

**CLAUDIO BARBIERI DA CUNHA**

**CONTRIBUIÇÃO À MODELAGEM DE PROBLEMAS  
EM LOGÍSTICA E TRANSPORTES**

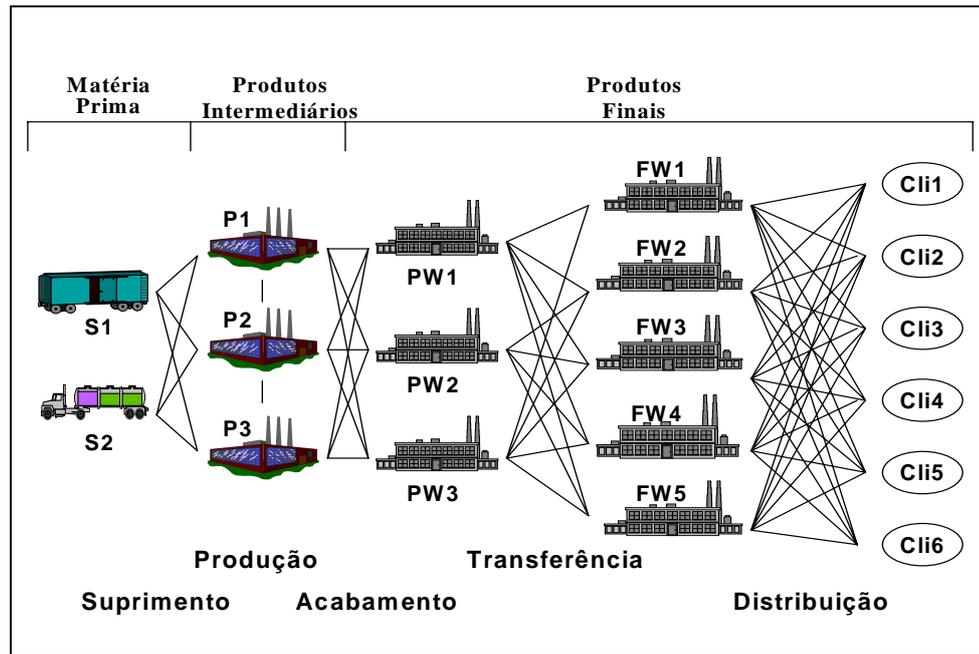
Texto de sistematização crítica de parte da obra do candidato, apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o Concurso de Livre Docência na especialidade “Logística e Sistemas de Transporte” do Departamento de Engenharia de Transportes.

São Paulo  
2006

**Capítulo****5****PROJETO DE  
REDES LOGÍSTICAS**

O projeto (ou configuração) de redes logísticas, tanto de distribuição quanto de suprimento, ou até mesmo de transporte, é um dos problemas macro-logísticos mais relevantes enfrentados pelas empresas. Uma rede pode ser entendida como a representação físico-espacial e temporal das origens e dos destinos de cargas, produtos acabados e insumos, bem como dos seus fluxos e demais aspectos relevantes, desde o(s) ponto(s) de origem até o(s) ponto(s) de destinação final. Assim, genericamente uma rede logística pode ser composta por fornecedores, unidades produtivas, depósitos, centros de distribuição e pontos de demanda, como ilustrado na Figura 5.1, por onde podem fluir matérias primas, estoques em processo e produtos acabados. Pode envolver os agentes diretamente relacionados à empresa (fornecedores e clientes) ou toda uma cadeia, em diversos níveis, desde a origem da matéria prima mais básica até os clientes finais, geralmente passando por mais de um processo intermediário de produção ou manufatura, caracterizando, neste caso, uma cadeia de abastecimento (“*supply chain*”). Embora tenha se consagrado no Brasil o termo “cadeia de suprimentos” ao invés de cadeia de abastecimento, essa denominação não seja a mais adequada, por transmitir a idéia equivocada de cadeia restrita ao suprimento de matérias primas, e não ao abastecimento de insumos e produtos como um todo e de uma forma integrada ao longo de toda uma cadeia de empresas que se unem em um dado segmento do mercado.

