada. GAITHER e FRAIZER (2004) apontam como razões: incentivos e restrições governamentais, legislação ambiental e presença de sindicatos. Estas condições fazem com que determinadas regiões apresentem maiores vantagens competitivas comparadas a outras.

E por fim, mas não menos importante, o monitoramento da satisfação dos clientes pode indicar a exigência por melhores níveis de serviço. Medidas paliativas podem no curto prazo amenizar o problema. Mas, do ponto de vista estratégico, a empresa deve visar ser o *benchmark* como forma de se perpetuar no mercado. Deste modo, os esforços da empresa por melhores níveis de serviço devem passar pela revisão da rede logística, tendo em foco medidas de desempenho como tempo de entrega e disponibilidade.

A existência de um destes aspectos evidencia pelo menos a necessidade de que o projeto de rede logística deva ser considerado. Entretanto, é possível que mais de um destes aspectos estejam presentes simultaneamente, de forma que as expectativas de ganhos com a revisão da rede tornam-se maiores.

#### 4.2. DEFINIÇÃO DE ESCOPO DO PROJETO

Identificada a necessidade de se realizar o projeto de rede logística, deve-se então definir o seu escopo, o que garantirá o entendimento claro do problema e dará a dimensão e a complexidade da rede a ser planejada. Basicamente, deve-se caracterizar:

- Premissas do projeto;
- Horizonte de planejamento;
- Membros considerados da cadeia de suprimento;
- Dimensão estrutural da rede logística;
- Mapeamento dos diferentes tipos de processos desempenhados através da cadeia;

Fazem parte das premissas do projeto, além dos aspectos identificados na primeira etapa, os objetivos estratégicos da empresa que devem ser atendidos com a revisão da rede logística, como metas de crescimento, de redução de custos e de melhoria nos níveis de serviço.

Devido ao caráter estratégico do problema, não apenas estas informações, mas todas as demais relacionadas ao problema, devem estar em bases anuais. Entretanto, de acordo com a indústria na qual a análise está sendo feita, o horizonte de planejamento pode variar. Na indústria de petróleo, por exemplo, a construção de uma nova refinaria pode durar cerca de cinco anos, logo, a decisão de localização não deveria considerar um período de planejamento inferior a 10 anos. Por outro lado, uma empresa do setor de alimentos, que decida ampliar sua rede terceirizada de CDs, um horizonte de planejamento de três anos pode se mostrar mais que adequado.

LAMBERT *et al* (1998), em seu estudo conceitual sobre cadeias de suprimentos, identificou três aspectos fundamentais para a caracterização da rede logística de uma empresa: o mapeamento de processos desempenhados na cadeia, os membros da cadeia de suprimento e a dimensão estrutural da rede.

O mapeamento dos processos visa identificar as atividades consideradas críticas no desempenho da cadeia. Esta característica é especialmente relevante quando o projeto de rede logística envolve a decisão de localização de instalações de produção, onde as etapas do processo de produção são mapeadas relacionando matérias-primas, estoques em processo e produtos acabados, independentemente do processo ser executado em um ou mais estágios.

Além disso, para caracterizar a rede logística, é necessário identificar quem são os membros da cadeia de suprimento e quais devem ser considerados na análise. Incluir todos os tipos de membros pode gerar uma rede total altamente complexa, que na maioria dos casos seria contraproducente, se não, impossível de se resolver. De acordo com os autores, a chave é determinar quais membros são considerados críticos

para o sucesso da empresa, sendo apropriado para isso, distinguir os membros entre primários e de suporte. Membros primários são fornecedores ou unidades da empresa que participam ou desempenham atividades no processo de agregação de valor das matérias-primas em produtos finais, enquanto membros de suporte apenas provêm recursos de apoio às atividades dos membros primários.

A dimensão estrutural da rede, por sua vez, é dada por três medidas: estrutura horizontal, estrutura vertical e posição horizontal da empresa na cadeia de suprimentos. A estrutura horizontal refere-se ao número de estágios da cadeia de suprimento, podendo ser longa com vários estágios, ou curta com alguns poucos. A estrutura vertical refere-se ao número de membros representados em cada estágio, podendo uma cadeia ter uma estrutura vertical estreita ou larga. WANKE (2001) estendeu esta caracterização para a análise do grau de complexidade no fornecimento, por meio do resultado da multiplicação do número de fornecedores pelo número de itens de matéria-prima. Segundo estudo de caso realizado em empresas brasileiras, os setores automobilístico, eletro-eletrônicos e de tecnologia e computação são os que apresentam maior grau de complexidade, sobretudo devido ao elevado número de itens de matéria-prima. E por último, a terceira dimensão que indica a posição horizontal da empresa dentro da cadeia de suprimentos. Uma empresa pode estar posicionada próxima ao início do suprimento, próxima ao consumidor final, ou em algum lugar entre estes pontos da cadeia. A caracterização desta dimensão é útil para a análise da visibilidade da demanda e da localização dos pontos de desacoplamento, discutidos no Capítulo 2.

Esta etapa do processo define com que abrangência a análise do projeto de rede logística será conduzida. Nesta etapa, também se deve realizar uma avaliação prévia da disponibilidade de dados.

#### 4.3. IDENTIFICAÇÃO DE ESTRATÉGIAS LOGÍSTICAS A SEREM AVALIADAS

Definir a estratégia logística mais apropriada para a configuração da rede constitui um dos fatores de sucesso de uma empresa, além de ser uma forma de obter vantagem competitiva sustentável no longo prazo. Em linhas gerais, as empresas devem adotar aquela estratégia que minimize o custo logístico total para um determinado nível de serviço exigido pelo mercado.



Analisando a produção, duas são as formas de operação, já mencionada no Capítulo 2, quais sejam: especialização no produto ou especialização no processo. Na primeira, cada planta é responsável por produzir um grupo de produtos específicos e atender a todo o mercado (via CDs), enquanto na segunda, tem-se uma planta especializada para cada estágio de produção, sendo o mercado atendido pela planta responsável pelo último estágio.

Adicionalmente, existem ainda duas formas de atuação logística como relação ao atendimento aos clientes. A empresa pode decidir pela regionalização, onde o mercado é segmentado para ser atendido com um leque completo de produtos por um único CD, ou então pela consolidação, onde cada família de produtos é concentrada em uma única instalação para atender a todo o mercado.

#### 4.4. MODELAGEM MATEMÁTICA

Até as etapas anteriores, buscou-se consolidar um entendimento da realidade, por meio das justificativas da análise, da situação atual e dos objetivos a serem alcançados. Nesta etapa, deve-se traduzir este entendimento com a construção de um modelo matemático que represente esta realidade.

A modelagem matemática da rede logística é a etapa crítica do processo, uma vez que, fornece a estrutura que integra dados e idéias à tomada de decisão. Sua construção exige o conhecimento prévio das técnicas de solução, sendo a mais importante é a programação matemática, conforme discutido no Capítulo 3, pois a partir dela é possível selecionar a configuração ótima dentre um grande conjunto de arranjos potenciais.

Em linhas gerais, a modelagem inclui: identificação dos conjuntos de elementos (fornecedores, plantas, CDs, zonas de consumo, produtos, modos de transporte, períodos,...), identificação das variáveis de decisão e dos parâmetros, definição das parcelas da função objetivo (custos de transporte, custos fixos, custos de armazenagem e manuseio, custo de estoque, custo de produção,...), definição de restrições consideradas (limites de capacidade, atendimento à demanda, número de instalações,...). Obviamente, alguns destes fatores são comuns a todos os modelos, mas acrescentá-los indefinidamente, pode não apresentar impacto significativo na decisão, e sim acarretar no aumento do grau de incerteza do problema e, possivelmente, elevação do tempo computacional, além do esforço adicional de levantamento e tratamento de dados (OWEN e DASKIN, 1998).

#### 4.5. LEVANTAMENTO E TRATAMENTO DE DADOS

A quinta etapa consiste no levantamento e tratamento dos dados necessários para inclusão no modelo matemático desenvolvido. As fontes podem ser avaliações de mercado, sistemas de informações transacionais da empresa, relatórios contábeis e pesquisas específicas. Uma prática comum no projeto de rede logística é a agregação de dados de determinados elementos com o propósito de simplificação da análise, diminuição do tempo computacional e redução da quantidade de dados manipulados. Os dados considerados básicos no projeto de rede logística são:

- Famílias de produtos
- Zonas de consumo
- Estimativa de taxa de transporte
- Distâncias de viagem
- Custos fixos e capacidades das instalações
- Seleção de locais candidatos

A definição de famílias de produtos é o primeiro elemento na análise do projeto onde dados são agregados. Uma empresa pode ter milhares de itens em suas linhas de produtos. Modelar cada um pode ser proibitivo e geralmente desnecessário quando grupos de produtos fluem pela cadeia de uma mesma maneira. Assim, as famílias de produtos devem ser definidas com o objetivo de reunir produtos com características similares relacionadas à operação, à demanda e aos custos. Como uma regra geral, o número de famílias de produtos consideradas em um modelo não deve exceder a 200, mas de acordo com SHAPIRO (2001), para a maioria das aplicações, este número pode e deve ser muito menor.

Assim como os produtos, a base de clientes de uma empresa no nível transacional pode ser muito detalhada para o modelo. Logo, a agregação dos clientes em zonas de consumo deve ser considerada. O principal critério utilizado deve ser a proximidade geográfica entre os clientes, entretanto clientes com características de demanda distintas devem ser mantidos em separado. O princípio 80-20 também pode ser aplicado como forma de simplificação. Isto é, com os clientes ordenados por volume de vendas, espera-se que mais de 80% do volume total de vendas da empresa seja embarcado para o topo da lista que corresponde a 20% dos clientes. Clientes muitos pequenos podem ser tanto ignorados quanto adicionados à zona de consumo

cujo centro de gravidade esteja mais próximo. Esta lógica de agregação também pode ser aplicada a fornecedores de matérias-primas em zonas de suprimento.

É importante destacar que, de acordo com BALLOU (2001b), a eficácia do modelo é impactada pela agregação de dados. O agrupamento de produtos requer que a família seja representada em termos de custos médios, enquanto o agrupamento de clientes centraliza a demanda em um único ponto na zona de consumo. Em outras palavras, perdem-se as características de custos dos produtos individuais e a precisão dos custos de transporte. Por outro lado, além de simplificação, o agrupamento dos clientes tem a vantagem de aumentar a precisão na previsão de demanda.

Outro dado importante para o projeto de rede logística é o custo de transporte. O número potencialmente elevado de arcos da rede pode tornar o levantamento e tratamento destes dados uma tarefa de difícil realização. Para uma pequena rede de apenas dois grupos de produtos, cinco desdobramentos de peso de carga, 200 clientes, cinco CDs e duas plantas, existem  $2 \times 5 \times 200 \times 5 \times 2 = 20.000$  tarifas. Assim, recomenda-se a elaboração de uma curva de regressão para a estimativa de taxas de transporte envolvendo amostragens de tarifas em várias distâncias irradiando de um ponto de origem.

Assim, as distâncias de viagem passam a ser necessárias para estimar os custos de transporte entre pontos de origem e destino. Frequentemente, estas ainda são utilizadas como alternativa ao tempo em trânsito na determinação do nível de serviço. Uma empresa pode, por exemplo, desejar que todos os seus clientes estejam localizados num raio máximo de 450 km de um dos seus CDs, significando que a entrega pode ser realizada de forma viável em um dia. Os dados de distâncias podem ser obtidos em Atlas ou tabelas comerciais, como o Guia Quatro Rodas, ou podem ser estimados a partir do cálculo da distância com o uso das coordenadas geográficas das cidades que corresponde aos pontos de origem e destino. As distâncias calculadas desta forma devem ser corrigidas por um fator de sinuosidade, que pode ser determinado pela tomada de uma amostra de distâncias reais entre pontos selecionados e fazendo-se a média da relação entre distâncias reais e calculadas. As coordenadas podem ser facilmente encontradas no site do IBGE. Um exemplo de fórmula<sup>4</sup> que pode ser utilizada é a seguinte:

---

<sup>4</sup> Esta expressão tem origem na trigonometria esférica, portanto considera a curvatura da Terra. Os radianos são calculados a partir de graus mediante a sua divisão por  $180/\pi$ .

$$D_{A-B} = 6378\{\arccos[\text{sen}(LAT_A).\text{sen}(LAT_B) + \cos[LAT_A].\cos(LAT_B).\cos|LONG_B - LONG_A|]\} \quad (4.1)$$

Onde,

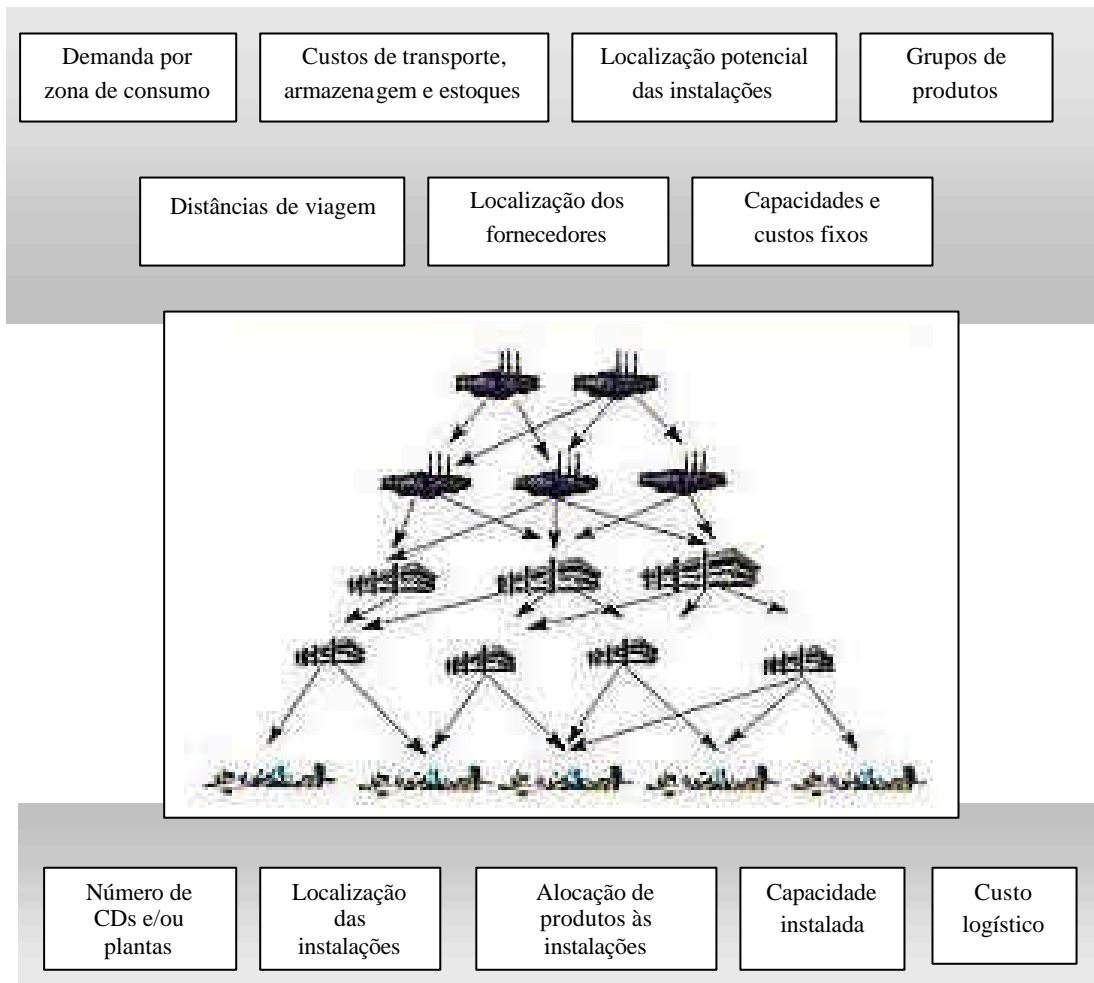
$D_{A-B}$	Distância entre os pontos A e B em km
$LAT_A, LONG_A$	Latitude e longitude do ponto A (em radianos)
$LAT_B, LONG_B$	Latitude e longitude do ponto B (em radianos)

Os custos fixos e capacidades das instalações são outros importantes dados no projeto de rede logística. Como discutido no Capítulo 2, o período de re-suprimento estabelecido na política de estoque da empresa juntamente com o fluxo anual determinam o nível médio de estoque mantido nas instalações. Deste modo, as instalações não necessitam ser dimensionadas para o fluxo anual de produtos, mas para o estoque de pico (duas vezes o nível médio de estoque). Para a determinação dos custos fixos, essa medida deve ainda ser multiplicada por um fator de espaço ( $> 1$  e específico de cada indústria) destinado à movimentação, preparação e seleção dos estoques.

Finalmente, os locais onde as novas instalações podem ser implantadas devem ser selecionados. Como forma de garantir a viabilidade técnica da solução do projeto de rede logística posteriormente adotada, estes locais devem reunir todas as condições mínimas necessárias para a implantação. Dentre estas condições, destacam-se nível de estabilidade política e econômica, disponibilidade de mão-de-obra, existência e condições da infra-estrutura de transportes, oferta de energia, proximidade das fontes de matérias-primas e/ou zonas de consumo, presença de concorrentes, atendimento às restrições de zoneamento e legislação ambiental e custos de terrenos e de construção. Quanto mais restritivas forem as exigências, menores serão as opções de localização, e pesquisas específicas deverão ser conduzidas na busca por locais candidatos, muitas vezes utilizando-se de critérios qualitativos. De um modo geral, sugere-se que a seleção se inicie pela consulta do atendimento a critérios de maior abrangência geográfica, como estabilidade política e econômica, e assim sucessivamente até o nível local, onde é possível avaliar critérios como custo de terreno.

As entradas (*inputs*) e saídas (*ouputs*) do modelo podem ser vistos na Figura 4.1. Pode-se perceber a necessidade de grande quantidade de dados obtidos de fontes diversas, ora calculados pela média de dados reais, ora estimados pela simplificação da realidade. Obviamente, o cuidado no tratamento dos dados é de suma importância

para acurácia da solução. Entretanto, antes disso, o levantamento dos dados deve ser criterioso. Mesmo para aqueles dados que a empresa dispõe facilmente, deve-se ter em mente que eles representam uma previsão de comportamento no longo prazo. Assim, dentro do horizonte de planejamento, deve-se identificar a possibilidade de ocorrência de rupturas nas tendências projetadas para o futuro, sem, entretanto, confundí-las com pequenas variações conjunturais de tempo.



**FIG. 4.1** Representação genérica dos *inputs* e *outputs* do modelo matemático

#### 4.6. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

Devido ao grande volume de dados, a resolução do problema invariavelmente exige o auxílio de uma ferramenta computacional. Para isso, pode-se implementar o modelo com o uso de um *solver* na sua resolução, o que demanda um alto grau de *expertise* para formular o problema e formatar as suas soluções, ou adquirir uma

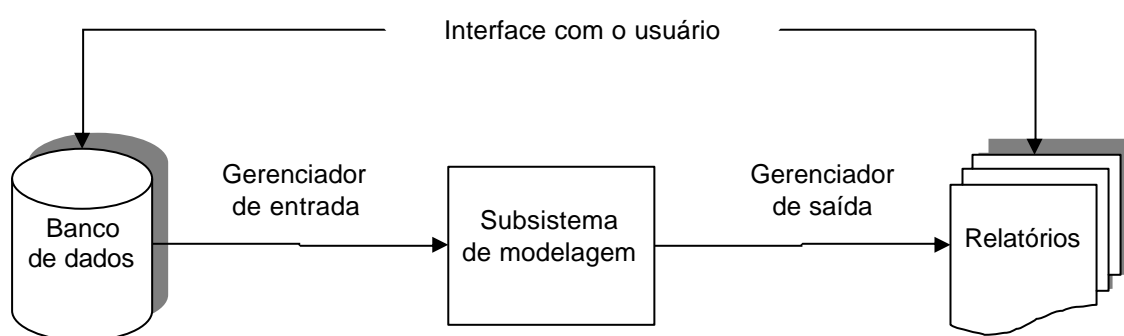
solução comercial (Sistema de Suporte à Decisão – SSD), cuja interface amigável permite que o projeto da rede logística possa ser executado no âmbito da empresa.