A configuração da rede depende, necessariamente, das características operacionais de cada empresa, de seu negócio e envolve, entre outras, as seguintes decisões:



**Figura 5.1:** Exemplo de Rede Logística

- determinação do número de instalações;
- determinação da localização e do tamanho de cada instalação;
- determinação da alocação dos pontos de oferta e de demanda de cada instalação, isto é, dos clientes a serem atendidos por cada instalação e dos fornecedores que abastecem cada instalação;
- determinação dos fluxos entre as instalações logísticas e os pontos de oferta e demanda, podendo eventualmente incluir decisões quanto aos modais de transporte a serem utilizados.

As instalações passíveis de serem consideradas podem englobar unidades industriais de produção, armazéns, terminais e centros de distribuição, entre outras.

Em linhas gerais o objetivo básico é determinar a configuração que minimize os custos anuais do sistema, incluindo os custos de produção, de compras, de transporte, de manutenção de estoque e das instalações (custos fixos, de armazenagem e de movimentação), considerando restrições de nível de serviço.

Diversas são as situações enfrentadas pelas empresas que podem levar à necessidade de realização de um projeto de rede logística, entre as quais pode-se citar:

- empresa iniciando suas operações, necessitando definir a configuração de toda a sua rede logística;
- expansão de mercado, conquista de novos mercados, crescimento da demanda, novos requisitos de nível de serviço, redução de custos, tudo levando à necessidade de construir novas instalações e/ou ampliar as existentes;
- fusões ou aquisições de empresas, levando à necessidade de revisar toda a rede logística, definir pelo fechamento ou desativação de unidades existentes, assim como pela sua ampliação ou até mesmo construção de novas unidades;
- outras situações, tais como decorrentes da expansão e transformação urbana, tornando áreas outrora industriais periféricas em áreas nobres, com a conseqüente mudança no tipo de uso e intensidade de ocupação do solo, levando uma instalação existente a se tornar inadequada em termos da sua localização atual, prejudicando a sua operação, causando impactos indesejáveis, impedindo uma eventual ampliação, ou até mesmo levando a uma valorização imobiliária que recomende uma destinação mais nobre para a área.

Decisões de localização são consideradas estratégicas, uma vez que seus efeitos ocorrem no médio e longo prazo, além de usualmente implicarem investimentos vultosos. Uma nova instalação geralmente serve uma empresa por muitos anos, sendo o custo de desativação e/ou relocação bastante elevado. Por outro lado, uma rede logística otimizada permite a uma empresa operar com custos reduzidos e nível de serviço satisfatório; ao contrário, uma localização inadequada torna difícil para a empresa operar próxima da fronteira de eficiência e eficácia. Chopra e Meindl (2001) citam o exemplo da *Amazon*, empresa que comercializa livros, CD's de música e outros produtos através da internet, sem instalações físicas, que tinha dificuldades em cumprir prazos de entrega e assegurar baixos custos de distribuição operando a partir de um único armazém localizado em Seattle, nos EUA. Em decorrência, a empresa teve que abrir depósitos em outras partes do país a fim de assegurar uma distribuição eficiente em termos de custos (principalmente estoque e transporte) e eficaz em termos de nível de serviço (principalmente prazo de entrega).

Uma vez determinado o número e a localização das instalações, a decisão de quais clientes e fornecedores alocar a cada instalação tem um efeito significativo no desempenho da rede logística como um todo, uma vez que afeta custos de produção, de estoque e de transporte de modo a atender às demandas com o nível de serviço adequado. Em decorrência, essa alocação

deve ser revista periodicamente em função de mudanças e crescimento do mercado, bem como de novas exigências de nível de serviço.

O problema de configuração de redes tem dois aspectos importantes, um de natureza espacial e outro de natureza temporal. O aspecto espacial, ou geográfico, refere-se à localização dessas instalações e aos fluxos entre pontos, de forma a minimizar os custos relacionados ao atendimento da demanda. Já o aspecto temporal refere-se à disponibilidade de cargas, matérias primas e produtos no prazo adequado.

Este capítulo está organizado da seguinte forma: inicialmente são apresentados os conceitos básicos da teoria de localização de instalações e os principais modelos matemáticos, que formam a base para o projeto de redes logísticas. Em seguida, são detalhados dois problemas reais relacionados à configuração de redes: o problema de configuração de rede para uma transportadora de carga parcelada e o problema de configuração de uma rede de produção e distribuição para uma editora de revistas.

O primeiro deles envolve a configuração de redes do tipo "*hub-and-spoke*" para transportadoras de carga parcelada no Brasil. Mais especificamente, busca-se determinar quantos e quais são os terminais de consolidação de carga parcelada ("*hubs*") e quais pontos (ou filiais) são atendidos por cada "*hub*", de forma a minimizar a somatória dos custos fixos e variáveis. O modelo proposto se diferencia dos demais encontrados na literatura por permitir considerar fatores de economia de escala, para os custos de transporte, que variam de acordo com os respectivos volumes de carga entre instalações, como ocorre com as transportadoras de carga no Brasil.

Já o segundo problema trata da modelagem de redes para o caso de uma revista semanal de informações de grande tiragem. O problema consiste em determinar a quantidade e a localização de plantas industriais (*gráficas*), bem como a abrangência de cada uma delas e o seqüenciamento de produção, de forma a minimizar a soma dos custos de produção e de transporte. É proposto um modelo de programação linear inteira-mista para a sua solução, que considera aspectos temporais, de capacidade de produção das unidades industriais, de escolha do modal de transporte e de nível de serviço, que são essenciais para a competitividade e sobrevivência de editoras de revistas.

## 5.1 CONCEITOS BÁSICOS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES

Segundo Novaes (1989), o problema da localização de instalações tem sido tratado de modo bastante amplo na literatura, envolvendo desde problemas mais simples de localização de uma única instalação, até problemas bastante complexos, com várias instalações a serem localizadas, em diversos níveis de uma cadeia produtiva ou de serviços, com fluxos de naturezas distintas.

Podem englobar instalações produtivas tais como fábricas, portos, pontos de venda, armazéns, lojas de varejo e centros de serviço (Ballou, 1999), como também instalações de serviço urbano, incluindo serviços de rotina e de emergência, como postos de correio, pontos de incineração de lixo, instalações de bombeiros, postos de saúde e unidades de emergência médica, dentre outros (Larson e Odoni, 1981).

As decisões de localização, no contexto do planejamento logístico, correspondem à determinação do número, localização e tamanho das instalações a serem usadas (Ballou, 1999).

De acordo com Current, Daskin e Schilling (2002), os seres humanos têm analisado a eficácia das suas decisões de localização desde que habitaram a primeira caverna. De acordo com os autores, o longo e abrangente histórico da pesquisa sobre localização poder ser explicada pelos seguintes fatores:

- As decisões de localização geralmente são tomadas em todos os níveis das organizações humanas, desde indivíduos e famílias até empresas, agências governamentais e ainda agências internacionais.
- As decisões de localização são geralmente estratégicas por natureza, isto é, envolvem um elevado aporte de capital, e seus efeitos econômicos acarretam resultados no longo prazo. No setor privado, tais decisões têm uma influência maior na capacidade de uma empresa de competir no seu mercado. No setor público, elas influenciam na eficiência pelo qual instituições do poder público provêem serviços públicos e a habilidade destas instituições de atrair / agrupar famílias e outras atividades econômicas.

- As decisões de localização freqüentemente impõem exterioridades econômicas, tanto positivas como negativas. Tais exterioridades incluem desenvolvimento econômico, geração de empregos e de renda, poluição, congestionamento, entre outros.
- Modelos matemáticos de localização são, muitas vezes, extremamente complexos e difíceis de resolver.
- Modelos de localização correspondem a aplicações específicas, isto é, sua forma estrutural (a função objetivo, restrições e variáveis) é determinada de acordo com o problema particular em estudo. Conseqüentemente, não existe um único modelo geral de localização que seja apropriado para todas as aplicações potenciais ou existentes.

Current, Daskin e Schilling (2002) relacionam ainda 51 referências bibliográficas sobre o assunto, envolvendo inúmeras aplicações diferentes, destacando seu aspecto multidisciplinar.

Segundo Gualda (1995), no seu abrangente trabalho sobre a modelagem e a análise de terminais de transporte, o problema de localização pode ser definido como um problema de alocação espacial de recursos. A hipótese básica da teoria da localização é a de que cada empresa procura escolher a localização que leve à maximização dos lucros da sua atividade.

Silva Leme (1965) apud Gualda (1995) aponta que os fatores locais podem ser classificados em fatores aglomerativos, fatores desaglomerativos, e o fator transporte. Os fatores aglomerativos são os que contribuem para agrupar as atividades produtivas em um determinado ponto ou local, sendo que os desaglomerativos agem no sentido de desagrupar essas atividades, levando à localização das mesmas em mais de um ponto. O fator transporte pode agir tanto num sentido como no outro, dependendo do caso.