Entretanto, FREITAS (2004) realizou um levantamento dos *softwares* disponíveis no mercado brasileiro para a análise do projeto de rede logística, onde constatou o alto custo de aquisição destas soluções. A baixa oferta de alternativas e o alto custo em Pesquisa e Desenvolvimento das empresas fornecedoras para apresentar ferramentas aplicáveis às mais diversas situações são alguns dos fatores que contribuem para isso.

Assim, o desenvolvimento de soluções próprias torna-se a única alternativa para muitas empresas ou para consultorias que desejem prestar o serviço.

A organização e estruturação dos dados nesta etapa passam a ser crucial para o processo. Assim, valendo-se das funcionalidades de exportação/importação de dados de muitas das linguagens de modelagem, recomenda-se que a implementação computacional seja realizada com base na estrutura de um SSD (Fig. 4.2). De acordo com BALLOU (2001a), um SSD é composto dos seguintes subsistemas:

- Interface com o usuário;
- Gerenciador de entrada;
- Gerenciador de saída;
- Subsistema de modelagem.



**FIG. 4.2** Representação genérica de um SSD

A interface com o usuário permite a comunicação entre o usuário e o sistema. Para a entrada de dados, pode-se, por exemplo, desenvolver um banco de dados em Access, permitindo a entrada manual ou a importação de dados, sem que para isso seja necessária a manipulação de dados no corpo da linguagem de modelagem. Enquanto, com o uso do gerenciador de saídas, podem-se disponibilizar somente as

informações relevantes em relatórios com formato gerencial em Word ou Excel, por exemplo.

#### 4.7. VALIDAÇÃO DO MODELO E DOS DADOS

O primeiro teste relevante a ser feito quando da preparação do modelo, no caso de uma empresa que já tenha operação, é fixar as instalações nos locais onde estão na prática, com mesmo tamanho, atendendo aos mesmos clientes, utilizando as tabelas de frete atualmente praticadas na empresa e executá-lo.

A partir dos dados de custos totais obtidos pelo modelo, pode-se ter uma idéia da aderência do mesmo com a realidade da empresa. Segundo HILLIER e LIEBERMAN (1988), isso pode indicar áreas em que o modelo tenha falhas e requeira modificações, fatores ou inter-relações importantes que não tenham sido incorporados ao modelo, ou mesmo, que certos parâmetros de entrada não tenham sido estimados precisamente. Para o caso de empresas sem operação prévia, resta verificar a ocorrência de valores muito discrepantes das estimativas.

Outra avaliação que pode ser feita é com a retirada das restrições de capacidade. Deve-se também retirar os custos fixos de instalações, haja vista que estes estão associados aos portes da mesma. Assim, o modelo é tido como livre e gera os fluxos físicos que minimizam os custos de transporte, manuseio e produção. A concentração da capacidade produtiva e dos fluxos de distribuição (CDs) resultante fornece indícios do porte e do número de instalações necessários. Apesar desta informação não ser imprescindível, dado que ela pode ser obtida diretamente pelo modelo, o conhecimento prévio do grau de concentração dos fluxos permite reduzir o tamanho do problema, possibilitando obter respostas com os recursos computacionais disponíveis.

Um resultado importante é que com o modelo livre necessariamente todas as instalações devem ser utilizadas, pois na ausência de custos fixos, restrições de capacidade e de número de instalações, quanto maior for o número de plantas e CDs abertos, menor é o custo de transporte. Assim, a existência de instalações não utilizadas pode indicar erro ou significar que a instalação não contribui para a redução dos custos logísticos, sendo passível de descarte do conjunto de locações elegíveis.

#### 4.8. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Ainda que o modelo exija o levantamento e tratamento de grande quantidade de dados, este apresenta a vantagem que, uma vez construído, pode-se fazer uma série de variações no mesmo, impor novas restrições, relaxar outras ou testar seu desempenho em situações diferentes.

A análise de sensibilidade possibilita verificar a robustez da configuração a alterações nos parâmetros de entrada. Trata-se de uma etapa necessária no projeto de rede logística, dada a incerteza de tais parâmetros ao longo da vida útil das instalações. Além disso, pode-se verificar os efeitos da adoção de determinadas políticas e estratégias, e avaliar os riscos de implantação diante de cenários diferentes.

As análises paramétricas são aplicações interessantes, onde se estuda o impacto da variação sistemática de um único fator sobre as variáveis de interesse: por exemplo, pode-se estar interessado no efeito da variação do número de centros de distribuição sobre o custo total. Ou no efeito do aumento da demanda sobre o custo de transporte. O objetivo das análises paramétricas é o de quantificar relações relevantes para tomada de decisão, através da construção de curvas paramétricas, obtidas através de várias corridas com o modelo (LACERDA, 1999).

A análise de cenários é outra importante maneira de avaliar as soluções do problema. Segundo SIMCHI-LEVI *et al* (2003), esta técnica consiste em capturar as incertezas inerentes às estimativas de alguns dados de entrada, como demanda e investimentos, através da determinação de certo número de cenários. Muitas vezes, esta é a melhor alternativa frente à dificuldade de obtenção ou baixa confiabilidade dos dados requeridos para a análise. O objetivo da utilização desta técnica de análise é proteger a empresa por meio da consideração dos piores casos que podem ocorrer.

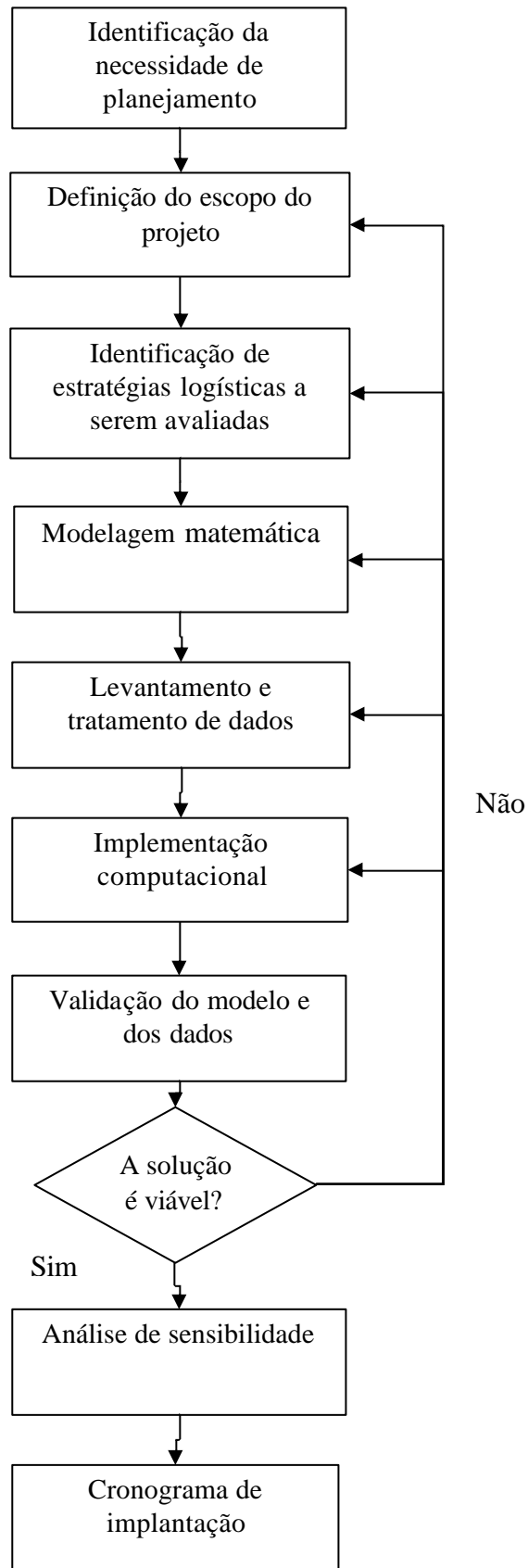
#### 4.9. CRONOGRAMA DE IMPLANTAÇÃO

A construção de novas instalações ou mesmo a ampliação de instalações existentes não ocorrem imediatamente. Além do período necessário para a construção, deve-se considerar no projeto de rede logística o melhor momento para abertura das instalações tendo em vista o horizonte de planejamento. Assim, cabe determinar o cronograma de implantação da configuração ótima, o que pode ser feito diretamente pelo modelo com a consideração de múltiplos períodos.



Uma outra maneira de determinar a evolução da rede logística consiste no estabelecimento de configurações ótimas em períodos distintos e verificar um melhor valor presente líquido (SIMCHI-LEVI *et al*, 2003). De qualquer forma, a seqüência de abertura de instalações pode ser revisada no futuro quando as incertezas em relação os dados serão menores.

Este procedimento proposto encontra-se representado no diagrama de fluxo da Fig. 4.3.



**FIG. 4.3** Fluxograma do procedimento proposto

## **5. ESTUDO DE CASO: PROJETO DE REDE LOGÍSTICA DO BIODIESEL DE MAMONA NO NORDESTE BRASILEIRO**

Após a revisão conceitual e teórica do projeto de rede logística nos capítulos 2 e 3, e da apresentação de um procedimento para a sua resolução no Capítulo 4, cabe demonstrar numa situação real a sua aplicação prática, onde é possível observar a importância e as dificuldades de cada etapa.

Assim, optou-se pela realização de um estudo de caso na configuração geral da cadeia de suprimentos de um dos setores considerados estratégicos e cada vez mais em evidência no país: a cadeia do biodiesel. Ainda que, deste modo, o estudo não esteja focado na configuração da rede logística de uma única empresa, espera-se que os resultados da aplicação sirvam de base para que agências reguladoras orientem os investimentos dos diversos membros do setor produtivo.

As próximas seções deste capítulo estão relacionadas com as etapas do procedimento proposto.

### **5.1. IDENTIFICAÇÃO DE NECESSIDADE DE PLANEJAMENTO**

O Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) é um programa do Governo Federal que objetiva a implementação de forma sustentável, tanto técnica como economicamente, da produção e uso do biodiesel como combustível aditivo ao diesel.

O biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis, que pode ser obtido por diferentes processos tais como o craqueamento, a esterificação ou pela transesterificação. Pode ser produzido a partir de gorduras animais ou de óleos vegetais, existindo dezenas de espécies vegetais no Brasil que podem ser utilizadas, tais como mamona, dendê (palma), girassol, babaçu, amendoim, pinhão manso e soja, dentre outras.

Dentre as principais diretrizes do programa está: garantir preços competitivos, qualidade e suprimento, e produzir o biodiesel a partir de diferentes fontes oleaginosas, de acordo com o potencial de produção e aptidão agrícola de cada região. Assim, estabeleceu-se que as principais matérias-primas seriam: a soja, a mamona e o

dendê para as regiões Centro-Sul, Nordeste e Norte, respectivamente (BRASIL, 2005a).

A Lei nº. 11.097, de 13 de janeiro de 2005, estabelece a obrigatoriedade da adição de um percentual mínimo de biodiesel ao óleo diesel comercializado ao consumidor, em qualquer parte do território nacional. Esse percentual obrigatório será de 5% oito anos após a publicação da referida lei, havendo um percentual obrigatório intermediário de 2% três anos após a publicação da mesma.

Esta adição de biodiesel não exigirá alterações nos motores movidos a diesel, assim como não exigiu nos países que já utilizam o produto. Os motores que passarem a utilizar o combustível misturado ao diesel nesta proporção terão a garantia de fábrica. Para que seja possível a utilização do biodiesel puro como combustível, ou o chamado B100, ainda é necessário avançar no estudo e desenvolvimento de novos motores.

Atualmente 10% do diesel consumido no Brasil são importados. Este combustível, utilizado principalmente no transporte de passageiros e de cargas, é o mais utilizado no país, com comercialização anual da ordem de 38,2 bilhões de litros, o que corresponde a 57,7% do consumo nacional de combustíveis veiculares (ANP, 2004).

O biodiesel permite a economia de divisas com a importação de petróleo e óleo diesel, por isso esse combustível renovável terá impacto na balança comercial brasileira por permitir a redução dessas importações. Além disso, trata-se de uma vantagem estratégica ao reduzir a dependência de fontes externas. O uso comercial do B2 (mistura de 2% do biodiesel ao diesel) cria um mercado potencial para a comercialização de 800 milhões de litros de biodiesel/ano em todo o País, o que representa uma economia anual da ordem de US\$ 160 milhões na importação de diesel (BRASIL, 2005b).

Além das vantagens econômicas esperadas, fazem parte das motivações do Governo Federal para a implantação do PNPB, os benefícios sociais e ambientais advindos da produção e uso do biodiesel.

O cultivo de matérias-primas e a produção industrial de biodiesel têm grande potencial de geração de empregos, promovendo, dessa forma, a inclusão social, especialmente quando se considera o amplo potencial agrícola do País.

O consumo de combustíveis fósseis derivados do petróleo tem um significativo impacto na qualidade do meio ambiente. A poluição do ar, as mudanças climáticas, os

derramamentos de óleo e a geração de resíduos tóxicos são resultados do uso e da produção desses combustíveis.

Mas, de acordo com LIMA (2004a), o biodiesel, além de biodegradável, permite que se estabeleça um ciclo fechado de carbono no qual o CO<sub>2</sub> é absorvido quando a planta cresce e é liberado quando o biodiesel é queimado na combustão do motor. Um estudo conjunto do Departamento de Energia e do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos mostra que o biodiesel reduz em 78% as emissões líquidas de CO<sub>2</sub>.

Mas para que se alcancem todos estes benefícios, há a necessidade de se induzir investimentos, de forma imediata, para o aumento da produção e oferta nacionais de biodiesel que assegurem a viabilidade de ser praticada, em todo o País, a adoção do percentual mínimo obrigatório, em volume, de adição do biodiesel ao óleo diesel de petróleo com disposto na lei.

Apesar da premência de sua implantação, o único estudo sobre a configuração da cadeia de suprimento do biodiesel que se encontra publicado até o momento é o de FREITAS (2004), que abrange a região Centro-sul do País visando atender a demanda por biodiesel produzido a partir da soja.

Do ponto de vista sistêmico, poder-se-ia julgar que a cadeia de suprimentos do biodiesel deveria ser planejada para todo o País como um todo. Entretanto, uma vez que o PNPB estabeleceu uma correlação entre regiões geográficas e matérias-primas, é razoável admitir que o planejamento de suas redes logísticas se dê de forma independente.

Assim, com base na criação de nova regulamentação, identificou-se a necessidade de planejamento. Para este estudo de caso, optou-se pelo projeto de rede logística do biodiesel produzido a partir da mamona (Fig. 5.1) abrangendo a região Nordeste, que envolve as seguintes decisões:

- Localização e capacidade das esmagadoras e usinas de biodiesel a partir de um conjunto de locações elegíveis para cada período;
- Alocação entre membros de estágios consecutivos.



**FIG. 5.1** Mamona

## 5.2. DESCRIÇÃO DO ESCOPO DO PROJETO

A Região Nordeste é responsável por aproximadamente 15% do diesel consumido no País, e de acordo com levantamento de preços realizados em Dezembro de 2005 pela ANP, o preço médio do diesel praticado na região foi de R\$ 1,847/litro (ANP, 2005). Estas informações, ainda não sejam rígidas ao longo do tempo, são importantes referenciais para a configuração da rede logística do biodiesel no Nordeste, uma vez que dá indícios da demanda por capacidade e do referencial de preço para que a adição de biodiesel seja competitiva.

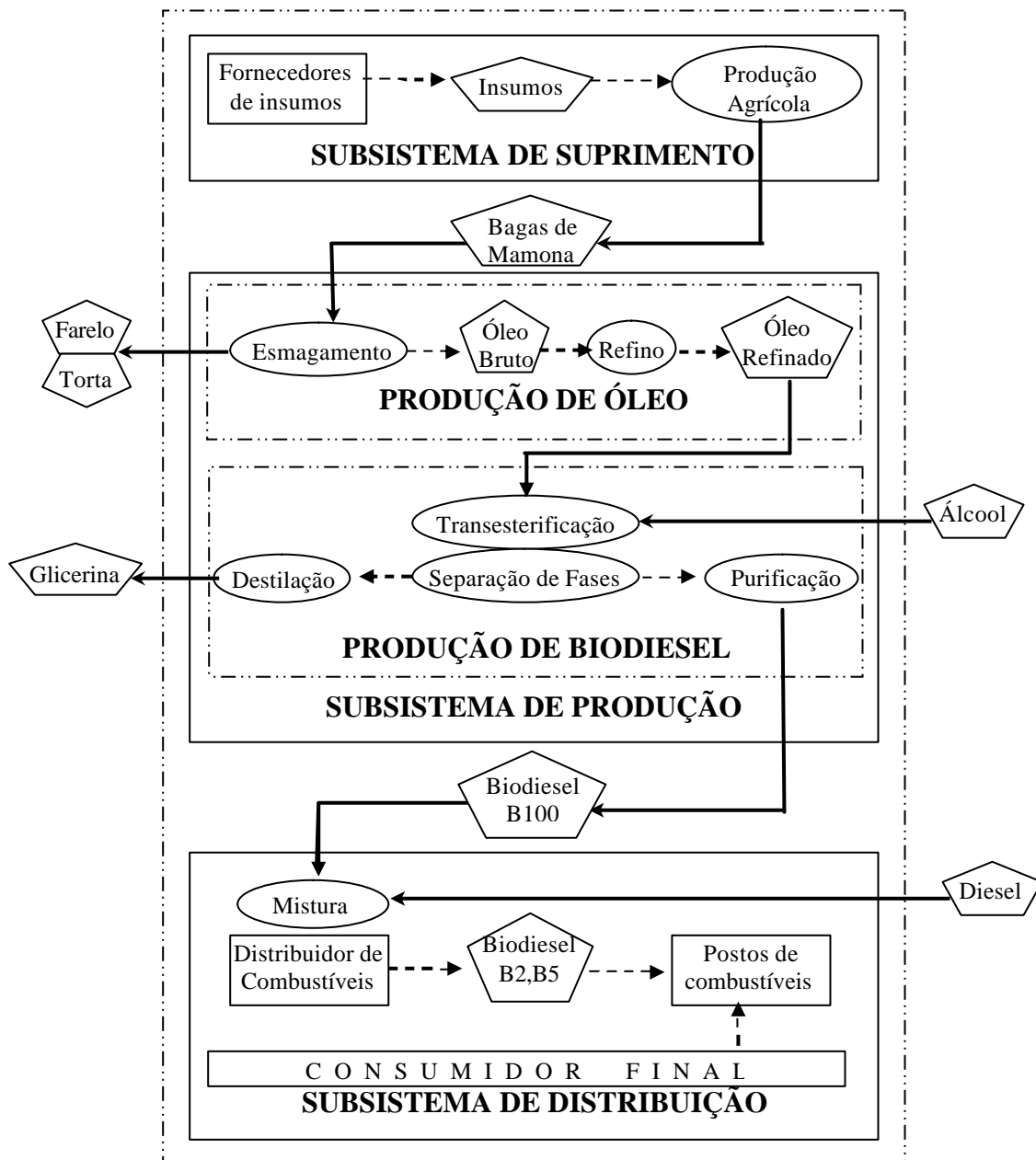
De acordo com a exigência da legislação sobre a adição de biodiesel ao diesel, pode-se considerar que o horizonte de planejamento do projeto é o ano de 2013, quando deverão ser produzidos 5% da demanda projetada de diesel em biodiesel puro. Entretanto, deve-se considerar explicitamente também a meta intermediária de adição de 2%, que deverá ser atingida em 2008.

FREITAS e NOBRE JUNIOR (2004) mapearam a cadeia de suprimento do biodiesel de mamona (Fig. 5.2), segmentando-a em três subsistemas, que de acordo com as características de operação discutidas no Capítulo 2 podem ser descritas como:

- a) Subsistema de suprimento: representa as indústrias fornecedoras de insumos agrícolas (adubo, equipamentos agrícolas, sementes de mamona, etc.) e as que executam a produção agrícola da mamona (plantio, colheita, secagem, etc.) para o fornecimento de bagas de mamona para as indústrias de processamento/transformação;
- b) Subsistema de produção: reúne as empresas responsáveis pelas atividades industriais da cadeia, transformando as matérias-primas em produtos finais

destinados aos consumidores. Incluem-se neste grupo as firmas produtoras de óleo (esmagamento e refino) e de biodiesel;

- c) Subsistema de distribuição: representa as empresas que estão em contato com os consumidores finais da cadeia como empresas exportadoras, distribuidores de combustíveis e postos de combustíveis.