Nos problemas em que o fator transporte é predominante, isto é, tem grande peso nas decisões, a resolução de problemas de localização pode ser simplificada através da sua modelagem centrada no fator transporte, e as soluções assim obtidas analisadas com vistas aos demais fatores.

Ainda segundo Gualda (1995), os problemas de localização podem ser classificados em dois grupos, a saber:

- Métodos Indutivos, que se baseiam na análise de dados e informações estatísticos, históricos e provenientes de pesquisas de campo (questionários), através do que se

busca razões ou indicações quanto à melhor localização para uma dada indústria (ou terminal, no nosso caso);

- o Métodos Dedutivos, que consistem no estabelecimento de um modelo representativo da realidade, passível de tratamento matemático, para resolver o problema da localização; dados históricos ou estatísticos são usados para testar os resultados produzidos por esses modelos.

Há que se distinguir a macro-localização da micro-localização. A primeira precede a segunda e se refere à escolha de uma região para localização da instalação pretendida, enquanto que a segunda está associada à escolha de um sítio específico, dentro da região, para implantação da instalação.

Ainda segundo o autor, os problemas de macro-localização são mais adequados à aplicação de métodos do tipo dedutivo; os problemas de micro-localização envolvem um número muito grande de variáveis, e até mesmo fatores pessoais e políticos na tomada de decisões, o que limita, na maioria dos casos, à adoção de modelos matemáticos para a sua solução.

Os modelos matemáticos para solução do problema de localização baseiam-se na minimização dos custos envolvidos, admitindo-se, dessa forma, que não há variação significativa nas receitas associadas às possíveis soluções locais e que, portanto, a solução obtida satisfaz o objetivo de maximização de lucros. Essa é uma simplificação que pode não ser verdadeira em casos em que, por exemplo, a demanda pode apresentar variação importante com a localização escolhida. De qualquer maneira, o problema, mesmo com essa simplificação, tem natureza bastante complexa.

### **5.1.1 Modelos Matemáticos para a Configuração de Redes Logísticas**

Segundo Ballou (2001), a teoria de localização de instalações é base para a modelagem matemática do problema de configuração de redes logísticas, também conhecido como projeto de cadeias de suprimentos. Do ponto de vista dos inúmeros artigos encontrados na literatura científica que tratam sobre o tema, esse problema se enquadra na categoria mais geral de problemas de localização de instalações (do inglês "*facility location problems*") ou problemas de localização de armazéns ("*warehouse location problems*"). Ou seja, definir a melhor localização de uma ou mais instalações, em termos espaciais ou geográficos.

De maneira geral, pode-se dizer que os modelos matemáticos para localização de instalações podem ser classificados em duas categorias: modelos para localização de uma única instalação e modelos para localização de múltiplas instalações (Magee, 1977; Ballou, 1985; Novaes, 1989; Gualda, 1995).

O problema de localização de uma única instalação pode ocorrer quando se pretende que haja apenas uma instalação, ou quando uma possível instalação estará tão isolada das demais que a demanda a ser atendida por ela pode ser considerada independente da demanda a ser atendida pelas demais instalações, possibilitando a decomposição do problema de localização de  $n$  instalações em  $n$  problemas independentes de localização de uma instalação, simplificando o problema.

A modelagem do problema de localização de mais de uma instalação é, certamente, mais complexa. Envolve, entre outras, considerações sobre a parcela da demanda a ser atendida por cada uma das instalações. Isso significa buscar respostas para questões relacionadas a quantas instalações implantar, onde implantá-las, o porte de cada uma delas e as respectivas áreas de influência, e os modos de transporte a serem utilizados para suprimento e distribuição. A função objetivo, nesse caso, está associada, em geral, à minimização da somatória dos custos associados a cada uma das instalações, sujeita a restrições quanto a porte mínimo ou máximo de cada instalação, distância entre elas, distâncias máximas de cada instalação aos pontos de demanda, além de limitações de capacidade de vias e dos veículos de transporte. A eventual existência de economias de escala aumenta a dificuldade na modelagem desse tipo de problema.

Os modelos locacionais podem diferir quanto à representação espacial da região considerada e da malha de transportes envolvida, podendo ser identificados dois tipos (Crainic, 1998):

- de localização no plano, o que implica a existência de infinitos pontos alternativos para a pretendida localização e a existência de uma malha de transportes bastante densa, cobrindo praticamente toda a região considerada. As distâncias, neste caso, são obtidas com base em métricas euclidianas ou retangulares;
- de localização discreta, isto é, num grafo ou rede, o que implica a representação matemática da malha de transportes existente e a consideração de um número finito de pontos alternativos para a pretendida localização, situados nos nós da rede. Modelos de programação linear, inteira e mista, assim como a teoria de grafos e de fluxos em

redes, formam a base dos modelos matemáticos utilizados neste segundo tipo de abordagem.

Problemas de localização envolvem a definição de algumas instalações, geralmente nos vértices de uma rede, de tal forma a facilitar a movimentação de produtos ou o fornecimento de serviços ao longo da rede. A demanda (“clientes”) também é geralmente representada nos vértices da rede. Estes podem estar nos mesmos (ou diferentes) vértices onde as instalações podem ser localizadas.

Brandeau e Chiu (1989) apresentam uma abrangente resenha contemplando 54 trabalhos sobre localização. O objetivo é localizar instalações (e, talvez, alocar clientes a pontos de prestação de serviços), de forma a otimizar um objetivo espacialmente dependente (implícita ou explicitamente dependente). Critérios típicos utilizados para tal incluem:

- minimização do tempo médio da viagem ou da distância média entre os pontos de oferta e de demanda, ponderados ou não pela demanda;
- minimização do tempo médio de resposta (tempo de viagem mais eventuais esperas para atendimento);
- minimização de uma função de custo da viagem ou do tempo de resposta;
- minimização do máximo tempo de viagem;
- maximização do mínimo tempo de viagem.

Apresentam-se a seguir as formulações matemáticas para alguns dos modelos matemáticos fundamentais mais representativos de localização de instalações. Para tanto, definem-se os seguintes conjuntos e dados de entrada:

$I$  = conjunto de pontos de demanda (a serem atendidos), indexado por  $i$ ;

$J$  = conjunto de locais candidatos a instalações, indexado por  $j$ ;

$d_{ij}$  = distância do ponto de demanda  $i$  a partir do local candidato  $j$ ;

$c_{ij}$  = custo de atendimento do ponto de demanda  $i$  a partir do local candidato  $j$ ;

$q_i$  = quantidade demandada no ponto  $i$ ;

$f_j$  = custo fixo da instalação  $j$ ;

$b_j$  = capacidade da instalação  $j$ ;

Seja  $G = (N, A)$  o grafo ou rede tal que  $N$  corresponde ao conjuntos dos nós ( $N = I \cup J$ ) e  $A$  indica os arcos  $(i, j)$  entre nós dos conjuntos  $I$  e  $J$ , respectivamente.

Definem-se ainda as seguintes variáveis de decisão binárias: (i)  $y_j = 1$  se a instalação  $j$  for selecionada; 0 caso contrário; (ii)  $x_{ij} = 1$  se o ponto  $i$  é atendido a partir da instalação  $j$ ; zero caso contrário.

a) *Modelo de Localização de Cobertura de Conjuntos (Set Covering Location Model):*

Selecionar o menor número de instalações nos nós (ou vértices) do grafo  $G$ , tal que cada um dos pontos de demanda  $i$  seja atendido (coberto) por pelo menos uma instalação  $j^*$  selecionada, e assegurando que  $i$  esteja a uma distância máxima de cobertura  $D_c$ , isto é,  $d_{ij^*} \leq D_c$ . Assim, para cada nó  $i$  é definido um conjunto  $N_i = \{j : d_{ij} \leq D_c\}$ . A distância de cobertura  $D_c$  está geralmente relacionada ao caminho mais curto entre a instalação e cada um dos nós de demanda; pode ser a mesma para todos os vértices, ou pode depender de uma instalação específica e de pontos de demanda.

$$\text{Minimizar } \sum_{j \in J} y_j \quad (5.1)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in N_i} y_j \geq 1, \forall i \in I \quad (5.2)$$

$$y_j \in \{0,1\}, \forall j \in J \quad (5.3)$$

Na versão clássica, a função objetivo (5.1) corresponde à minimização do número de instalações necessárias para “cobrir” todos os pontos de demanda. Outras formulações encontradas na literatura podem considerar a minimização do custo total das instalações selecionadas (quando o custo de cada instalação puder variar), ou ainda considerar a situação de um orçamento fixo, em que então o objetivo pode ser maximizar a demanda coberta pelas instalações selecionadas. A restrição (5.2) assegura que todos os pontos de demanda estejam cobertos por no mínimo uma instalação selecionada.