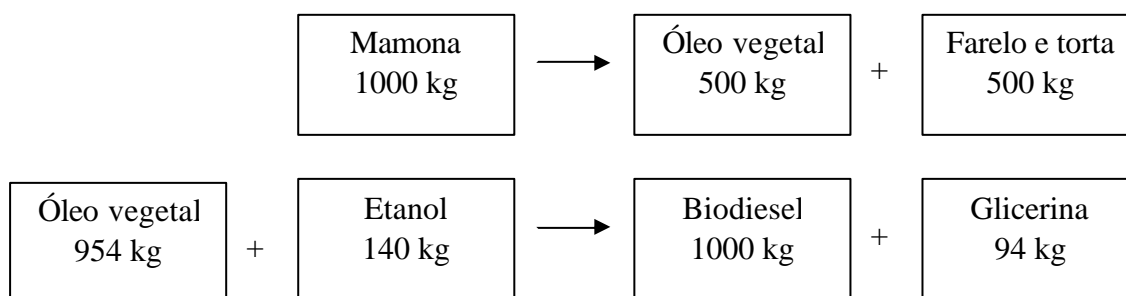
**FIG. 5.2** Cadeia de suprimentos do biodiesel de mamona

Fonte: Adaptado de FREITAS e NOBRE JUNIOR (2004)

Conforme indicado no procedimento proposto, devem-se identificar os membros e as atividades considerados críticos para o desempenho da cadeia, indicando a dimensão estrutural da rede logística.

Assim, no subsistema de suprimento, os fornecedores de insumos agrícolas são classificados como membros de suporte, não impactando de forma relevante na configuração da rede. Mas, o processo de produção agrícola nas regiões de plantio é o responsável direto pelo fornecimento da matéria-prima ao próximo subsistema e, portanto, considerado crítico. A dimensão vertical da cadeia neste estágio pode ser considerada larga, pois envolve pequenos agricultores, cooperativas e grandes produtores dispersos por toda a região. Além disso, devido a vertente social do PNPB, não está em questão a seleção de fornecedores de matérias-primas em função da proximidade geográfica, mas sim a utilização proporcional do potencial agrícola de cada região de plantio, como forma de desconcentração do emprego e renda.

No subsistema de produção, observa-se que baga de mamona e biodiesel não são, respectivamente, as únicas entradas e saídas deste subsistema. A produção de óleo vegetal gera como subprodutos o farelo e a torta, que podem ser comercializados como adubo. Enquanto a produção de biodiesel necessita ainda de álcool combustível como insumo e gera como subproduto a glicerina. O álcool pode ser tanto obtido pela rota metânica, derivado do gás natural, como pela rota etílica, derivado da cana-de-açúcar. Em função do Programa Pro-Álcool instituído na década de 1970 pelo Governo Federal, a indústria de etanol encontra-se consolidada no Brasil, enquanto o metanol ainda é importado, de forma que o etanol será o álcool considerado nesta análise, tornando o biodiesel 100% renovável. A glicerina, por sua vez, pode ser comercializada para indústrias químicas. Os esquemas de balanço de massa que relacionam as matérias-primas, produtos intermediários e produtos finais podem ser observados na Fig. 5.3.



**FIG. 5.3** Balanços de massa

Fonte: DORNELES (2005) *apud* MENDES (2005)



Ainda que estes elementos sejam partes do balanço de massa nas instalações, algumas simplificações na análise são admitidas. O farelo e a torta, resultantes do esmagamento da baga de mamona, podem utilizar o frete de retorno da mamona para zonas de plantio e serem consumidos como adubo. Já a glicerina, além de representar uma parcela menor das saídas do processo de produção, é demandada principal por mercados muito distantes da região analisada, uma vez que a indústria química está concentrada nas regiões Sul e Sudeste. Logo, sua influência sobre a localização das instalações é baixa. Entretanto, o etanol, mesmo que representando uma parcela pequena das entradas, deve ser considerado explicitamente, pois incorre em custos diretos para o sistema e a maior parte de sua produção no Nordeste está concentrada numa faixa litorânea.

E por fim, no subsistema de distribuição, fazem parte as bases de distribuição, os postos de combustíveis e os consumidores finais. Com relação às bases de distribuição, estas são as instalações onde é realizada a mistura de biodiesel puro ao diesel, e por isso, desempenham um importante papel de caráter regulatório, dado que toda carga deve ser testada antes de ser comercializada. Os postos de combustíveis representam o estágio final da cadeia, onde os consumidores finais adquirirem o produto. Entretanto, sua consideração na análise não é relevante, ainda que fossem agrupados por municípios ou zonas de consumo. A razão disso é que esta parte da cadeia já se encontra estruturada para atender ao mercado de diesel e, pela substituíbilidade do biodiesel puro em relação ao diesel, não está em questão a ampliação da capacidade ou aumento do número de instalações destes membros. Assim, a dimensão vertical deste estágio da cadeia pode ser vista como estreita, uma vez que o controle de qualidade requerido limita que a distribuição seja realizada por poucas bases.

Tradicionalmente, as cadeias de suprimento por onde fluem combustíveis adotam uma operação voltada para eficiência física na maior parte de sua extensão, pois a demanda tende a se comportar de forma estável, os produtos têm longos ciclos de vida e a variedade de produtos é relativamente baixa. É razoável admitir que o ponto de mediação da demanda do mercado seja representado pelas bases de distribuição, e o ponto de atendimento do pedido do cliente seja o próprio posto de combustível.

### 5.3. IDENTIFICAÇÃO DAS ESTRATÉGIAS LOGÍSTICAS A SEREM AVALIADAS

A configuração da cadeia de biodiesel de mamona deve considerar todas as alternativas logísticas possíveis de forma a identificar aquela que apresenta menor custo.

O subsistema de produção, conforme apresentado na seção anterior, pode ser dividido em duas etapas independentes: produção de óleo vegetal e produção de biodiesel. Ainda que seja possível a construção destas unidades de produção em um único local, conforme diretriz do PNPB estas representam o elo com o subsistema de suprimento e de distribuição, respectivamente. Além disso, por se tratar de uma rede para o escoamento de um único produto, não é possível a aplicação das alternativas de configuração indicadas no Capítulo 4. Assim, a alternativa seria a construção de esmagadoras de mamona próximas às regiões de plantio, enquanto as usinas de biodiesel (Fig. 5.4) seriam atendidas por carregamento de óleo vegetal vindos das esmagadoras e construídas próximas às bases de distribuição.



**FIG. 5.4** Usina de produção de biodiesel

Já os subsistemas de suprimento e de distribuição apresentam como alternativa logística a definição do critério de alocação de suas localizações às instalações do subsistema de produção. Ainda que estas alternativas sejam passíveis da análise de *trade-off*, a adoção destas na rede será pré-definida. A alocação das regiões de plantio às instalações do subsistema de produção não será restrita a uma única instalação, pois como aquelas representam um conjunto de produtores agrícolas, na prática, estes avaliarão individualmente sua melhor opção. Mas a alocação das bases de distribuição

às usinas deverá respeitar a condição de exclusividade no atendimento como forma de garantir a origem e o controle da qualidade.

#### 5.4. MODELAGEM MATEMÁTICA

Após a definição de quais decisões se querem tomar, o escopo do projeto ter sido descrito e as alternativas logísticas terem sido identificadas, a rede logística que se pretende configurar pode ser modelada matematicamente.

Em função de suas particularidades, os modelos de GEOFFRION e GRAVES (1974) e JAYARAMAN (1998) possuem as características necessárias de serem representadas na modelagem do presente problema. Assim, o modelo desenvolvido para o problema em questão reúne as seguintes características:

- Considerando os membros críticos, a rede será constituída de quatro estágios;
- Apenas um produto é considerado, entretanto a análise leva em conta as matérias-primas e produtos intermediários envolvidos no processamento;
- Os custos de transporte são tidos como proporcionais ao volume transportado;
- Definição de limites de capacidade mínimo e máximo das instalações a serem construídas;

Logo, a rede logística do biodiesel de mamona pode ser representada da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z = & \sum_{i,t} FxES_i y2_{it} + \sum_{j,s,t} FxUB_s y3_{jst} + \\
 & \sum_{h,i,t} Tr1_{hit} x1_{hit} + \sum_{i,j,t} Tr2_{ijt} x2_{ijt} + \sum_{j,k,t} Tr3_{jkt} x3_{jkt} + \sum_{m,j,t} Tr4_{mjt} x4_{mjt} + \\
 & \sum_{h,i,t} MpZP_{ht} x1_{hit} + \sum_{m,j,t} MpBC_{mt} x4_{mjt} + \\
 & \sum_{i,j,t} VrES_i x2_{ijt} + \sum_{j,k,t} VrUB_j x3_{jkt} + dB \cdot \sum_{jkt} MnBD_{kt} Dem_{kt} w3_{jkt} + \\
 & \frac{1}{2} \cdot CK \cdot \left( \sum_{h,i,t} \frac{Pr MA}{FrES_i} x1_{hit} + \sum_{i,j,t} \frac{Pr OL}{FrUB_j} x2_{ijt} + \sum_{j,k,t} \frac{Pr B100}{FrBD_k} x3_{jkt} + \sum_{m,j,t} \frac{Pr AL}{FrUB_j} x4_{mjt} \right) + \\
 & \frac{CK}{365} \cdot \left( \sum_{h,i,t} Pr MA \cdot TT1_{hi} \cdot x1_{hit} + \sum_{i,j,t} Pr OL \cdot TT2_{ij} x2_{ijt} + \sum_{j,k,t} Pr B100 \cdot TT3_{jk} x3_{jkt} + \right. \\
 & \left. \sum_{m,j,t} Pr AL \cdot TT4_{mj} x4_{mjt} \right) \tag{5.1}
 \end{aligned}$$

Sujeito a:

$$\sum_i x1_{hit} \leq CapZP_{ht} \quad \forall h, t \quad (5.2)$$

$$\overline{CapES}_i y2_{it} \leq \sum_j x2_{ijt} \leq \overline{CapES}_i y2_{it} \quad \forall i, t \quad (5.3)$$

$$\sum_s \overline{CapUB}_s y3_{jst} \leq \sum_k Dem_{kt} w3_{jkt} \leq \sum_s \overline{CapUB}_s y3_{jst} \quad \forall j, t \quad (5.4)$$

$$\sum_i x4_{mjt} \leq CapBC_{mt} \quad \forall m, t \quad (5.5)$$

$$\sum_j w3_{jkt} = 1 \quad \forall k, t \quad (5.6)$$

$$x3_{jkt} = dB \cdot Dem_{kt} w3_{jkt} \quad \forall j, k, t \quad (5.7)$$

$$Fc12 \cdot \sum_i x1_{hit} = \sum_j x2_{ijt} \quad \forall i, t \quad (5.8)$$

$$Fc23 \cdot \sum_i x2_{ijt} = dB \cdot \sum_k x3_{jkt} \quad \forall j, t \quad (5.9)$$

$$Fc43 \cdot \sum_m x4_{mjt} = dB \cdot \sum_k x3_{jkt} \quad \forall j, t \quad (5.10)$$

$$y2_{it} - y2_{it-1} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (5.11)$$

$$y3_{jst} - y3_{jst-1} \geq 0 \quad \forall j, s, t \quad (5.12)$$

$$\sum_s y3_{jst} \leq 1 \quad \forall j, t \quad (5.13)$$

$$x1_{hit} \geq 0; x2_{ijt} \geq 0; x3_{jkt} \geq 0; x4_{mjt} \geq 0; \\ y2_{it} \in \{0,1\}; y3_{jst} \in I; w3_{jkt} \in \{0,1\} \quad \forall h, i, j, m, s, t \quad (5.14)$$

Onde:

$h$	Índice das zonas de plantio de mamona
$i$	Índice das esmagadoras
$j$	Índice das usinas de biodiesel
$s$	Índice do porte das usinas
$m$	Índice de bases coletoras de álcool
$k$	Índice de bases de distribuição
$t$	Índice de período
$Dem_{kt}$	Demanda de biodiesel na base de distribuição $k$ no período $t$ (m3)
$CapZP_{ht}$	Capacidade da zona de plantio de mamona $h$ no período $t$ (t)
$CapBC_{mt}$	Capacidade da base coletora de álcool $m$ no período $t$ (t)

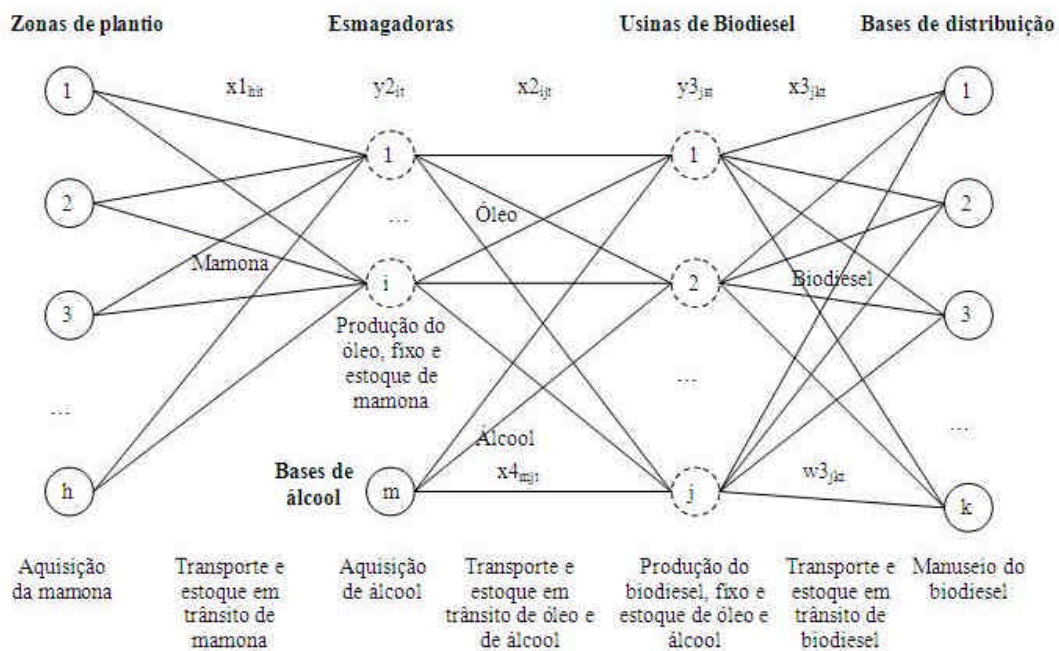
$\underline{CapES}_i$	Capacidade mínima da esmagadora $i$ (t)
$\overline{CapES}_i$	Capacidade máxima da esmagadora $i$ (t)
$\underline{CapUB}_s$	Capacidade mínima da usina tipo $s$ (t)
$\overline{CapUB}_s$	Capacidade máxima da usina tipo $s$ (t)
$dB$	Densidade do biodiesel B100 (t/m <sup>3</sup> )
$Fc12$	Fator de conversão de mamona em óleo vegetal (%)
$Fc23$	Fator de conversão de óleo de mamona em biodiesel B100 (%)
$Fc43$	Fator de conversão de álcool etanol em biodiesel B100 (%)
$FxES_i$	Custo fixo anual de abertura e operação da esmagadora $i$ (R\$)
$FxUB_s$	Custo fixo anual de abertura e operação da usina tipo $s$ (R\$)
$Tr1_{hit}$	Custo unitário de transporte de mamona entre a zona de plantio $h$ e a esmagadora $i$ no período $t$ (R\$/t)
$Tr2_{ijt}$	Custo unitário de transporte de óleo vegetal entre a esmagadora $i$ e a usina $j$ no período $t$ (R\$/t)
$Tr3_{jkt}$	Custo unitário de transporte de biodiesel b100 entre a usina $j$ e a base de distribuição $k$ período $t$ (R\$/m <sup>3</sup> )
$Tr4_{mjt}$	Custo unitário de transporte de álcool entre a base coletora $m$ e a usina $j$ no período $t$ (R\$/m <sup>3</sup> )
$MpZP_{ht}$	Custo da matéria-prima na zona de plantio $h$ no período $t$ (R\$/t)
$MpBC_{mt}$	Custo da matéria-prima na base coletora $m$ no período $t$ (R\$/t)
$VrES_i$	Custo de produção do óleo vegetal na esmagadora $i$ (R\$/t)
$VrUB_s$	Custo de produção do biodiesel B100 na usina $j$ (R\$/t)
$MnBD_{kt}$	Custo de manuseio de biodiesel B100 na base de distribuição $k$ (R\$/t)
$CK$	Custo de capital (% a.a.)
$PrMA$	Preço de mamona (R\$/t)
$PrOL$	Preço do óleo vegetal (R\$/t)
$PrB100$	Preço do biodiesel B100 (R\$/t)
$PrAL$	Preço do álcool (R\$/t)
$FrES_i$	Frequência de re-suprimento da esmagadora $i$ (vezes ao ano)

$FrUB_j$	Frequência de re-suprimento da usina $j$ (vezes ao ano)
$FrBD_k$	Frequência de re-suprimento da base de distribuição $k$ (vezes ao ano)
$TT1_{hi}$	Tempo em trânsito entre a zona de plantio $h$ e a esmagadora $i$ (dias)
$TT2_{ij}$	Tempo em trânsito entre a esmagadora $i$ e a usina $j$ (dias)
$TT3_{jk}$	Tempo em trânsito entre a usina $j$ e a base de distribuição $k$ (dias)
$TT4_{mj}$	Tempo em trânsito entre a base de coleta $m$ e a usina $j$ (dias)
$x1_{hit}$	Quantidade transportada de mamona entre a zona de plantio $h$ e a esmagadora $i$ no período $t$ (t)
$x2_{ijt}$	Quantidade transportada de óleo vegetal entre a esmagadora $i$ e a usina $j$ no período $t$ (t)
$x3_{jkt}$	Quantidade transportada de biodiesel B100 entre usina $j$ e a base de distribuição $k$ no período $t$ (t)
$x4_{mjt}$	Quantidade transportada de álcool entre a base coletora $m$ e usina $j$ no período $t$ (t)
$y2_{it}$	Variável inteira relacionada ao número de esmagadoras abertas na locação $i$ no período $t$
$y3_{jst}$	Variável binária que indica se a usina $j$ do tipo $s$ é aberta no período $t$ (1) ou não (0)
$w3_{jkt}$	Variável binária que indica se a base de distribuição $k$ é atendida pela usina $j$ no período $t$ (1) ou não (0)

O modelo tem por objetivo (5.1) obter a configuração da rede logística ao menor custo total, composto das seguintes parcelas, respectivamente:

- Custos fixos das instalações (esmagadoras e usinas de biodiesel);
- Custo de transporte de mamona, álcool, óleo vegetal e biodiesel;
- Custo de aquisição de mamona e álcool;
- Custo de produção agregado nas esmagadoras e usinas de biodiesel;
- Custo de manuseio de biodiesel nas bases de distribuição;
- Custo de estoque de mamona, álcool, óleo vegetal e biodiesel nas instalações;
- Custo de estoque em trânsito de mamona, álcool, óleo vegetal e biodiesel;

Estando para isso, condicionado aos seguintes requisitos: (5.2) restrição de capacidade das zonas de plantio, (5.3) restrição de capacidade mínima e máxima das esmagadoras, (5.4) restrição de capacidade mínima e máxima das usinas de biodiesel, (5.5) restrição lógica para segmentação das bases de distribuição às usinas de biodiesel, (5.6) restrição de atendimento a demanda; (5.7), (5.8) e (5.9) restrições de balanço de massa nas instalações; (5.10) e (5.11) restrições lógicas de expansão continuada da rede e (5.12) restrição lógica de escolha do porte das usinas. Uma representação genérica da rede logística ora modelada pode ser observada na Fig. 5.5, com as variáveis de decisão e custos envolvidos.