Modelos de Cobertura de Conjunto são tipicamente associados à localização de instalações públicas, tais como centros de saúde, agências de correio, bibliotecas, e escolas.

b) *Problema dos p-centros:*

Localizar  $p$  instalações nos vértices de uma rede, de tal forma a minimizar  $D$ , que representa a distância máxima entre um ponto de demanda e à instalação ao qual o mesmo está alocado:

$$\text{Minimizar } D \quad (5.4)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in J} y_j = p, \quad (5.5)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (5.6)$$

$$x_{ij} - y_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (5.7)$$

$$D \geq \sum_{j \in J} d_{ij} x_{ij} \quad \forall i \in I \quad (5.8)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (5.9)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (5.10)$$

Na formulação acima, a função objetivo (5.4) corresponde à minimização da distância máxima  $D$ . A restrição (5.5) impõe que  $p$  instalações devem ser escolhidas, enquanto a restrição (5.6) assegura que cada nó  $i$  esteja alocado a exatamente uma instalação escolhida. A restrição (5.7) restringe a alocação dos nós a instalações selecionadas, e a restrição (5.8) define o limitante inferior para o valor de  $D$ , que está sendo minimizado. As restrições (5.9) e (5.10) definem os respectivos domínios das variáveis de decisão.

Outras variações do problema de  $p$ -centro encontradas na literatura podem considerar as distâncias ponderadas pelas demandas dos nós, ao invés de tratar todos os nós igualmente como apresentado acima; também podem aceitar a localização das instalações em qualquer posição dos arcos, não se restringindo aos vértices. Problemas desse tipo muitas vezes surgem quando é necessário estabelecer a localização de instalações de emergência, tais como estações de bombeiros e resgate para emergências médicas.

c) *Problema das p-medias:*

Localizar  $p$  instalações nos vértices de uma rede e definir a alocação dos nós de demanda a essas instalações de tal forma a minimizar a distância total ponderada entre instalações e pontos de demanda. Esse problema pode ser formulado da seguinte maneira:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_i d_{ij} x_{ij} \quad (5.11)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in J} y_j = p \quad (5.12)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (5.13)$$

$$x_{ij} - y_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (5.14)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (5.15)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (5.16)$$

A função objetivo (5.11) busca minimizar a distância total ponderada pela distância. As restrições (5.12) a (5.14) são idênticas às restrições (5.5) a (5.7) do problema do  $p$ -centro; o mesmo ocorre com as restrições (5.15) e (5.16) em relação às restrições (5.9) e (5.10).

Assume-se, na formulação acima, que os locais candidatos se restringem aos nós da rede. Hakimi (1964) provou que mesmo relaxando o problema de modo a permitir a localização de instalações nos arcos da rede não permite a redução da distância total ponderada. Conseqüentemente, esta formulação permite obter a solução ótima mesmo se as instalações puderem se localizar em qualquer ponto dos arcos.

*d) Problema de Localização de Instalações Capacitadas:*

Algumas hipóteses do problema das  $p$ -medianas podem não ser apropriadas para algumas situações que envolvem a localização de instalações, em particular: (i) todas as instalações têm o mesmo custo fixo; (ii) as instalações não têm limite de capacidade; (iii) o número de instalações a serem selecionadas é definido a priori (igual a  $p$ ). Assim, o problema de localização de instalações capacitadas pode ser visto como uma generalização do problema das  $p$ -medianas, de modo a considerar esses três aspectos, conforme pode ser visto na formulação matemática apresentada a seguir:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{j \in J} f_j y_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_i c_{ij} x_{ij} \quad (5.17)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (5.18)$$

$$x_{ij} - y_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (5.19)$$

$$\sum_{i \in I} q_i x_{ij} \leq b_j y_j \quad \forall j \in J \quad (5.20)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (5.21)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (5.22)$$

A função objetivo (5.17) corresponde à minimização das parcelas de custos fixos das instalações selecionadas e dos custos de transporte da demanda a ser atendida. A restrição (5.20) impede que a demanda total dos pontos alocados a uma instalação  $j$  supere a sua capacidade  $b_j$ . As demais restrições são as mesmas dos problemas anteriores de  $p$ -centros e  $p$ -medianas. Relaxando-se a restrição (5.22) permite-se que a demanda de um nó  $i$  possa ser atendida (parcialmente) por múltiplas instalações. Note-se que a restrição (5.19) poderia ser eliminada, uma vez que a restrição (5.20) assegura que os nós sejam alocados a instalações selecionadas; no entanto, a manutenção da mesma na formulação fortalece a relaxação linear do modelo. Por outro lado, sem a restrição (5.20) tem-se o problema de localização de instalações não capacitado.