**FIG. 5.5** Representação genérica da rede logística do biodiesel de mamona com as variáveis de decisão e custos envolvidos

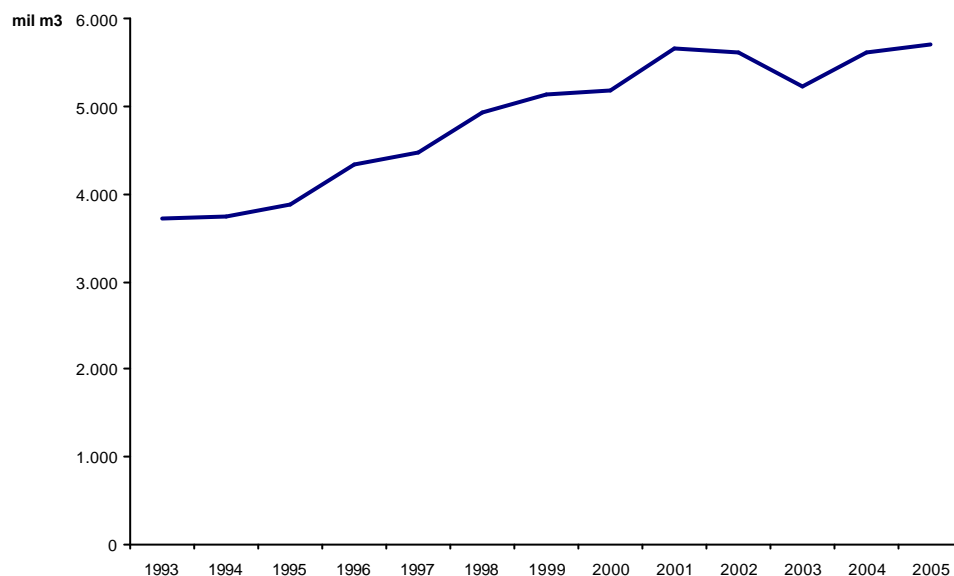
## 5.5. LEVANTAMENTO E TRATAMENTO DE DADOS

### 5.5.1. MERCADO DE DIESEL E DEMANDA DE BODIESEL

Como um sucedâneo do óleo diesel, o mercado potencial para o biodiesel é determinado pelo mercado do derivado de petróleo. Após um crescimento da

demanda de aproximadamente 50% no período de 1993 a 2001, o mercado de diesel no Nordeste encontra-se relativamente estável, como mostra a Fig. 5.6.

**FIG. 5.6** Vendas de óleo diesel pelas distribuidoras no Nordeste



Fonte: ANP (2005)

Admitindo-se a manutenção da estabilidade das vendas de diesel no período de planejamento considerado, estima-se que a demanda de biodiesel por estado será próxima dos valores apresentados na Tab. 5.1.

**TAB 5.1** Demanda estimada de biodiesel B100 com base no mercado de diesel (m³)

<b>Estado</b>	<b>2008 (2%)</b>	<b>2013 (5%)</b>
Alagoas	6.160	15.450
Bahia	41.200	103.000
Ceará	11.300	28.250
Maranhão	14.020	35.100
Paraíba	6.680	16.700
Pernambuco	16.560	41.450
Piauí	6.380	15.950
Rio Grande do Norte	6.820	17.050
Sergipe	4.900	12.250
<b>Nordeste</b>	<b>114.020</b>	<b>285.200</b>

Fonte: Adaptado de ANP (2005)



### 5.5.2. ZONAS DE PLANTIO DE MAMONA

A partir de informações da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), identificaram-se os estados da região onde se pratica a ricinocultura (plantio de mamona), bem como a área plantada, o volume colhido e a produtividade média.

**TAB. 5.2** Áreas plantada, produção e produtividade dos estados nordestinos produtores de mamona na safra 2004/2005

Estado	Área (mil ha)	Produção (mil ton)	Produtividade média (kg/ha)
Piauí	12,0	10,0	830
Ceará	18,0	15,1	840
Rio Grande do Norte	2,2	1,4	630
Pernambuco	8,2	6,1	740
Bahia	169,4	169,4	1000
Nordeste	209,8	202,0	808

Fonte: CONAB (2005)

Considerando que o teor de óleo presente na mamona é de 50%, o coeficiente de óleo para produção de biodiesel no balanço de massa é de 95,4% e densidade do biodiesel é de 0,91 t/m<sup>3</sup>, a atual produção de mamona na região resultaria num total superior a 127.000 m<sup>3</sup> de biodiesel. Logo, este volume, caso fosse todo disponibilizado para a produção de biodiesel, atenderia a demanda no primeiro ano do programa, mas seria insuficiente na segunda etapa, quando o percentual de adição será de 5%.

Pesquisas desenvolvidas pela EMBRAPA na área de melhoria genética e economia agrícola apontam, respectivamente, para a possibilidade de se obter cultivares com teor de óleo de até 60% e técnicas de manejo com produtividade da ordem de 2000 a 3000 kg/ha. Mas estas premissas não serão consideradas, uma vez que ainda estão em fase de estudos e por não haver formas de se garantir a sua aplicação dentro do período de planejamento do projeto.

Assim, para suprir as necessidades futuras de mamona, a EMBRAPA (2004) realizou um zoneamento agrícola da Região Nordeste mapeando os municípios recomendados para o seu plantio. Este levantamento identificou mais de 600 mil hectares de terras e foi feito com base em três critérios:

- Altitude entre 300 e 1500 m acima do nível do mar;

- Precipitação pluviométrica de pelo menos 500 mm;
- Temperatura média do ar entre 20 e 30°C.

A dispersão geográfica e o número destes municípios são apresentados na Figura 5.7 e na Tabela 5.3, respectivamente.



**FIG. 5.7** Regiões consideradas aptas ao plantio de mamona (áreas em destaque)

Fonte: EMBRAPA (2004)

**TAB. 5.3** Número de municípios aptos ao plantio da mamona por estado

Estado	Municípios
Maranhão	12
Piauí	51
Ceará	50
Rio Grande do Norte	12
Paraíba	46
Pernambuco	44
Alagoas	10
Sergipe	3
Bahia	190
<b>Nordeste</b>	<b>418</b>

Entretanto, devido à falta de informação detalhada sobre a área disponível em cada município, e mesmo para simplificação do problema, estes serão agrupados em

zonas de plantio e terão suas ofertas concentradas nos seguintes locais: Balsas (MA), Canto do Buriti (PI), São Miguel do Tapuio (PI), Boa Viagem (CE), Crato (CE), Assu (RN), Ouricuri (PE), Barreiras (BA), Barra (BA), Bom Jesus da Lapa (BA), Campo Formoso (BA), Mucugê (BA) e Vitória da Conquista (BA).

Com relação ao custo de aquisição de mamona, a CONAB (2005) emite semanalmente um relatório com as cotações de preços de mamona no mercado nacional. Obviamente, estes preços sofrem influência de vários fatores e oscilam constantemente ao longo de um ano. Mas como forma de estimular a produção e garantir o abastecimento, o governo federal estabeleceu, junto aos produtores de mamona, um preço mínimo de R\$ 30 a saca de 60 kg. Entretanto, considerar-se-á um valor médio 20% e 30% superior ao preço mínimo, nas regiões de alta e baixa produtividade respectivamente.

### 5.5.3. BASES COLETORAS DE ÁLCOOL

As regiões produtoras de cana-de-açúcar e as usinas de produção de álcool na região Nordeste encontram-se concentradas na faixa litorânea que se estende de Sergipe ao Rio Grande do Norte (ANP, 2004). Deste modo, ainda que o etanol represente uma parcela relativamente pequena do balanço de massa do biodiesel (vide Fig. 5.3), sua localização restrita pode influenciar na localização das usinas de biodiesel.

Entretanto, para simplificação do problema, os fornecedores desta região serão agregados em três bases coletoras de álcool, e terão suas ofertas concentradas nos seguintes municípios: Laranjeiras (SE), Santa Rita (PB) e Ceará-Mirim (RN).

Como referência, adotou-se como preço médio do álcool em Dezembro de 2005 o valor de R\$ 0,995/litro fornecido pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA/ESALQ, 2005).

### 5.5.4. ESMAGADORAS E USINAS DE BIODIESEL

A seleção de locais para as esmagadoras de mamona e as usinas de biodiesel é uma atividade que exige uma avaliação detalhada a cerca de viabilidade técnica, econômica e ambiental de cada locação para que se obtenha um conjunto de locais candidatos. Sob a perspectiva de que estas instalações constituem unidades de

produção, esta atividade deve ser vista segundo o conceito mais amplo de Localização Industrial. Diversas são as técnicas que podem ser utilizadas para este fim.

LIMA *et al* (2004b), por exemplo, por meio de lógica *fuzzy*, comparou entre bases matriciais de oferta e demanda os fatores que recomendam ou restringem a localização territorial de uma atividade do ciclo produtivo da mamona na região Nordeste. Entretanto, como isso foge ao escopo desta dissertação, que visa tão somente à localização de instalações em geral em uma rede logística, adotou-se uma abordagem empírica na seleção dos locais candidatos.

Por representarem estágios intermediários da cadeia de biodiesel no Nordeste, as esmagadoras de mamona e usinas de biodiesel devem situar-se entre as regiões produtoras e os mercados consumidores. Uma vez que a maioria das zonas de plantio concentra-se no interior do Nordeste e a maioria dos fornecedores de álcool e das bases de distribuição que atendem ao mercado (Isso será visto no item seguinte) está próxima as capitais na faixa litorânea da região, é razoável admitir que os melhores locais candidatos situem-se no caminho entre estas regiões. Assim, optou-se por aquelas cidades que estivessem na região intermediária. Além disso, buscaram-se cidades localizadas próximas de entroncamentos rodoviários, possibilitando a interligação direta em diversas direções e permitindo a redução dos custos logísticos. Ao todo foram selecionados 20 locais para esmagadoras e 15 locais para usinas de biodiesel (Ver Anexo I).

PIRES *et al* (2004) realizaram uma avaliação econômica do biodiesel de mamona e estimaram o custo da sua produção. Para o cenário atual de produtividade média e considerando o processo de produção em que o biodiesel obtido do óleo de mamona, temos os seguintes valores: custo do processo de esmagamento a R\$ 0,25/kg, preço de aquisição do óleo de mamona a R\$ 0,91/litro, custo do processo de transesterificação a R\$ 0,58/litro e custo do biodiesel a R\$ 1,49/litro.

MENDES (2005) afirma que existem fabricantes nacionais e estrangeiros de máquinas e equipamentos utilizados no processo de extração de óleo de mamona. Em se tratando de valores de investimentos, ele estima que para uma esmagadora com capacidade nominal de 300 kg/h seja necessário investir R\$ 480.000,00. Enquanto que para uma usina de biodiesel, optou-se por permitir que o modelo escolha o porte mais adequado. Para isso, têm-se as estimativas apresentadas na tabela 5.4.

**TAB. 5.4** Investimentos em usinas de biodiesel

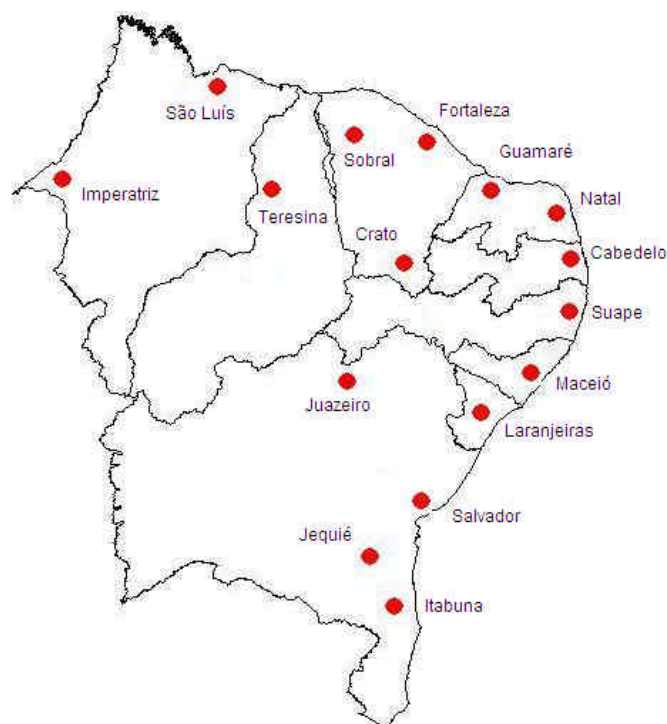
Tipo	Capacidade (mil ton/ano)	Investimento (US\$)	Depreciação (R\$) <sup>(1)</sup>
Médio porte	30.000	7,5 milhões	2,920 milhões
Grande porte	100.000	13,3 milhões	5,191 milhões

Fonte: MENDES (2005)

(1) Calculado considerando taxa de câmbio a R\$ 2,20/US\$, taxa de juros a 12% a.a., tempo de depreciação de 10 anos e valor residual de R\$ 0,00.

#### 5.5.5. BASES DE DISTRIBUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS

Com observado na etapa 2, as bases de distribuição representam o último estágio da cadeia do biodiesel neste estudo de caso. Assim, para uso no modelo, os valores de demanda foram associados às respectivas bases de distribuição que operam diesel nos estados do Nordeste (Fig. 5.8). Ao todo são 16 bases, e estão localizadas em: Imperatriz (MA), São Luís (MA), Teresina (PI), Sobral (CE), Fortaleza (CE), Crato (CE), Guamaré (RN), Natal (RN), Cabedelo (PB), Suape (PE), Maceió (AL), Laranjeiras (SE), Juazeiro (BA), Salvador (BA), Jequié (BA) e Itabuna (BA).



**FIG. 5.8** Bases de distribuição de combustíveis que operam diesel no Nordeste

Fonte: ANP (2004)

Ainda que este estudo não esteja prevendo mudanças em termos de volume total movimentado de diesel, será necessária a ampliação do parque de tancagem das bases de distribuição, bem como a adequação das instalações a nova atividade. Isso permitirá para que seja feita a estocagem do biodiesel B100 quando da sua recepção e, a posteriori, a sua mistura ao diesel mineral no caminhão-tanque. Entretanto, dado que todo o diesel consumido no País deverá respeitar os percentuais de adição estipulados pelo programa, torna-se irrelevante, do ponto de vista de otimização, a inclusão destes custos no modelo.

#### 5.5.6. TRANSPORTES

Uma vez que foram estabelecidas as localizações dos membros dos estágios que compõem a rede logística, é possível tecer considerações sobre os transportes que realizarão a sua interligação.

Com relação às alternativas de modos de transporte, esta deve ficar restrita ao modo rodoviário. A oferta de transporte ferroviário na região Nordeste é escassa, e quando disponível, opera com baixa eficiência. E os demais modos de transporte atualmente são impróprios ou inviáveis para a movimentação do biodiesel. Devido a características higroscópicas, o biodiesel se deteriora na presença de água, de forma que é preciso que ocorra ainda o desenvolvimento de soluções técnicas e econômicas para que o transporte seja feito pelo modo aquaviário. Além disso, para que o modo dutoviário se torne viável, é preciso que a escala de produção atinja grandes volumes, o que só será possível quando do desenvolvimento e disseminação de motores que operem com o biodiesel B100.

De acordo com MENDES (2005), como a baga da mamona será fornecida por pequenos produtores, cooperativas e grandes produtores de mamona, ela poderá ser transportada a granel ou em sacas de 50 ou 60 kg. No transporte a granel poderão ser utilizados caminhões cuja capacidade é de até 15 toneladas. No transporte em sacas poderão ser utilizadas carretas cuja capacidade de transporte pode chegar a 32 toneladas.

A definição do tipo de transporte a ser adotado depende do número e do porte dos fornecedores de mamonas em bagas, por causa do problema da consolidação da carga. No entanto, diante da diversidade dos fornecedores, provavelmente será necessário que os dois tipos de veículos acima citados sejam empregados. Já com

relação ao óleo, MENDES (2005) prevê que poderá ser distribuído por caminhões-tanque, que hoje possuem uma capacidade de 20 mil litros.

Com relação aos custos de transporte, como a rede em questão está sendo estruturada desde o seu início, não se dispõem de dados reais para todos os custos incorridos ao longo de sua cadeia. Assim, buscaram-se como referência os custos de transporte de outras cadeias pela similaridade de seus produtos e da operação de sua rede.

Para os custos de transporte rodoviário de mamona ensacada, de óleo vegetal a granel e álcool, adotaram-se os valores médios de R\$ 0,0999/t.km, R\$ 0,1381/t.km e R\$ 0,1503/t.km (ESALQ, 2006). Estes dados foram obtidos do Sistema de Informações de Frete (SIFRECA), que informa semanalmente os momentos de transporte para diversos produtos agrícolas. Os dois primeiros valores referem-se, respectivamente, ao farelo de soja ensacado e ao óleo de soja.

Para os custos de transporte de biodiesel, considerou-se que estes sejam próximos aos praticados atualmente com o transporte de diesel no valor de R\$ 0,182/t.km (ANP, 2005).

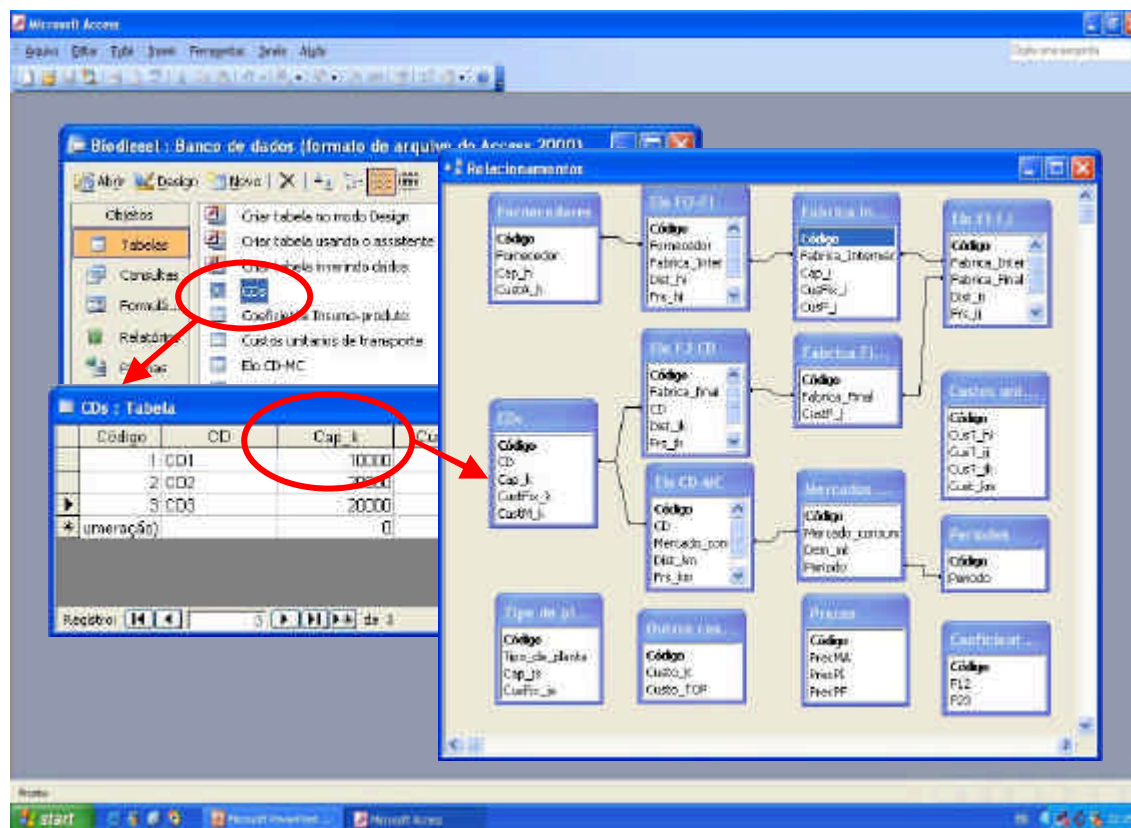
As distâncias rodoviárias de transporte foram estimadas. Com base nas coordenadas geográficas das cidades obtidas no site do IBGE, determinou-se a distância em linha reta entre as cidades de cada estágio da cadeia, utilizando a expressão (4.1). O fator de sinuosidade, por sua vez, foi obtido pela comparação de uma amostra de distâncias reais com as respectivas distâncias calculadas. O valor estimado do fator foi de 1,235.

## 5.6. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL EM GAMS

Conforme a recomendação do procedimento proposto, a etapa de implementação computacional foi realizada seguindo a estrutura de um SSD. Servindo de interface com o usuário para a entrada de dados, foi desenvolvido um banco de dados em Access (Fig. 5.9).