e) *Problema de Localização com mais de uma camada*

Em todos os problemas anteriormente descritos havia apenas uma camada (do inglês “*layer*”) ou nível hierárquico, ou seja, pontos de demanda atendidos por instalações a serem selecionadas. Conforme visto anteriormente, podem existir situações em que é necessário determinar simultaneamente a quantidade e a localização de mais de um tipo de instalação (por exemplo, fábricas e depósitos), assim como a alocação dos depósitos às fábricas e também dos clientes aos depósitos, caracterizando diferentes camadas. Nesse caso, a formulação do problema de localização de instalações capacitado pode ser generalizada a fim de representar esse tipo de situação mais geral, conforme detalhado mais adiante. Para tanto, define-se o seguinte conjunto adicional:

$K$  = conjunto de locais candidatos a instalações que abastecem as instalações  $j \in J$ , indexado por  $k$ ;

Em outras palavras, as instalações  $k$  podem representar, por exemplo, fábricas que abastecem depósitos  $j$  que, por sua vez, atendem clientes  $i$ . Definem-se ainda as seguintes variáveis de decisão: (i)  $z_k = 1$  se a instalação  $k$  for selecionada; 0 caso contrário; (ii)  $w_{jk}$  que corresponde ao fluxo total para o depósito  $j$  a partir da fábrica  $k$ . Assim, o modelo matemático correspondente pode ser escrito como:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{k \in K} f_k z_k + \sum_{j \in J} f_j y_j + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{jk} w_{jk} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_i c_{ij} x_{ij} \quad (5.23)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (5.24)$$

$$x_{ij} - y_j \leq 0 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (5.25)$$

$$\sum_{i \in I} q_i x_{ij} \leq b_j y_j \quad \forall j \in J \quad (5.26)$$

$$\sum_{j \in J} w_{jk} \leq b_k y_k \quad \forall k \in K \quad (5.27)$$

$$\sum_{k \in K} w_{jk} = \sum_{i \in I} q_i x_{ij} \quad \forall j \in J \quad (5.28)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (5.29)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (5.30)$$

$$z_k \in \{0,1\} \quad \forall k \in K \quad (5.31)$$

A função objetivo (5.23) corresponde à minimização das parcelas de custo fixos dos dois tipos de instalações selecionadas (fábricas e depósitos), dos custos de transporte entre fábrica e depósito e também para atendimento dos clientes a partir dos depósitos, sendo que alguma das parcelas de custo de transporte pode também embutir algum custo unitário relativo às operações de manuseio e armazenagem no depósito. As restrições (5.24) e (5.25) são as mesmas que aparecem nos problemas anteriores. De maneira similar ao problema anterior, as restrições (5.26) e (5.27) impedem que a demanda total alocada a cada instalação supere a sua respectiva capacidade. Já a restrição (5.28) garante o balanço dos fluxos de entrada e de saída em cada depósito intermediário. As demais restrições são as equivalentes ao do problema anterior de localização de instalações capacitado.

Tal formulação pode ser estendida sem maiores dificuldades para considerar outras situações encontradas na prática, tais como uma rede logística com mais camadas, atendimento direto de fábricas para clientes (basta considerar um depósito junto à fábrica), ou ainda mais de uma categoria ou classe de produto. Entretanto, quanto mais complexo o modelo, maior o número de variáveis de decisão e maior a dificuldade para resolver instâncias reais através de pacotes comerciais de otimização, mesmo os mais avançados, uma vez que o problema de localização de instalações capacitado apresenta ordem de complexidade exponencial (Garey e Johnson, 1979).

Existem diversos outros modelos matemáticos relacionados a problemas mais específicos que envolvem a localização de instalações, não necessariamente voltados especificamente à configuração de redes logísticas. Boas referências gerais sobre a modelagem na localização de instalações podem ser encontradas nos trabalhos de Brandeau e Chiu (1989), Owen e Daskin (1998), Current *et al.* (2002), ReVelle e Eiselt (2005) e Ambrosino e Scutellà (2005).