Este banco de dados tem a função de armazenar as informações levantadas e tratadas na etapa anterior, identificando de forma única cada índice e parâmetro incluído no modelo. Desenvolvido em 20 tabelas, os dados podem ser classificados em três grupos: estágios da rede logística (zonas de plantio, esmagadoras, usinas e

bases de distribuição), arcos de transporte entre os estágios e parâmetros constantes do problema.



**FIG. 5.9** Vista do banco de dados em Access

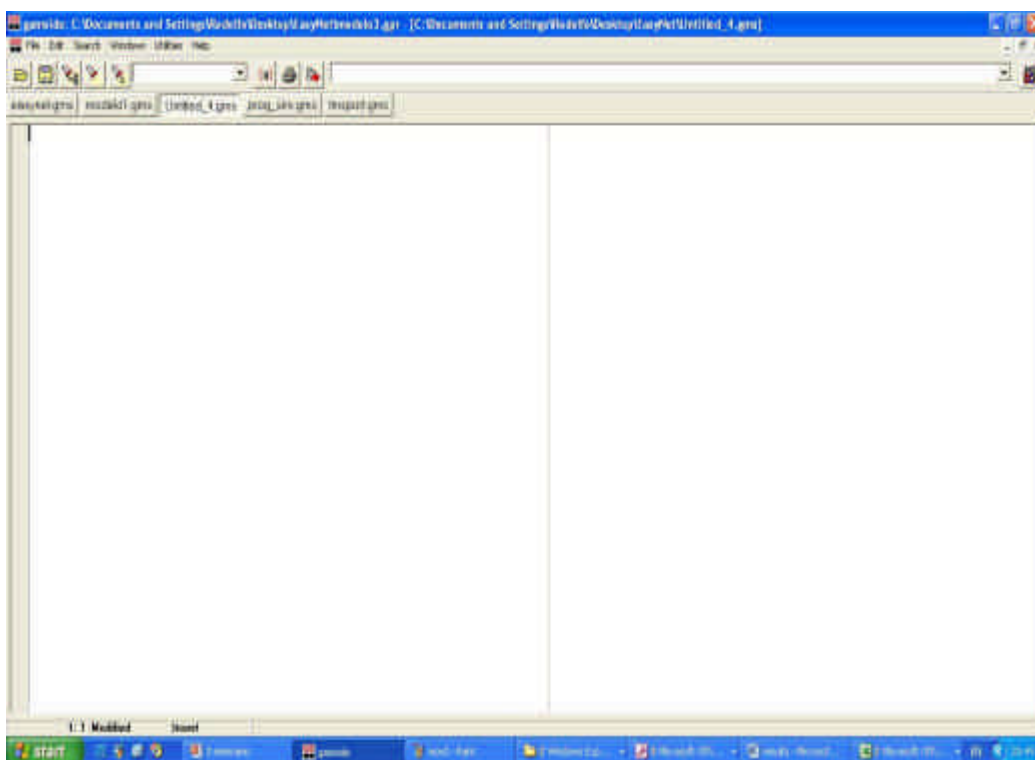
Para sistematizar a aplicação do modelo, foi desenvolvido um código de programação (Ver Anexo II). Para isso, utilizou-se o GAMS 22.1 (*General Algebraic Modeling System*), um sistema de modelagem de alto nível para problemas de programação matemática (Fig. 5.10). Segundo GEOFFRION (1992), o GAMS se destaca entre os sistemas de modelagem pelo seu pioneirismo, maturidade e popularidade no meio acadêmico.

Entre suas funcionalidades, está a possibilidade de importação de dados armazenados em Access por meio do *add-in MDB2GMS*, eximindo o usuário da necessidade de inclusão de dados dentro do código, o que exigiria cuidados com a disposição dos mesmos.

Para resolução do modelo de programação linear inteira mista, o *solver* (otimizador) utilizado pelo GAMS foi o CPLEX 10.0, desenvolvido para resolver



problemas grandes e difíceis rapidamente e com mínima intervenção do usuário (GAMS, 2005).



**FIG. 5.10** Vista do GAMS

Ao final do código, configurou-se ainda a exportação das soluções para o um relatório gerencial em Word, com o valor das parcelas de custos da função objetivo e o resultado das variáveis independentes (Ver Anexo III).

## 5.7. VALIDAÇÃO DO MODELO E DOS DADOS

Se a cadeia do biodiesel já existisse, seria possível verificar a aderência dos dados e do modelo à realidade, reconstituindo-se a configuração da rede existente e comparando as alocações feitas na prática com a solução ótima. Mas como isso não se aplica a este caso, não é possível de se realizar este teste.

Entretanto, antes que se defina a configuração da rede logística do biodiesel a partir da solução do modelo matemático desenvolvido neste capítulo, outros testes podem ser feitos para testar e/ou validar o modelo. Para isso, considerou-se inicialmente o modelo apenas para o período quando a configuração da rede deverá

estar totalmente implantada, uma vez que é mais simples validar um modelo de um único período.

O primeiro teste consiste na resolução de um modelo livre, eliminando restrições de capacidade e custos fixos das instalações da função objetivo, de forma que o modelo gere os fluxos físicos que minimizam os custos de aquisição, transporte, produção e manuseio.

Nas tabelas 5.5 e 5.6, observa-se que nem todas as locações elegíveis para a instalação de esmagadoras e de usinas de biodiesel foram utilizadas mesmo na ausência de custos fixos, indicando que não contribuem para a redução dos custos logísticos.

Estas locações poderiam ser descartadas do conjunto de locais candidatos, possibilitando inclusive a redução do porte do problema, mas serão mantidas, pois permitirá a análise de sensibilidade do modelo com outros custos envolvidos e por não ter demandado um tempo de processamento excessivo.

**TAB. 5.5** Produção por esmagadora no modelo livre em 2013

<b>Locais das esmagadoras</b>	<b>UF</b>	<b>Produção (t de óleo/ano)</b>
Grajaú	MA	-
São Raimundo das Mangabeiras	MA	30437
Canto do Buriti	PI	5825
Campo Maior	PI	13875
Floriano	PI	-
São Raimundo Nonato	PI	24332
Crateús	CE	-
Quixadá	CE	-
Quixeramobim	CE	18040
Caicó	RN	13635
Poçinhos	PB	1268
Queimadas	PB	50972
Souza	PB	-
Serra Talhada	PE	-
Brumado	BA	32666
Caetité	BA	23710
Ibotirama	BA	222
Irecê	BA	-
Itaberaba	BA	32666
Seabra	BA	-
<b>Total</b>		<b>247648</b>

**TAB. 5.6** Produção por usina de biodiesel no modelo livre em 2013

Locais de usinas	UF	Produção (t de biodiesel/ano)
São Luís	MA	51430
Floriano	PI	19381
Teresina	PI	7231
Fortaleza	CE	16180
Piquet Carneiro	CE	-
Quixadá	CE	2725
Guamaré	RN	14290
Campina Grande	PB	3913
Serra Talhada	PE	-
Petrolina	PE	9676
Recife	PE	26813
Feira de Santana	BA	14577
Irecê	BA	-
Jequié	BA	21359
Salvador	BA	71956
Total		259531

Assim, o teste seguinte consiste em rodar o modelo capacitado, onde se espera uma concentração maior da capacidade produtiva em um número menor de locações devido à consideração dos custos fixos, conforme observado na Fig. 2.5.

O modelo capacitado forneceu uma solução ótima cujo resultado da função-objetivo é de um custo total de R\$ 698.028.229, porém ainda sem os custos de estoque. Como pode ser observado na tabela 5.7, aproximadamente 91,5% dos custos é composto pelo custo de aquisição das matérias-primas e pelo custo de produção agregado nas instalações. A participação dos custos fixos no custo total é limitada a cerca de 3,4%, enquanto o de transporte representa 4,9% do total.

**TAB. 5.7** Composição dos custos no modelo capacitado em 2013

Subsistema	Parcela	Custo (R\$)	Contribuição
Suprimento	Custo de aquisição de mamona	305.441.900	43.76%
	Custo de aquisição de álcool	44.872.185	6.43%
	Custo de transporte de mamona	7.915.713	1.13%
	Custo de transporte de álcool	1.996.313	0.29%
Produção	Custo fixo das esmagadoras	8.000.000	1.15%
	Custo fixo das usinas de biodiesel	15.574.500	2.23%
	Custo de produção de óleo	123.822.519	17.74%
	Custo de produção de biodiesel b100	164.802.820	23.61%
	Custo de transporte de óleo	11.836.362	1.70%
Distribuição	Custo de transporte de biodiesel	12.115.572	1.74%
	Custo de manuseio e mistura de biodiesel	1.650.345	0.24%
Custo total		698.028.229	100%

Para este modelo, as instalações abertas foram 3 usinas de grande porte em Salvador, Teresina e Serra Talhada, e 25 esmagadoras distribuídas em 8 locais, quais sejam, Canto do Buriti, São Raimundo Nonato, Queimadas, Itabuna, Serra Talhada, Caetitê, Brumado e Campo Maior, confirmando assim a expectativa de redução do número de locações utilizadas.

Por fim, o último teste consiste em avaliar o impacto dos custos de estoque na configuração da cadeia de biodiesel, onde se espera que esta inclusão se reflita num custo mais apurado da rede logística.

Considerando-se a taxa básica financeira acumulada em 2005 acrescida do custo de armazenamento (18,5% a.a.), obteve-se um custo total mínimo de R\$ 736.423.145, com uma convergência inferior a 0,01%. Pela tabela 5.8, observa-se que a contribuição do custo de estoque é de aproximadamente 5,2% do custo total, mas mesmo com a sua inclusão, a configuração das instalações e a alocação de fluxos entre elas não se altera.

**TAB. 5.8** Composição dos custos no modelo capacitado com estoques em 2013

Subsistema	Parcela	Custo (R\$)	Contribuição
Suprimento	Custo de aquisição de mamona	305.441.900	41.48%
	Custo de aquisição de álcool	44.872.185	6.09%
	Custo de transporte de mamona	7.915.713	1.07%
	Custo de transporte de álcool	1.996.313	0.27%
	Custo de estoque em trânsito de mamona	44.623	0.01%
	Custo de estoque em trânsito de álcool	92.964	0.01%
Produção	Custo fixo das esmagadoras	8.000.000	1.09%
	Custo fixo das usinas de biodiesel	15.574.500	2.11%
	Custo de produção de óleo	123.822.519	16.81%
	Custo de produção de biodiesel b100	164.802.820	22.38%
	Custo de transporte de óleo	11.836.362	1.61%
	Custo de estoque de mamona nas esmagadoras	36.651.466	4.98%
	Custo de estoque de óleo vegetal nas usinas de biodiesel	954.465	0.13%
	Custo de estoque de álcool nas usinas de biodiesel	377.413	0.05%
	Custo de estoque em trânsito de óleo vegetal	60.335	0.01%
Distribuição	Custo de transporte de biodiesel	12.115.572	1.65%
	Custo de manuseio e mistura de biodiesel	1.650.345	0.22%
	Custo de estoque de biodiesel nas bases de distribuição	200.252	0.03%
	Custo de estoque em trânsito de biodiesel b100	13.397	0.00%
Custo total		736.423.145	100.00%

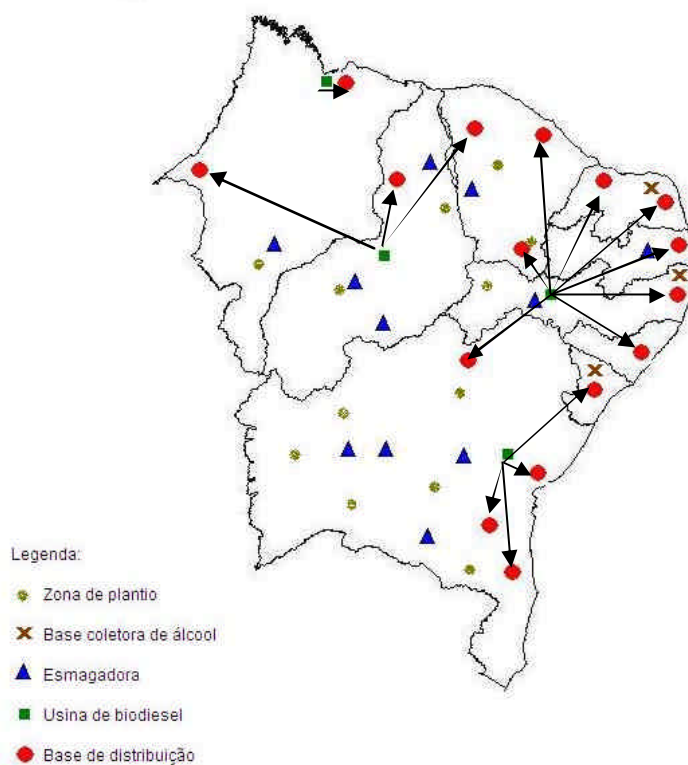
Isso já era esperado, pois o modelo não faz nenhuma consideração sobre estoques de segurança, nem considera modos de transporte alternativos com

freqüências de re-suprimento diferentes. Caso, por exemplo, estas freqüências fossem consideradas variáveis de decisão, a influência dos estoques na configuração seria melhor percebida, mas isso tornaria o modelo não linear.

Depois de realizados os testes supracitados, solucionou-se o modelo completo como apresentado na etapa de modelagem matemática. Considerando-se a restrição de expansão contínua da rede, onde as instalações abertas no primeiro período devem ser mantidas no segundo período, obteve-se um custo total mínimo de R\$ 1.036.473.403, com uma convergência inferior a 0,01% (Ver Tabela 5.9). As usinas de biodiesel abertas foram 1 de médio porte em Floriano e 1 de grande porte em Feira de Santana no ano de 2008, mais 2 de grande porte em Serra Talhada e São Luís em 2013. Já as esmagadoras foram 10 no primeiro período e 25 no segundo distribuídas em 7 e 11 cidades respectivamente (Ver. Tabelas 5.10 e 5.11). O conjunto de instalações abertas e os fluxos de biodiesel podem ser visto na Figura 5.9.

**TAB. 5.9** Composição dos custos no modelo de múltiplos períodos

Subsistema	Parcela	Custo (R\$)	Contribuição
Suprimento	Custo de aquisição de mamona	425.629.391	41.07%
	Custo de aquisição de álcool	62.811.776	6.06%
	Custo de transporte de mamona	12.294.510	1.19%
	Custo de transporte de álcool	2.584.964	0.25%
	Custo de estoque em trânsito de mamona	69.308	0.01%
	Custo de estoque em trânsito de álcool	144.625	0.01%
Produção	Custo fixo das esmagadoras	11.200.000	1.08%
	Custo fixo das usinas de biodiesel	26.606.000	2.57%
	Custo de produção de óleo	173.325.911	16.72%
	Custo de produção de biodiesel b100	230.689.855	22.26%
	Custo de transporte de óleo	16.408.560	1.58%
	Custo de estoque de mamona nas esmagadoras	51.304.470	4.95%
	Custo de estoque de óleo vegetal nas usinas de biodiesel	1.336.054	0.13%
	Custo de estoque de álcool nas usinas de biodiesel	528.300	0.05%
	Custo de estoque em trânsito de óleo vegetal	83.642	0.01%
Distribuição	Custo de transporte de biodiesel	18.848.236	1.82%
	Custo de manuseio e mistura de biodiesel	2.310.141	0.22%
	Custo de estoque de biodiesel nas bases de distribuição	280.311	0.03%
	Custo de estoque em trânsito de biodiesel b100	17.348	0.00%
Custo total		1.036.473.403	100.00%



**FIG. 5.10** Fluxos de biodiesel de mamona no Nordeste em 2013

**TAB. 5.10** Esmagadoras selecionadas e utilização da capacidade

Esmagadora	UF	Total em	
		2008	2013
São Raimundo das Mangabeiras	MA		2
Canto do Buriti	PI	2	2
Campo Maior	PI		1
São Raimundo Nonato	PI	1	2
Crateús	CE		1
Queimadas	PB	2	5
Serra Talhada	PE		3
Brumado	BA	1	3
Ibotirama	BA	1	1
Itabuna	BA	2	4
Seabra	BA	1	1
Capacidade instalada (t/ano)		100.000	250.000
Demanda (t de óleo/ano)		99.006	247.645
Utilização (%)		99%	99%

**TAB. 5.11** Usinas de biodiesel selecionadas e utilização da capacidade

Cidade	Estado	Porte	Total em	
			2008	2013
Florianópolis	PI	Médio	1	1
Feira de Santana	BA	Grande	1	1
Serra Talhada	PE	Grande		1
São Luís	MA	Grande		1
Capacidade instalada (t/ano)			130.000	330.000
Demanda (t/ano)			103.758	259.532
Demanda (m <sup>3</sup> /ano)			114.020	285.200
Utilização (%)			80%	79%

Observa-se que a capacidade instalada nas esmagadoras apresenta alta taxa de utilização. A relação completa das respostas encontra-se no Anexo III referente ao Relatório de saídas do modelo.

## 5.8. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Foram desenvolvidas três análises, todas elas relevantes para tomada de decisão de um projeto de rede logística como o deste estudo de caso:

- Sensibilidade da solução à variação da demanda;
- Sensibilidade da solução aos custos logísticos;
- Sensibilidade da solução ao nível de serviço.

Nesta etapa o GAMS tem aplicação restrita, pois é capaz de informar apenas os custos marginais das variáveis da função objetivo e das restrições, não indicando o intervalo para o qual os mesmos são válidos. Entretanto, com rodadas complementares é possível obter soluções econômicas e confiáveis.

### 5.8.1. SENSIBILIDADE DA SOLUÇÃO À VARIAÇÃO DA DEMANDA

Analisando as restrições de garantia de atendimento à demanda, obtiveram-se os custos marginais para cada base de distribuição (Ver Tabela 5.12). Observa-se que Salvador é a cidade que pode ter uma demanda adicional atendida ao menor custo, o que, em grande parte, se deve a existência de uma usina na própria cidade com capacidade ociosa. Em contrapartida, a base de Fortaleza é a mais cara de ser atendida para uma demanda adicional.

**TAB. 5.12** Custos marginais de atendimento a demanda nas bases de distribuição

<b>Bases de distribuição</b>	<b>Custo marginal (R\$/m<sup>3</sup>)</b>
Salvador	2730
Teresina	2746
Jequié	2753
Laranjeiras	2761
Itabuna	2766
Crato	2776
São Luis	2783
Sobral	2795
Juazeiro	2802
Imperatriz	2806
Maceió	2811
Suape	2819
Guamaré	2821
Cabedelo	2823
Natal	2827
Fortaleza	2837

Ainda com bases nestas informações, é possível indicar ações gerenciais prioritárias para quando a rede estiver em operação, como o desenvolvimento da demanda em regiões onde os custos marginais são menores e a busca por soluções operacionais de menores custos para as cidades onde os custos marginais são maiores.

Aumentos proporcionais da demanda por toda a região provocam a ocupação da capacidade instalada e a realocação dos fluxos, até o ponto em que aumentos superiores à capacidade instalada demandam que novas instalações sejam abertas.

### 5.8.2. SENSIBILIDADE DA SOLUÇÃO AOS CUSTOS LOGÍSTICOS

Como se verificou nos primeiros testes, a configuração da rede logística é fortemente influenciada pelos custos de suprimento e produção. E de acordo com o mencionado na etapa 5, foram considerados custos de aquisição de mamona diferenciados por zona de plantio segundo as suas produtividades, sendo a Bahia o estado com os custos mais baixos. Em razão disso, praticamente toda a quantidade ofertada nesta região é consumida, com mostra a tabela 5.13, sendo os custos marginais menores aos de outras zonas de plantio.



**TAB. 5.13** Custos marginais do fornecimento de mamona nas zonas de plantio

Zona de plantio	UF	Consumo (t/ano)	Disponibilidade (t/ano)	Custo marginal (mil R\$/t)
Balsas	MA	40.000	60.873	0
Canto do Buriti	PI	26.627	70.651	0
São Miguel do Tapuio	PI	27.749	27.749	-3.102
Boa Viagem	CE	12.251	20.067	0
Crato	CE	19.459	19.459	-5.955
Ouricuri	PE	38.598	40.365	0
Assu	RN	0	29.806	0
Barreiras	BA	673	151.097	0
Barra	BA	48.663	48.663	-10.049
Bom Jesus da Lapa	BA	48.663	48.663	-8.933
Campo Formoso	BA	101.943	101.943	-30.024
Mucugê	BA	65.332	65.332	-36.229
Vitória da Conquista	BA	65.332	65.332	-18.859

Entretanto, como a oferta atual de mamona é insuficiente para atender ao programa plenamente, é possível que o aumento da oferta na região provoque queda nos preços da mamona, de modo que se torna relevante analisar a configuração da rede logística diante deste cenário.

Considerando o preço mínimo garantido pelo Governo Federal de R\$ 500 a tonelada, observou-se que a localização e porte das usinas não sofrem influência. Entretanto, a localização das esmagadoras é influenciada, assim como a quantidade destas por local. É razoável que isso aconteça, pois considerando o fluxo ao longo da cadeia do biodiesel o estágio das esmagadoras sofre mais influência pelo lado da oferta, enquanto o das usinas pelo lado da demanda. Com o nivelamento dos preços, os custos de transportes passam a se tornar determinantes na alocação dos fluxos. E há uma troca na quantidade de esmagadoras por região. No cenário base, a Bahia apresentava 9 esmagadoras, e após a mudança, reduziu-se para 6 esmagadoras.

### 5.8.3. SENSIBILIDADE DA SOLUÇÃO À VARIAÇÃO DO NÍVEL DE SERVIÇO

A solução ótima apresentada pelo modelo é válida apenas para as premissas e os dados considerados, mas é sabido para todos estes fatores existem incertezas associadas.

Analisando a solução reportada pelo modelo, destaca-se o fato de as esmagadoras apresentarem alta taxa de utilização (Ver Tab. 5.10), representando o gargalo da cadeia de suprimentos. Qualquer elevação na demanda, implica na abertura de novas esmagadoras, ou considerando que a solução implantada na prática seja essa, significaria perda de vendas, um importante indicador do nível de serviço.

Em face disso, decidiu-se avaliar a robustez da solução diante da incerteza da demanda, principal variável exógena do problema. Para isso, admitiu-se que a demanda nas bases de distribuição apresentam um comportamento segundo uma distribuição normal e um coeficiente de variação de 20%.

Utilizando a funcionalidade de *Save and Restart* (Salvar e reiniciar) do GAMS, replicou-se o modelo 1000 vezes. Sendo que, para cada simulação, a solução ótima determinística foi colocada como fixa (incluídas restrições que obrigam a abertura destas instalações), enquanto a demanda para cada base e cada período é sorteada aleatoriamente segundo a distribuição mencionada acima. Como era de se esperar, aproximadamente 50% das rodadas apresentaram-se inviáveis. Em outras palavras, a probabilidade de não faltar produto é de 50%, um nível de serviço muito baixo.

Optou-se então, por agregar ao conjunto de instalações impostas, o complemento das esmagadoras reportadas na análise de sensibilidade anterior, resultando numa oferta de 14 e 32 esmagadoras em 2008 e 2013, respectivamente. Com isso, reduziu-se o número de rodadas inviáveis para 2% do total, ou seja, dada esta incerteza associada à demanda e esta configuração, a probabilidade de não faltar produto é de 98%. Entretanto, duas esmagadoras no primeiro ano e cinco no segundo não foram utilizadas na situação de demanda média e, portanto descartadas. Isso reduziu a probabilidade para 97,8%. O acréscimo no custo total desta configuração em relação à solução ótima foi de 0,3%. Entretanto destaca-se que este resultado não leva em consideração os custos de estoque de segurança.

## 5.9. CRONOGRAMA DE IMPLANTAÇÃO

Estudos prospectivos sobre o biodiesel, como o de LIMA (2004a), apontam para o crescimento substancial da demanda de biodiesel até o ano de 2035, em função do desenvolvimento de novos motores, da diminuição das reservas mundiais de petróleo e da própria redução dos custos deste biocombustível. Deste modo, a rede

logística do biodiesel deverá acompanhar este crescimento contínuo e irreversível, exigindo a revisão constante da expansão de sua estrutura e capacidade produtiva.

Assim, para se garantir a sustentabilidade deste processo, estabeleceu-se um cronograma ótimo de abertura de instalações com base nos resultados na análise de sensibilidade, obtido diretamente do modelo de múltiplos períodos. Os valores dos investimentos requeridos são apresentados na Tabela 5.14 e 5.15.

**TAB. 5.14** Cronograma de abertura e estimativa total de investimentos em esmagadoras

Esmagadoras	UF	Qtde aberta em	
		2008	2013
São Raimundo das Mangabeiras	MA		3
Canto do Buriti	PI	2	
Campo Maior	PI		1
São Raimundo Nonato	PI	1	1
Crateús	CE		1
Queimadas	PB	3	2
Serra Talhada	PE		3
Irecê	BA	1	
Brumado	BA	1	2
Ibotirama	BA	1	
Itabuna	BA	2	2
Seabra	BA	1	
Investimentos (milhões de R\$)		21,9	27,4

**TAB. 5.15** Cronograma de abertura e estimativa total de investimentos em usinas

Usinas	UF	Qtde aberta em	
		2008	2013
Floriano	PI	1 mp	
Feira de Santana	BA	1 gp	
São Luis	MA		1 gp
Serra Talhada	PE		1 gp
Investimentos (milhões de R\$)		45,8	58,7

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1. CONCLUSÕES

A evolução do conceito de gerenciamento da cadeia de suprimentos vem encorajando as empresas a planejarem suas atividades e formas de atuação além de suas plantas industriais. Adiante disso, diversas têm sido as práticas adotadas para alcançar o melhor desempenho possível, tais como: compartilhamento crescente de informações, ferramentas de planejamento operacional da cadeia, previsão e re-suprimento colaborativos e terceirização de operações logísticas. Entretanto, antes que estas medidas sejam adotadas, o projeto de rede logística deve ser considerado.

A caracterização dos principais aspectos das cadeias de suprimento que influenciam o projeto de rede logística permitiu identificar a relação empírica entre estes aspectos e as formas de configuração da rede. Dentre eles, destacam-se o produto e a demanda como os principais norteadores das decisões da rede. Assim, o número, a localização (proximidade ou não dos clientes) e a capacidade das instalações devem ser adequados ao tipo de produto e comportamento da demanda que se esperam para a rede.

Além disso, com a revisão dos modelos existentes aplicáveis ao projeto de rede logística, observou-se que a programação linear inteira mista constitui uma importante ferramenta para a configuração da rede, permitindo determinar a solução ótima para as premissas consideradas.

Neste contexto, o procedimento proposto nesta dissertação mostra-se como um importante instrumento para o planejamento e aperfeiçoamento de redes logísticas, subsidiando à tomada de decisão do projeto de rede logística.

Suas etapas foram elaboradas a partir da análise dos diversos fatores que influenciam a configuração de redes logísticas, tais como características dos produtos, comportamento da demanda, tipos de operações e custos envolvidos. Assim como de ferramentas que auxiliam a transformação de idéias e objetivos do estudo em resultados práticos, como modelos matemáticos e linguagens de programação.

Para obter sucesso, a aplicação prática de um procedimento como este, baseado numa abordagem sistêmica e de amplos impactos na organização, pressupõe

a integração de diversas áreas da empresa, tais como planejamento, produção, marketing, comercial e contábil, além da área de logística propriamente dita.

As etapas iniciais de Identificação da necessidade de planejamento, Definição de escopo e Identificação de estratégias logísticas a serem avaliadas são as etapas onde os aspectos estratégicos do negócio são os mais relevantes de serem analisados. Portanto, considera-se importante que suas análises sejam bem fundamentadas e discutidas entre as áreas, pois representam o insumo do todo processo, de modo que análises superficiais podem gerar re-trabalhos.

Já as etapas de Modelagem analítica, Levantamento e tratamento de dados e Implementação computacional exigem conhecimento técnico em assuntos como programação matemática, estatística e banco de dados. Quando a rede a ser planejada inexistente, a obtenção de dados torna-se um desafio. A ausência de um sistema de informação gerencial com dados transacionais da empresa exige que sejam feitas estimativas e análises, resultado de estudos específicos desenvolvidos por cada área. Por vezes, a contratação de consultorias especializadas se torna necessária.

Finalmente, superado o esforço das etapas anteriores, o estudo é concluído com as etapas de Validação do modelo e dos dados, Análise de sensibilidade e Cronograma de Implantação. Nesta parte, a solução é avaliada frente aos valores médios esperados para os parâmetros, e validada diante de riscos e incertezas em cenários prováveis de forma a dar suporte ao tomador de decisão.

Com relação ao estudo de caso, observou-se o quanto a análise de projetos de rede logística constitui uma tarefa complexa e abrangente. O exemplo do biodiesel de mamona, assim como poderia ser com qualquer outro produto, ilustra o quanto a adequada configuração da rede logística impacta no custo total, reforçando mais uma vez a importância do procedimento proposto.

Nesta dissertação, procurou-se abordar este tema de uma forma geral, de modo que o procedimento fosse aplicável as mais diversas situações. Logo, não se espera que este procedimento seja rígido, mas que sirva como um guia orientador na busca por boas soluções. Vale lembrar que estas também dependem da criatividade empregada em cada etapa.

Além disso, buscou-se enfatizar a necessidade de integração entre as abordagens qualitativa e quantitativa do problema. Em geral, foca-se apenas na descrição conceitual da cadeia sem a análise da localização das instalações, ou no

desenvolvimento e/ou aplicação de modelos matemáticos sem que seja feita uma discussão prévia em detalhes do escopo e dos dados requeridos.

Assim, este estudo apresenta contribuições que ajudam a reduzir uma lacuna existente entre as dissertações publicadas no Brasil no que tange ao assunto projeto de rede logística.

## 6.2. RECOMENDAÇÕES

Como proposta para a continuidade desta pesquisa, apresenta-se como sugestão o aprofundamento em questões específicas de algumas das etapas do procedimento, de forma a complementá-lo definindo o “como fazer”.

Conforme observado na pesquisa, a agregação de dados é uma necessidade do projeto de rede logística com o propósito de simplificação da análise, diminuição do tempo computacional e redução da quantidade de dados manipulados. Entretanto, são poucos os trabalhos que reportam o erro associado à agregação de dados. Dentre estes dados, destacam-se os grupos de produtos, as zonas de consumo e as curvas de custo de transporte. Este estudo envolve a análise do *trade-off* entre a complexidade do modelo e o realismo do problema.

Outro fator raramente abordado nos projetos de rede logística é a incerteza associada à demanda. Neste trabalho, esta consideração foi feita na análise de sensibilidade graças a uma funcionalidade do GAMS, onde foi simulado o custo total para uma configuração pré-definida. Entretanto, assumiu-se a distribuição como sendo normal e arbitrou-se o desvio-padrão. Deste modo, sugeriu-se a aplicação da abordagem adotada em uma situação real, ou mesmo a ampliação da pesquisa com métodos que considerem a incerteza diretamente na resolução, tais como programação estocástica e simulação.

Com o uso da linguagem de programação GAMS 22.1 foi aberto um leque de possibilidades para o desenvolvimento de aplicações que exijam a modelagem matemática de problemas reais, tornando possível inclusive o desenvolvimento de SSD simples com entrada de dados por Access e relatórios gerenciais de saídas em Word.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBROSINO, D., SCUTELLÀ, M. G., **Distribution network design: new problems and related models.** Italia: European Journal of Operational Research, 2005.
- ANP, **Anuário Estatístico 2004.** Capturado em 06 de julho de 2005, Disponível em [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br). 2004.
- ANP, **Relatório mensal de acompanhamento de mercado de óleo diesel: dezembro de 2005.** Capturado em 18 de janeiro de 2006. Disponível em [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br). 2005.
- ARNTZEN, B. C. et al. **Global supply chain management at digital equipment corporation.** EUA: INTERFACES, 1995.
- BALLOU, R. H. **Heuristics: rules of thumb for logistics decision making.** EUA: Journal of Business Logistics, 1989.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Planejamento, Organização e Logística Empresarial.** Trad. Elias Pereira – 4ª. Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2001a.
- BALLOU, R. H. **Unresolved issues in supply chain network design.** EUA: Information Systems Frontiers, 2001b.
- BEAMON, B. M., **Supply chain design and analysis: models and methods.** EUA: International Journal of Production Economics, 1998.
- BRANDEAU, M. L., CHIU, S. S., **An overview of representative problems in location research.** EUA: Management Science, 1989.
- BRASIL. **Lei no. 11.097 de 13 de janeiro de 2005: Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira.** Presidência da República, Brasília, 2005a.
- BRASIL. **Programa Nacional de Uso e Produção de Biodiesel.** Capturado em 06 de julho de 2005. Disponível em [www.biodiesel.gov.br](http://www.biodiesel.gov.br), 2005b.
- BRITO JUNIOR, I., **Análise do impacto logístico de diferentes regimes aduaneiros no abastecimento de itens aeronáuticos empregando modelo de transbordo multiproduto com custos fixos,** 2004. 136 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.
- BROWN, G. G. et al **Design and operation of a multicommodity production/distribution system using primal goal decomposition.** EUA: Management Science, 1987.

- CEPEA/ESALQ, **Relatório de indicadores mensais de álcool**. Capturado em 03 de fevereiro de 2006, Disponível em [www.cepea.esalq.usp.br/indicador/alcool/](http://www.cepea.esalq.usp.br/indicador/alcool/), 2005.
- CHING, H. Y., **Gestão de estoques na cadeia de logística integrada – Supply chain**, 2 ed., Editora Atlas: São Paulo, 2001.
- CHOPRA, S. **Designing the distribution network in a supply chain**. EUA: Transportation Research Part E, 2003.
- CHOPRA, S., MEINDL, P. **Supply chain management: strategy, planning, and operation**. EUA: Prentice Hall, 2001.
- CHRISTOPHER, M. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: estratégias para a redução de custos e melhoria dos serviços**. São Paulo: Pioneira, 1997.
- CONAB. **Serie histórica de produção de mamona no Brasil**. Capturado em 15 de dezembro de 2005, Disponível em [www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br). 2005.
- CROXTON, K. L., ZINN, W.. **Inventory considerations in network design**. EUA: Journal of Business Logistics, 2005.
- CSCMP, **Supply chain visions: logistics terms and glossary**. Capturado em 27 de abril de 2005. Disponível em [www.clml.org](http://www.clml.org). 2003.
- DELOITTE, **Saber é preciso**. Mundo Corporativo. Ano 3, n. 9. 2005.
- DOGAN, K., GOETSCHALCKX, M., **A primal decomposition method for the integrated design of multi-period production-distribution systems**. EUA: IIE Transactions, 1999.
- EFROYMSON, M. A., RAY, T. L., **A branch and bound algorithm for plant location**, EUA: Operations Research, 1966.
- ELLWEIN, L. B., GRAY, P. **Solving fixed charge location-allocation problems with capacity and configuration constraints**. EUA: AIIE Transactions, 1971.
- ERLENKOTTER, D. **A dual-based procedure for uncapacitated facility location**. EUA: Operation Research, 1978.
- EMBRAPA. **Zoneamento da mamona no nordeste**. Capturado em 13 de dezembro de 2005. Disponível em [www.cnpa.embrapa.br/produtos/mamona/zoneamento.html](http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/mamona/zoneamento.html). 2004.
- FARIA, A. C. **Custos logísticos: uma abordagem na adequação das informações de controladoria à gestão da logística empresarial**. 2003. 313p. Tese



(Doutorado) –Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

FISHER, M. L., **What is the right supply chain for your product?** EUA: Harvard Business Review, 1997.

FIUZA, C. et al. **Configuração de redes logísticas: objetivos, conceitos e técnicas de modelagem.** Ouro Preto: XXIII ENEGEP, 2003.

FREITAS, A. A. de M., **Análise crítica do projeto de cadeias de suprimentos: modelagem e estudo de caso.** 2004. 146 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

FREITAS, L. A. A., NOBRE JUNIOR, E. F., **Gestão da cadeia de suprimentos (supply chain management): considerações para aplicação na cadeia de produção agroindustrial do biodiesel de mamona.** Bauru: XI SIMPEP, 2004.

GAITHER, N., FRAIZER, G., **Administração da Produção e Operações.** São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

GAMS, **GAMS User Guide: 2005 Version 22.1.** 2005.

GEOFFRION, A. M. **Indexing in modeling languages for mathematical programming.** EUA: Management Science, 1992.

GEOFFRION, A. M., GRAVES, G. W., **Multicommodity distribution system design by Benders decomposition,** EUA: Management Science, 1974.

GEOFFRION, A. M., POWERS, R. F., **Twenty years of strategic distribution system design: an evolutionary perspective.** EUA: INTERFACES, 1995.

GLOVER, F. et al. **An integrated production, distribution and inventory planning system.** EUA: INTERFACES, 1979.

GOETSCHALCKX, M., VIDAL, C., DOGAN, K., **Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms.** European Journal of Operational Research, 2002.

GRUMBACH, R. J. dos S. **Prospectiva: a chave para o planejamento estratégico.** Rio de Janeiro: Ed. Cetau: Casnav, 1997.

HILLIER, F. S., LIEBERMAN, G. J., **Introdução à pesquisa operacional.** Rio de Janeiro: Editoria Campus, 1988.

- JANG, Y. et al, **A combined model of network design and production/distribution planning for a supply network**. Coréia do Sul: Computers & Industrial Engineering, 2002.
- JAYARAMAN, V., **Transportation, facility location and inventory issues in distribution network design: an investigation**. EUA: International Journal of Operations & Production Management, 1998.
- KARAKABAL, N. et al **Supply chain analysis at Volkswagen of America**. EUA: INTERFACES, 2000.
- LACERDA, L. **Considerações sobre o estudo de localização de instalações**. Capturado em 25/03/2005, Disponível em <http://www.cel.coppead.ufri.br/fs-public.htm>, 1999.
- LAMBERT, D. M., COOPER, M. C., PAGH, J. D., **Supply chain management: implementation issues and research opportunities**. EUA: International Journal of Logistics Management, 1998.
- LAVALLE, C. R., FLEURY, P. F., **Avaliação da organização logística em empresas da cadeia de suprimento de alimentos: indústria e comércio**. Rio de Janeiro: RAC, 2000.
- LIMA, M. P., **Custos logísticos na economia brasileira**. Revista Tecnológica, 2006.
- LIMA, P. C. R., **O biodiesel e a inclusão social**. Consultoria Legislativa: Brasília, 2004a.
- LIMA, F. R., COSENZA, C. A. N., SILVA, A. **Sistema de representação gráfica para estudo de localização de atividades ligadas ao ciclo de produção do biodiesel no nordeste brasileiro**. Meio ambiente, Preservação e Sustentabilidade. Unisinos: 2004b.
- LOVE, R. F., et al, **Facilities Location: models & methods**. EUA: North Holland, 1988.
- MARTOS, A. C., **Projeto de redes logísticas com consideração de estoques e modais: aplicação de programação linear inteira mista à indústria petroquímica**. 2000. 98 p., Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- MENDES, R. A. **Diagnóstico, análise de governança e proposição de gestão para a cadeia produtiva do biodiesel da mamona (CP/BDMA): o caso do Ceará**. 2005. 178p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Ceará, 2005.
- OWEN, S. H., DASKIN, M. S. **Strategic facility location: A review**. EUA: European Journal of Operational Research, 1998.

- PIRES, M. M., *et al* **Biodiesel de mamona: uma avaliação econômica**. I Congresso Brasileiro de Mamona: Energia e Sustentabilidade: Campina Grande, 2004.
- ROBLES. L. T., **A prestação de serviços de logística integrada na indústria automobilística no Brasil: em busca de alianças estratégicas**. 2001. 188 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.
- SELLDIN, E. **Supply chain design – conceptual models and empirical analyses**. 2005. 272 p. Dissertation (Doctoral) - International Graduate School of Management and Industrial Engineering, Linköping Institute of Technology. Sweden: 2005.
- SHAPIRO, J. F. **Modeling the supply chain**. EUA: Duxbury, 2001.
- SILVA, E. L., MENEZES, E.M., **Metodologia de pesquisa e elaboração de dissertação**. Florianópolis, Laboratório de Ensino a distância da UFSC, 2001.
- SIMCHI-LEVI, D. *et al* **Designing and managing the supply chain: concepts, strategies and case studies**. EUA: McGraw-Hill, 2000.
- SIMCHI-LEVI, D. *et al*. **Cadeia de suprimentos: projeto e gestão – conceitos, estratégias e estudos de caso**. Porto Alegre: Bookman, 2003.
- SMITS, S. R., **Evaluation Model for the design of distribution networks**. Netherlands: Faculty of Technology Management, 2001.
- SPIELBERG, K., **Algorithms for the simple plant-location problem with some side constraints**, EUA: Operations Research, 1969.
- VIDAL, C. J., GOETSCHALCKX, M., **Strategic production-distribution models: a critical review with emphasis on global supply chain models**. Colômbia: European Journal of Operational Research, 1997.
- WANKE, P., **Aspectos fundamentais do problema de localização de instalações em redes logísticas**. Capturado em 25 de março de 2005, Disponível em <http://www.cel.coppead.ufrj.br/fs-public.htm>, 2001.
- WANKE, P. **Gestão de estoques na cadeia de suprimento: decisões e modelos quantitativos**. São Paulo: Atlas, 2003.
- WOUDA, F. H. E. *et al*. **An application of mixed-integer linear programming models on the supply network of Nutricia Dairy & Drinks Group in Hungary**. Belgium: OR Spectrum, 2002.

## **8. ANEXOS**

## Anexo I – Locais Potenciais de Instalação de Esmagadoras e Usinas de Biodiesel

### Locais Potenciais para Usinas de Biodiesel

<b>Código</b>	<b>Cidade</b>	<b>Estado</b>
21SLU	São Luis	MA
22FLO	Floriano	PI
22TER	Teresina	PI
23FOR	Fortaleza	CE
23PCA	Piquet Carneiro	CE
23QXA	Quixadá	CE
24GUA	Guamaré	RN
25CGA	Campina Grande	PB
25STA	Serra Talhada	PB
26PET	Petrolina	PE
26REC	Recife	PE
29FSA	Feira da Santana	BA
29IRE	Irecê	BA
29JEQ	Jequié	BA
29SAL	Salvador	BA

### Locais Potenciais para Esmagadoras de Mamona

<b>Código</b>	<b>Cidade</b>	<b>Estado</b>
21GRA	Grajaú	MA
21SRM	São Raimundo das Mangabeiras	MA
22CBU	Canto do Buriti	PI
22CMA	Campo Maior	PI
22FLO	Floriano	PI
22SRN	São Raimundo Nonato	PI
23CTE	Crateús	CE
23QXA	Quixadá	CE
23QXE	Quixeramobim	CE
24CAI	Caicó	RN
25POC	Poçinhos	PB
25QUE	Queimadas	PB
25SOU	Sousa	PB
26STA	Serra Talhada	PE
29BRU	Brumado	BA
29CAE	Caetite	BA
29IBO	Ibotirama	BA
29IRE	Irecê	BA
29ITA	Itaberaba	BA
29SEA	Seabra	BA

## Anexo II – Código do modelo matemático desenvolvido em GAMS

\$ontext

Estudo da rede logística do biodiesel de mamona no Nordeste

Aluno: Rodolfo Crystello Davariz

Orientador: Luiz Antonio Silveira Lopes, D. Sc.

Mestrado em Engenharia de Transportes

Instituto Militar de Engenharia

\$offtext

\* -----

\* 1.Conjuntos

\* -----

set

h Zonas de Plantio /

\$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=set\_zp.inc q="select Sitezp from  
[Zonas de plantio]" M

\$include set\_zp.inc

/

i Locais Potenciais das Esmagadoras /

\$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=set\_es.inc q="select Sitees from  
[Locais potenciais das esmagadoras]" M

\$include set\_es.inc

/

j Locais Potenciais das Usinas /

\$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=set\_us.inc q="select Siteus from  
[Locais potenciais das usinas]" M

\$include set\_us.inc

/

s Tipos de usinas /

\$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=set\_type.inc q="select Sizeus  
from [Tipos de usina]" M

\$include set\_type.inc

/

k Bases de distribuicao de diesel /

\$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=set\_bd.inc q="select Sitebd from  
[Bases de distribuicao]" M

\$include set\_bd.inc

/

m Bases coletoras de alcool /

```

$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=set_bc.inc q="select Sitebc from
  [Bases coletoras]" M
$include set_bc.inc
/

t   Periodos   /
$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=set_t.inc q="select Perodo from
  Periodos" M
$include set_t.inc
/;

* -----
* 2. Parametros
* -----
* 2.1. Demanda
parameters
dem(k,t) Demanda da base de distribuicao k no periodo t (m3 de b100 para b2 em
  2008 e b100 para b5 em 2013) /
$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=dem_kt.inc q="select Sitebd,
  Perodo, Dem_kt from Demanda" M
$include dem_kt.inc
/
;

* 2.2. Capacidades
parameters
capZP(h,t) Capacidade de plantio na zona h no periodo t (ton) /
$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=cap_zp.inc q="select Sitezp,
  Perodo, Cap_h from [Capacidade de plantio]" M
$include cap_zp.inc
/

capES(i) Capacidade da esmagadora i (ton de oleo por ano) /
$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=cap_es.inc q="select Sites,
  Cap_i from [Locais potenciais das esmagadoras]" M
$include cap_es.inc
/

capBC(m,t) Capacidade da base coletora de alcool m no periodo t (ton de alcool por
  ano) /
$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=cap_bc.inc q="select Sitebc,
  Perodo, Cap_mt from [Capacidade das bases coletoras]" M
$include cap_bc.inc
/

capUB(s) Capacidade da usina tipo s (m3 de biodiesel b100 por ano) /
$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=cap_us.inc q="select Sizeus,
  Cap_s from [Tipos de usina]" M
$include cap_us.inc
/

```

\* 2.3. Custos fixos

fxES(i) Custo fixo da esmagadora i (R\$ por ano) /

```
$call =mdb2gms i="%system.fp% biodiesel.mdb" o=fx_es.inc q="select Sitees,  
    CusFix_i from [Locais potenciais das esmagadoras]" M  
$include fx_es.inc  
/
```

fxUB(s) Custo fixo da usina tipo s (R\$ por ano) /

```
$call =mdb2gms i="%system.fp% biodiesel.mdb" o=fx_us.inc q="select Sizeus,  
    CusFix_s from [Tipos de usina]" M  
$include fx_us.inc  
/
```

scalar kcap Custo de capital (%) /

```
$call =mdb2gms i="%system.fp% biodiesel.mdb" o=cust_k.inc q="select Custok  
    from [Outros custos]" M  
$include cust_k.inc  
/
```

\* 2.4. Custos de transportes

parameters

dist1(h,i) Distancia rodoviaria entre a zona de plantio h e o local candidato da esmagadora i (Km) /

```
$call =mdb2gms i="%system.fp% biodiesel.mdb" o=dist1.inc q="select Sitezp, Sitees,  
    Dist_hi from [Elo1 (ZP-ES)]" M  
$include dist1.inc  
/
```

dist2(i,j) Distancia rodoviaria entre o local candidato da esmagadora i e o local candidato da usina j (Km) /

```
$call =mdb2gms i="%system.fp% biodiesel.mdb" o=dist2.inc q="select Sitees, Siteus,  
    Dist_ij from [Elo2 (ES-UB)]" M  
$include dist2.inc  
/
```

dist3(j,k) Distancia rodoviaria entre o local candidato da usina j e a base de distribuicao k (Km) /

```
$call =mdb2gms i="%system.fp% biodiesel.mdb" o=dist3.inc q="select Siteus, Sitebd,  
    Dist_jk from [Elo3 (UB-BD)]" M  
$include dist3.inc  
/
```

dist4(m,j) Distancia rodoviaria entre a base coletora m e a usina j (Km) /

```
$call =mdb2gms i="%system.fp% biodiesel.mdb" o=dist4.inc q="select Sitebc, Siteus,  
    Dist_mj from [Elo4 (BC-UB)]" M  
$include dist4.inc  
/
```



## Scalar

tx1 taxa de transporte de mamona entre zonas de plantio e esmagadoras (R\$ por t.km)

```
/
$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=tx1.inc q="select CusT_hi from
[Custos unitarios de transporte]" M
$include tx1.inc
/
```

tx2 taxa de transporte de oleo vegetal entre esmagadoras e usinas (R\$ por t.km) /

```
$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=tx2.inc q="select CusT_ij from
[Custos unitarios de transporte]" M
$include tx2.inc
/
```

tx3 taxa de transporte de biodiesel b100 entre usinas e bases de distribuicao (R\$ por t.km) /

```
$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=tx3.inc q="select CusT_jk from
[Custos unitarios de transporte]" M
$include tx3.inc
/
```

tx4 taxa de transporte de alcool entre bases coletoras e usinas (R\$ por t.km) /

```
$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=tx4.inc q="select CusT_mj from
[Custos unitarios de transporte]" M
$include tx4.inc
/
```

## Parameters

ct1(h,i) custo de transporte entre zona de plantio h e esmagadora i

ct2(i,j) custo de transporte entre esmagadora i e usina j

ct3(j,k) custo de transporte entre usina j e base de distribuicao k

ct4(m,j) custo de transporte entre base coletora k e usina j;

$ct1(h,i) = 1.235 * tx1 * dist1(h,i);$

$ct2(i,j) = 1.235 * tx2 * dist2(i,j);$

$ct3(j,k) = 1.235 * tx3 * dist3(j,k);$

$ct4(m,j) = 1.235 * tx4 * dist4(m,j);$

\* 2.5. Custos variaveis nas instalacoes (considerar custos agregados)

### parameters

ccZP(h,t) custo de aquisicao de 1 ton de mamona na zona de plantio h no periodo t /

```
$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=custA_h.inc q="select Sitezp,
Periodo, CusA_h from [Capacidade de Plantio]" M
$include custA_h.inc
/
```

ccBC(m,t) custo de aquisicao de 1 m3 de alcool na base coletora m no periodo t /

```
$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=custA_m.inc q="select Sitebc,
Periodo, CusA_m from [Capacidade das bases coletoras]" M
$include custA_m.inc
/
```

cpES(i) custo de producao a ser agregado por ton de oleo de mamona na esmagadora i /  
 \$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=custP\_i.inc q="select Sitees,  
 CusP\_i from [Locais potenciais das esmagadoras]" M  
 \$include custP\_i.inc  
 /

cpUB(j) custo de producao a ser agregado por m3 de biodiesel B100 na usina j /  
 \$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=custP\_j.inc q="select Siteus,  
 CusP\_j from [Locais potenciais das usinas]" M  
 \$include custP\_j.inc  
 /

cmCD(k) custo de manuseio por m3 de biodiesel B100 na base de distribuicao k /  
 \$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=custM\_k.inc q="select Sitebd,  
 CusM\_k from [Bases de distribuicao]" M  
 \$include custM\_k.inc  
 /

#### \* 2.6. Precos

parameters

prMA preco da mamona por ton /

\$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=PrecMA.inc q="select PrecMA  
 from [Precos]" M  
 \$include PrecMA.inc  
 /

prOL preco de oleo de mamona por ton /

\$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=PrecOL.inc q="select PrecOL  
 from [Precos]" M  
 \$include PrecOL.inc  
 /

prB100 preco de biodiesel B100 por m3 /

\$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=PrecB100.inc q="select  
 PrecB100 from [Precos]" M  
 \$include PrecB100.inc  
 /

prAL preco de alcool por m3 /

\$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=PrecAL.inc q="select PrecAL  
 from [Precos]" M  
 \$include PrecAL.inc  
 /

#### \* 2.7. Frequencia de ressuprimento

parameters

frsES(i) Frequencia de ressuprimento da esmagadora i (dias) /

```

$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=frsES.inc q="select Sitees, Frs_i
    from [Locais potenciais das esmagadoras]" M
$include frsES.inc
/

```

```

frsUB(j) Frequencia de ressuprimento da usina j (dias) /
$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=frsUB.inc q="select Siteus, Frs_j
    from [Locais potenciais das usinas]" M
$include frsUB.inc
/

```

```

frsBD(k) Frequencia de ressuprimento da base de distribuicao k (dias) /
$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=frsBD.inc q="select Sitebd, Frs_k
    from [Bases de distribuicao]" M
$include frsBD.inc
/;

```

#### \* 2.8. Tempo em trânsito

parameters

TT1(h,i) Tempo em trânsito entre a zona de plantio h e o local candidato da esmagadora i (dias)

TT2(i,j) Tempo em trânsito entre o local candidato da esmagadora i e o local candidato da usina j (dias)

TT3(j,k) Tempo em trânsito entre o local candidato da usina j e a base de distribuicao k (dias)

TT4(m,j) Tempo em trânsito entre a base coletora de alcool m e a usina j (dias);

```

TT1(h,i) = 1.235*dist1(h,i)/(30*24);
TT2(i,j) = 1.235*dist2(i,j)/(30*24);
TT3(j,k) = 1.235*dist3(j,k)/(30*24);
TT4(m,j) = 1.235*dist4(m,j)/(30*24);

```

#### \* 2.9. Coeficientes insumo-produto

scalar

F12 fator de conversao da mamona em oleo vegetal /

```

$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=f12.inc q="select F12 from
    [Coeficiente Insumo-Produto]" M
$include f12.inc
/

```

F23 fator de conversao de oleo vegetal em biodiesel B100 /

```

$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=f23.inc q="select F23 from
    [Coeficiente Insumo-Produto]" M
$include f23.inc
/

```

F43 fator de conversao de alcool em biodiesel B100 /

```

$call =mdb2gms i="%system.fp%biodiesel.mdb" o=f43.inc q="select F43 from
    [Coeficiente Insumo-Produto]" M
$include f43.inc

```

/

variables

\* -----

\* 3. Variaveis

\* -----

\* 3.1 Variaveis independentes

$x1(h,i,t)$  qtde de mamona transportada da zona de plantio  $h$  para a esmagadora  $i$  no periodo  $t$

$x2(i,j,t)$  qtde de oleo vegetal transportada da esmagadora  $i$  para a usina  $j$  no periodo  $t$

$x3(j,k,t)$  qtde de biodiesel B100 transportada da usina  $j$  para a base de distribuicao  $k$  no periodo  $t$

$x4(m,j,t)$  qtde de alcool transportada da base coletora  $m$  para a usina  $j$  no periodo  $t$

$y2(i,t)$  1 caso a esmagadora  $i$  seja aberta no periodo  $t$  0 caso contrario

$y3(j,s,t)$  1 caso a usina  $j$  do tipo  $s$  seja aberta no periodo  $t$  0 caso contrario

$w3(j,k,t)$  1 caso a base de distribuicao  $k$  seja atendida pela usina  $j$  no periodo  $t$  0 caso contrario

\* 3.2. Variaveis dependentes

$z$  custo total

$P1, P2, P3, P4, P5,$

$P6, P7, P8, P9, P10,$

$P11, P12, P13, P14, P15,$

$P16, P17, P18, P19$  parcelas do custo total;

\* 3.3. Tipo de variaveis

positive variable  $x1, x2, x3, x4;$

integer variable  $y2, y3;$

binary variable  $w3;$

\* -----

\* 4. Funcao objetivo

\* -----

equations

Total custo total

CustoFixoES custo fixo das esmagadoras

CustoFixoUB custo fixo das usinas de biodiesel

CustoTransMA custo de transporte de mamona

CustoTransOL custo de transporte de oleo

CustoTransB100 custo de transporte de biodiesel

CustoTransAL custo de transporte de alcool

CustoAquisMA custo de aquisicao de mamona

CustoProdOL custo de producao de oleo

CustoProdB100 custo de producao de biodiesel b100

CustoAquisAL custo de aquisicao de alcool

CustoManMist custo de manuseio e mistura de biodiesel nas bases de distribuicao

CustoEstMAES custo de estoque de mamona nas esmagadoras  
 CustoEstOLUB custo de estoque de oleo vegetal nas usinas de biodiesel  
 CustoEstALUB custo de estoque de alcool nas usinas de biodiesel  
 CustoEstB100BD custo de estoque de biodiesel nas bases de distribuicao

CustoEstTTMA custo de estoque em trânsito de mamona  
 CustoEstTTOL custo de estoque em trânsito de oleo vegetal  
 CustoEstTTAL custo de estoque em trânsito de alcool  
 CustoEstTTB100 custo de estoque em trânsito de biodiesel b100;

Total.. z =e= (P1 + P2 + P3 + P4 + P5 + P6 + P7 + P8 + P9 + P10 +  
 P11 + P12 + P13 + P14 + P15 + P16 + P17 + P18 + P19);

CustoFixoES.. P1 =e= sum((i,t), fxES(i)\*y2(i,t));  
 CustoFixoUB.. P2 =e= sum((j,t,s), fxUB(s)\*y3(j,s,t));

CustoTransMA.. P3 =e= sum((h,i,t), ct1(h,i)\*x1(h,i,t));  
 CustoTransOL.. P4 =e= sum((i,j,t), ct2(i,j)\*x2(i,j,t));  
 CustoTransB100.. P5 =e= sum((j,k,t), ct3(j,k)\*x3(j,k,t));  
 CustoTransAL.. P6 =e= sum((m,j,t), ct4(m,j)\*x4(m,j,t));

CustoAquisMA.. P7 =e= sum((h,i,t), ccZP(h,t)\*x1(h,i,t));  
 CustoProdOL.. P8 =e= sum((i,j,t), cpES(i)\*x2(i,j,t));  
 CustoProdB100.. P9 =e= sum((j,k,t), cpUB(j)\*x3(j,k,t));  
 CustoAquisAL.. P10 =e= sum((m,j,t), ccBC(m,t)\*x4(m,j,t));  
 CustoManMist.. P11 =e= sum((j,k,t), cmCD(k)\*0.91\*dem(k,t)\*w3(j,k,t));

CustoEstMAES.. P12 =e= sum((h,i,t), (0.5\*kcap\*prMA/FrsES(i))\*x1(h,i,t));  
 CustoEstOLUB.. P13 =e= sum((i,j,t), (0.5\*kcap\*prOL/FrsUB(j))\*x2(i,j,t));  
 CustoEstALUB.. P14 =e= sum((j,k,t), (0.5\*kcap\*prB100/FrsBD(k))\*x3(j,k,t));  
 CustoEstB100BD.. P15 =e= sum((m,j,t), (0.5\*kcap\*prAL/FrsUB(j))\*x4(m,j,t));

CustoEstTTMA.. P16 =e= sum((h,i,t), prMA\*TT1(h,i)\*x1(h,i,t))\*kcap/365;  
 CustoEstTTOL.. P17 =e= sum((i,j,t), prOL\*TT2(i,j)\*x2(i,j,t))\*kcap/365;  
 CustoEstTTAL.. P18 =e= sum((j,k,t), prB100\*TT3(j,k)\*x3(j,k,t))\*kcap/365;  
 CustoEstTTB100.. P19 =e= sum((m,j,t), prAL\*TT4(m,j)\*x4(m,j,t))\*kcap/365;

\* -----  
 \* 5. Restricoes  
 \* -----

equations

\* 5.1. Garantia de atendimento a demanda

Demand(j,k,t) demanda atendida pela usina j no periodo t;

Demand(j,k,t).. x3(j,k,t) =e= 0.91\*dem(k,t)\* w3(j,k,t);

equations

\* 5.2. Exclusividade no atendimento a zona de consumo

Excl(k,t) identificacao da usina j que abastece a base de distribuicao k no periodo t;

$$\text{Excl}(k,t) \cdot \sum(j, w3(j,k,t)) = e = 1;$$

equations

\* 5.3. Capacidade das instalacoes

CapacZP(h,t) capacidade da zona de plantio h no periodo t

CapacBC(m,t) capacidade da base coletora m no periodo t

\*CapacESmin(i,t) capacidade da esmagadora i no periodo t

CapacUBmin(j,t) capacidade da usina j no periodo t

CapacESmax(i,t) capacidade da esmagadora i no periodo t

CapacUBmax(j,t) capacidade da usina j no periodo t;

$$\text{CapacZP}(h,t) \cdot \sum(i, x1(h,i,t)) = l = \text{capZP}(h,t);$$

$$\text{CapacBC}(m,t) \cdot \sum(j, x4(m,j,t)) = l = \text{capBC}(m,t);$$

$$* \text{CapacESmin}(i,t) \cdot \sum(j, x2(i,j,t)) = g = 0.5 \cdot \text{capES}(i) \cdot y2(i,t);$$

$$\text{CapacUBmin}(j,t) \cdot \sum(k, x3(j,k,t)) = g = \sum(s, 0.5 \cdot \text{capUB}(s) \cdot y3(j,s,t));$$

$$\text{CapacESmax}(i,t) \cdot \sum(j, x2(i,j,t)) = l = \text{capES}(i) \cdot y2(i,t);$$

$$\text{CapacUBmax}(j,t) \cdot \sum(k, x3(j,k,t)) = l = \sum(s, \text{capUB}(s) \cdot y3(j,s,t));$$

equations

\* 5.4. Equilibrio de fluxo

FlowMA(i,t) fluxo de mamona na esmagadora i

FlowOL(j,t) fluxo de oleo na usina j

FlowAL(j,t) fluxo de alcool na usina j;

$$\text{FlowMA}(i,t) \cdot F12 \cdot \sum(h, x1(h,i,t)) = e = \sum(j, x2(i,j,t));$$

$$\text{FlowOL}(j,t) \cdot F23 \cdot \sum(i, x2(i,j,t)) = e = \sum(k, x3(j,k,t));$$

$$\text{FlowAL}(j,t) \cdot F43 \cdot \sum(m, x4(m,j,t)) = e = \sum(k, x3(j,k,t));$$

equations

\* 5.5. Expansao continuada da rede

ContES(i) garantia de manutencao dos investimentos em esmagadoras

ContUB(j,s) garantia de manutencao dos investimentos em usinas;

$$\text{ContES}(i) \cdot y2(i, "2013") = g = y2(i, "2008");$$

$$\text{ContUB}(j,s) \cdot y3(j,s, "2013") = g = y3(j,s, "2008");$$

equations

\* 5.6. Decisao de porte das usinas

Porte(j,t) escolha de porte de usina por local;

$$\text{Porte}(j,t) \cdot \sum(s, y3(j,s,t)) = l = 1;$$

\* -----

\* 6. Modelo

\* -----

Model biomip /all/

```
Options
Iterlim = 80000
optcr = 0.0001;
```

```
* -----
* 7. Solver
* -----
```

```
solve biomip using mip minimizing z;
```

```
Options
Mip = cplex;
```

```
display x1.l, x2.l, x3.l, x4.l, y2.l, y3.l, w3.l;
```

```
* -----
* 8. Relatorio
* -----
```

```
File resultados /RelatBiodiesel_n1.doc/;
Put resultados;
*Puttl 'Biodiesel', @30, system.date, @60, 'pagina ',system.page ///;
Put 'Modelagem da Rede Logistica do Biodiesel de Mamona no Nordeste' ///;
Put 'Custo total', @60, z.l:10:0 //;
Put 'Custo fixo das esmagadoras', @60, P1.l:10:0 /;
Put 'Custo fixo das usinas de biodiesel', @60, P2.l:10:0 //;
Put 'Custo de transporte de mamona', @60, P3.l:10:0 /;
Put 'Custo de transporte de oleo', @60, P4.l:10:0 /;
Put 'Custo de transporte de biodiesel', @60, P5.l:10:0 /;
Put 'Custo de transporte de alcool', @60, P6.l:10:0 //;
Put 'Custo de aquisicao de mamona', @60, P7.l:10:0 /;
Put 'Custo de producao de oleo', @60, P8.l:10:0 /;
Put 'Custo de producao de biodiesel b100', @60, P9.l:10:0 /;
Put 'Custo de aquisicao de alcool', @60, P10.l:10:0 /;
Put 'Custo de manuseio e mistura de biodiesel', @60, P11.l:10:0 //;
Put 'Custo de estoque de mamona nas esmagadoras', @60, P12.l:10:0 /;
Put 'Custo de estoque de oleo vegetal nas usinas de biodiesel', @60, P13.l:10:0 /;
Put 'Custo de estoque de alcool nas usinas de biodiesel', @60, P14.l:10:0 /;
Put 'Custo de estoque de biodiesel nas bases de distribuicao', @60, P15.l:10:0 //;
Put 'Custo de estoque em trânsito de mamona', @60, P16.l:10:0 /;
Put 'Custo de estoque em trânsito de oleo vegetal', @60, P17.l:10:0 /;
Put 'Custo de estoque em trânsito de alcool', @60, P18.l:10:0 /;
Put 'Custo de estoque em trânsito de biodiesel b100', @60, P19.l:10:0 /;
Put " //;
Put 'Locais onde deverao ser abertas usinas e capacidade ocupada' //;
Put 't', @12, 'UB', @24, 'Tipo', @36, 'Qtde', @48, 'Capacidade' //;
Loop((t,j,s)$ (y3.l(j,s,t)<>0), put t.tl, @12, j.tl, @24, s.tl, @36, y3.l(j,s,t), @48, sum(k,
x3.l(j,k,t)):10:0 /);
Put " //;
Put 'Locais onde deverao ser abertas esmagadoras e capacidade ocupada' //;
```

```

Put 't', @12, 'ES', @24, 'Qtde', @36, 'Capacidade' //;
Loop((t,i)$ (y2.l(i,t)<>0), put t.tl, @12, i.tl, @24, y2.l(i,t), @36, sum(j, x2.l(i,j,t)):10:0
/);
Put " //;
Put 'Alocacao das usinas as bases de distribuicao' //;
Put 't', @12, 'UB', @24, 'BD', @36, 'Binario' //;
Loop((t,j,k)$ (w3.l(j,k,t)<>0), put t.tl, @12, j.tl, @24, k.tl, @36, w3.l(j,k,t) /);
Put " //;
Put 'Custo marginal de atender a demanda na zona de consumo k' //;
Put 't', @12, 'BD', @24, 'Demanda', @36, 'Custo marginal' //;
Loop((t,k), put t.tl, @12, k.tl, @24, Dem(k,t), @36, sum(j, Demand.m(j,k,t)):10:0 /);
Put " //;
Put 'Capacidade ocupada das zonas de plantio em ton de mamona' //;
Put 't', @12, 'ZP', @24, 'Capacidade' //;
Loop((t,h)$ (sum(i, x1.l(h,i,t)<>0), put t.tl, @12, h.tl, @24, sum(i, x1.l(h,i,t)):10:0 /);
Put " //;
Put 'Custo marginal da disponibilidade de mamona nas zonas de plantio em mil reais'
//;
Put 't', @12, 'ZP', @24, 'Fornec.', @36, 'Dispon.', @48, 'Custo marginal' //;
Loop((t,h), put h.tl, @12, t.tl, @24, CapacZP.l(h,t):10:0, @36, capZP(h,t):10:0, @48,
CapacZP.m(h,t):10:3 /);
Put " //;
Put 'Quantidade de mamona transportada das zonas de plantio para as esmagadoras
em toneladas' //;
Put 't', @12, 'ZP', @24, 'ES', @36, 'Qtde transportada' //;
Loop((t,h,i)$ (x1.l(h,i,t)<>0), put t.tl, @12, h.tl, @24, i.tl, @36, x1.l(h,i,t):10:0 /);
Put " //;
Put 'Quantidade de oleo de mamona transportada das esmagadoras para as usinas em
toneladas' //;
Put 't', @12, 'ES', @24, 'UB', @36, 'Qtde transportada' //;
Loop((t,i,j)$ (x2.l(i,j,t)<>0), put t.tl, @12, i.tl, @24, j.tl, @36, x2.l(i,j,t):10:0 /);
Put " //;
Put 'Quantidade de alcool transportada das bases coletoras para as usinas em ton' //;
Put 't', @12, 'BC', @24, 'UB', @36, 'Qtde transportada' //;
Loop((t,m,j)$ (x4.l(m,j,t)<>0), put t.tl, @12, m.tl, @24, j.tl, @36, x4.l(m,j,t):10:0 /);
Put " //;
Put 'Quantidade de biodiesel b100 transportada das usinas para as bases de
distribuicao em m3' //;
Put 't', @12, 'UB', @24, 'BD', @36, 'Qtde transportada' //;
Loop((t,j,k)$ (x3.l(j,k,t)<>0), put t.tl, @12, j.tl, @24, k.tl, @36, x3.l(j,k,t):10:0 /);

```

```

* -----
* 9. Simulacao
* -----

```

```

option savepoint=2;
set c cenario / c1*c1000 /;
parameter demaux(c,k,t)
varlocal(c,k,t);

```



```

varlocal(c,k,t) = round(normal(0, 0.2*dem(k,t)));
demaux(c,k,t) = dem(k,t) + varlocal(c,k,t);
parameter zsim(c) custo total na simulacao

loop(c,
  dem(k,t) = demaux(c,k,t)
  solve biomip using mip minimizing z;
  zsim(c) = z.l;
);

* -----
* 10. Estatisticas
* -----

*execute_unload 'biomip_p1.gdx', demaux;
*execute 'GDXXRW.EXE i=biomip_p1.gdx o=biomip_p1.xls par=demaux rdim=2
  cdim=1';
execute_unload 'biomip_p2.gdx', y2sim;
execute 'GDXXRW.EXE i=biomip_p2.gdx o=biomip_p2.xls par=y2sim rdim=2
  cdim=1';
execute_unload 'biomip_p3.gdx', y3sim;
execute 'GDXXRW.EXE i=biomip_p3.gdx o=biomip_p3.xls par=y3sim rdim=2
  cdim=2';
execute_unload 'biomip_p4.gdx', zsim;
execute 'GDXXRW.EXE i=biomip_p4.gdx o=biomip_p4.xls par=zsip rdim=1';
execute_unload 'biomip_p5.gdx', demaux;
execute 'GDXXRW.EXE i=biomip_p5.gdx o=biomip_p5.xls par=demaux rdim=2
  cdim=1';

```

### Anexo III – Relatório de saída dos resultados

Modelagem da Rede Logística do Biodiesel de Mamona no Nordeste

Custo total	1036473403
Custo fixo das esmagadoras	11200000
Custo fixo das usinas de biodiesel	26606000
Custo de transporte de mamona	12294510
Custo de transporte de oleo	16408560
Custo de transporte de biodiesel	18848236
Custo de transporte de alcool	2584964
Custo de aquisicao de mamona	425629391
Custo de producao de oleo	173325911
Custo de producao de biodiesel b100	230689855
Custo de aquisicao de alcool	62811776
Custo de manuseio e mistura de biodiesel	2310141
Custo de estoque de mamona nas esmagadoras	51304470
Custo de estoque de oleo vegetal nas usinas de biodiesel	1336054
Custo de estoque de alcool nas usinas de biodiesel	528300
Custo de estoque de biodiesel nas bases de distribuicao	280311
Custo de estoque em trânsito de mamona	69308
Custo de estoque em trânsito de oleo vegetal	83642
Custo de estoque em trânsito de alcool	144625
Custo de estoque em trânsito de biodiesel b100	17348

Locais onde deverao ser abertas usinas e capacidade ocupada

t	UB	Tipo	Qtde	Capacidade
2008	22FLO	mp	1.00	29400
2008	29FSA	gp	1.00	74359
2013	22FLO	mp	1.00	29337
2013	29FSA	gp	1.00	99627
2013	25STA	gp	1.00	79138
2013	21SLU	gp	1.00	51430

Locais onde deverao ser abertas esmagadoras e capacidade ocupada

t	ES	Qtde	Capacidade
2008	22CBU	2.00	19007
2008	22SRN	1.00	10000
2008	25QUE	2.00	20000
2008	29ITA	2.00	20000
2008	29SEA	1.00	10000
2008	29BRU	1.00	10000
2008	29IBO	1.00	10000
2013	22CBU	2.00	17645
2013	23CTE	1.00	10000
2013	22SRN	2.00	20000
2013	25QUE	5.00	50000
2013	29ITA	4.00	40000
2013	26STA	3.00	30000

2013	29SEA	1.00	10000
2013	29BRU	3.00	30000
2013	29IBO	1.00	10000
2013	21SRM	2.00	20000
2013	22CMA	1.00	10000

Alocacao das usinas as bases de distribuicao

t	UB	BD	Binario
2008	22FLO	21SLU	1.00
2008	22FLO	21IMP	1.00
2008	22FLO	23SOB	1.00
2008	29FSA	23CTO	1.00
2008	29FSA	24GUA	1.00
2008	29FSA	29SAL	1.00
2008	29FSA	23FOR	1.00
2008	29FSA	22TER	1.00
2008	29FSA	29JEQ	1.00
2008	29FSA	24NAT	1.00
2008	29FSA	25CAB	1.00
2008	29FSA	26SUA	1.00
2008	29FSA	27MAC	1.00
2008	29FSA	28LAR	1.00
2008	29FSA	29JUA	1.00
2008	29FSA	29ITB	1.00
2013	22FLO	22TER	1.00
2013	22FLO	21IMP	1.00
2013	22FLO	23SOB	1.00
2013	29FSA	29SAL	1.00
2013	29FSA	29JEQ	1.00
2013	29FSA	28LAR	1.00
2013	29FSA	29ITB	1.00
2013	25STA	23CTO	1.00
2013	25STA	24GUA	1.00
2013	25STA	23FOR	1.00
2013	25STA	24NAT	1.00
2013	25STA	25CAB	1.00
2013	25STA	26SUA	1.00
2013	25STA	27MAC	1.00
2013	25STA	29JUA	1.00
2013	21SLU	21SLU	1.00

Custo marginal de atender a demanda na zona de consumo k

t	BD	Demanda	Custo marginal
2008	23CTO	1242.00	2880
2008	24GUA	1195.00	2934
2008	29SAL	31613.00	2793
2008	23FOR	7108.00	2953
2008	22TER	3177.00	2944
2008	29JEQ	5809.00	2816
2008	21SLU	22595.00	2824
2008	24NAT	5083.00	2930
2008	21IMP	8515.00	2828
2008	25CAB	1719.00	2914
2008	26SUA	11780.00	2896
2008	27MAC	3632.00	2861

2008	28LAR	2772.00	2823
2008	29JUA	3009.00	2842
2008	29ITB	3574.00	2828
2008	23SOB	1198.00	2817
2013	23CTO	3107.00	2776
2013	24GUA	2988.00	2821
2013	29SAL	79073.00	2730
2013	23FOR	17780.00	2837
2013	22TER	7946.00	2746
2013	29JEQ	14531.00	2753
2013	21SLU	56516.00	2783
2013	24NAT	12715.00	2827
2013	21IMP	21298.00	2806
2013	25CAB	4300.00	2823
2013	26SUA	29465.00	2819
2013	27MAC	9084.00	2811
2013	28LAR	6935.00	2761
2013	29JUA	7526.00	2802
2013	29ITB	8941.00	2766
2013	23SOB	2995.00	2795

Capacidade ocupada das zonas de plantio em ton de mamona

t	ZP	Capacidade
2008	22CBU	28260
2008	29BAE	37780
2008	29BAA	19466
2008	29BJL	19466
2008	29CFO	40778
2008	29MUC	26132
2008	29VCO	26132
2013	21BAL	40000
2013	22CBU	26627
2013	22SMT	27749
2013	23BVI	12251
2013	23CTO	19459
2013	26OUR	38598
2013	29BAE	673
2013	29BAA	48663
2013	29BJL	48663
2013	29CFO	101943
2013	29MUC	65332
2013	29VCO	65332

Custo marginal da disponibilidade de mamona nas zonas de plantio i

t	ZP	Fornec.	Dispon.	Custo marginal
21BAL	2008	0	24350	0
22CBU	2008	28260	28260	-11
22SMT	2008	0	11100	0
23BVI	2008	0	8027	0
23CTO	2008	0	7784	0
26OUR	2008	0	16146	0
24ASS	2008	0	11922	0
29BAE	2008	37780	60439	0
29BAA	2008	19466	19466	-24
29BJL	2008	19466	19466	-18

29CFO	2008	40778	40778	-34
29MUC	2008	26132	26132	-46
29VCO	2008	26132	26132	-28
21BAL	2013	40000	60873	0
22CBU	2013	26627	70651	0
22SMT	2013	27749	27749	-3
23BVI	2013	12251	20067	0
23CTO	2013	19459	19459	-6
26OUR	2013	38598	40365	0
24ASS	2013	0	29806	0
29BAE	2013	673	151097	0
29BAA	2013	48663	48663	-10
29BJL	2013	48663	48663	-9
29CFO	2013	101943	101943	-30
29MUC	2013	65332	65332	-36
29VCO	2013	65332	65332	-19

Quantidade de mamona transportada das zonas de plantio para as esmagadoras em toneladas

t	ZP	ES	Qtde transportada
2008	22CBU	22CBU	28260
2008	29BAE	22CBU	9754
2008	29BAE	22SRN	534
2008	29BAE	29SEA	7492
2008	29BAE	29IBO	20000
2008	29BAA	22SRN	19466
2008	29BJL	29ITA	6958
2008	29BJL	29SEA	12508
2008	29CFO	25QUE	40000
2008	29CFO	29ITA	778
2008	29MUC	29ITA	26132
2008	29VCO	29ITA	6132
2008	29VCO	29BRU	20000
2013	21BAL	21SRM	40000
2013	22CBU	22CBU	26627
2013	22SMT	23CTE	7749
2013	22SMT	22CMA	20000
2013	23BVI	23CTE	12251
2013	23CTO	26STA	19459
2013	26OUR	26STA	38598
2013	29BAE	29IBO	673
2013	29BAA	22CBU	8663
2013	29BAA	22SRN	40000
2013	29BJL	29ITA	9336
2013	29BJL	29SEA	20000
2013	29BJL	29IBO	19327
2013	29CFO	25QUE	100000
2013	29CFO	26STA	1943
2013	29MUC	29ITA	65332
2013	29VCO	29ITA	5332
2013	29VCO	29BRU	60000

Quantidade de oleo de mamona transportada das esmagadoras para as usinas em toneladas

t	ES	UB	Qtde transportada
---	----	----	-------------------

2008	22CBU	22FLO	19007
2008	22SRN	22FLO	9047
2008	22SRN	29FSA	953
2008	25QUE	29FSA	20000
2008	29ITA	29FSA	20000
2008	29SEA	29FSA	10000
2008	29BRU	29FSA	10000
2008	29IBO	29FSA	10000
2013	22CBU	22FLO	8571
2013	22CBU	21SLU	9074
2013	23CTE	21SLU	10000
2013	22SRN	22FLO	19423
2013	22SRN	25STA	577
2013	25QUE	29FSA	5064
2013	25QUE	25STA	44936
2013	29ITA	29FSA	40000
2013	26STA	25STA	30000
2013	29SEA	29FSA	10000
2013	29BRU	29FSA	30000
2013	29IBO	29FSA	10000
2013	21SRM	21SLU	20000
2013	22CMA	21SLU	10000

Quantidade de alcool transportada das bases coletoras para as usinas em ton

t	BC	UB	Qtde transportada
2008	28LAR	29FSA	10410
2008	24CEA	22FLO	4116
2013	28LAR	29FSA	13947
2013	28LAR	25STA	11079
2013	24CEA	22FLO	4107
2013	24CEA	21SLU	7200

Quantidade de biodiesel b100 transportada das usinas para as bases de distribuicao em m3

t	UB	BD	Qtde transportada
2008	22FLO	21SLU	20561
2008	22FLO	21IMP	7749
2008	22FLO	23SOB	1090
2008	29FSA	23CTO	1130
2008	29FSA	24GUA	1087
2008	29FSA	29SAL	28768
2008	29FSA	23FOR	6468
2008	29FSA	22TER	2891
2008	29FSA	29JEQ	5286
2008	29FSA	24NAT	4626
2008	29FSA	25CAB	1564
2008	29FSA	26SUA	10720
2008	29FSA	27MAC	3305
2008	29FSA	28LAR	2523
2008	29FSA	29JUA	2738
2008	29FSA	29ITB	3252
2013	22FLO	22TER	7231
2013	22FLO	21IMP	19381
2013	22FLO	23SOB	2725

2013	29FSA	29SAL	71956
2013	29FSA	29JEQ	13223
2013	29FSA	28LAR	6311
2013	29FSA	29ITB	8136
2013	25STA	23CTO	2827
2013	25STA	24GUA	2719
2013	25STA	23FOR	16180
2013	25STA	24NAT	11571
2013	25STA	25CAB	3913
2013	25STA	26SUA	26813
2013	25STA	27MAC	8266
2013	25STA	29JUA	6849
2013	21SLU	21SLU	51430