### 5.1.2 Estratégias de Solução para Problemas de Localização

Conforme visto anteriormente, problemas de localização de instalações são geralmente formulados como modelos de programação linear inteira mista. Modelos de problemas reais podem facilmente ter dezenas e até centenas de milhares de variáveis de decisão e restrições, o que torna impossível sua resolução através de pacotes comerciais. A razão básica é que a maioria dos modelos de localização pertencem à categoria *NP-hard* (Garey e Johnson, 1979).

Conseqüentemente, é necessário utilizar heurísticas para a sua resolução. Muitas heurísticas baseiam-se em algoritmos gulosos (*greedy*) a fim de rapidamente se obter uma solução inicial viável, complementadas por um algoritmo de melhoria baseado em trocas ou em um processo de busca em vizinhança. Nessa linha, Ahuja *et al.* (2004b) propuseram uma heurística inovadora baseada em busca de vizinhança de grande porte que considera múltiplas trocas envolvendo vários clientes simultaneamente. Resende e Werneck (2004) desenvolveram uma meta-heurística híbrida que utiliza conceitos de algoritmos genéticos e busca tabu para o problema das *p*-medianas; mais especificamente, múltiplas soluções são geradas (*multistart*) e melhoradas através de *path-relinking*. A mesma foi posteriormente adaptada para resolver o problema de localização de instalações não capacitado (Resende e Werneck, 2005). Outra classe de heurísticas baseia-se no uso da relaxação Lagrangeana, que não só fornece limitantes inferiores ("*lower bounds*"), como também permite obter soluções viáveis (Barceló e Casanova, 1984; Pirkul, 1987; Hindi e Pienkosz, 1999).

Para finalizar, um aspecto importante, porém nem sempre devidamente considerado, está relacionado ao fato de que um problema típico de configuração de rede logística envolve muitos dados, incluindo (Simchi-Levi *et al.*, 2000):

- o localização dos clientes, varejistas, instalações produtivas, fornecedores, depósitos e centros de distribuição;

- todos os produtos, incluindo volumes, modos de transporte e requisitos de manuseio e acondicionamento (por exemplo, refrigerados);
- demanda anual para cada produto por cliente;
- custos de transporte e/ou fretes por modal e por par origem-destino;
- custos fixos e variáveis de movimentação e armazenagem nos depósitos;
- custos fixos e variáveis nas instalações produtivas;
- metas e requisitos de nível de serviço aos clientes (por exemplo, prazo de entrega, tamanho do pedido, etc.)

Uma análise rápida da lista acima faz constatar a elevada quantidade de dados necessários um problema de otimização de rede logística. Assim, a fim de tornar possível a modelagem, é imperativa a agregação de dados utilizando os seguintes critérios (Simchi-Levi *et al.*, 2000; Ratliff e Nulty, 1996):

- a) Clientes devem ser agrupados com base em algum critério de proximidade geográfica, por exemplo, em nível de município, ou de zona de CEP (código de endereçamento postal) de três dígitos, e tratados como um único ponto de demanda, a fim de evitar a explosão do tamanho do modelo. Deve-se notar que o agrupamento de clientes deve considerar a classificação dos mesmos segundo requisitos de nível de serviço, de frequência de entrega, de tamanho mínimo de pedido, etc. Por exemplo, se houver duas categorias de cliente, grandes redes de supermercado e pequeno varejo, os clientes de cada categoria são agrupados independentemente, mesmo que estejam geograficamente próximos. Busca-se, dessa forma, reduzir a dimensão do problema, que geralmente pode envolver até dezenas de milhares de clientes de forma a permitir a solução do modelo matemático correspondente.
- b) Analogamente, produtos devem ser agrupados em categorias, que reflitam os requisitos logísticos, tais como acondicionamento, transporte, manuseio, armazenamento, bem como aspectos da demanda. Exemplificando, alimentos e produtos de limpeza devem compor dois grupos distintos, dadas as restrições de transporte e armazenamento conjunto.

Com relação ao cálculo dos custos (ou fretes) de transporte, tendo em vista o elevado número de potenciais pares origem-destino (cada instalação candidata pode atender todos ou uma grande parte dos clientes), idealmente busca-se uma função que calcule automaticamente

todos os valores, com base nas distâncias, função essa normalmente obtida através de regressão de dados históricos de fretes praticados. No caso brasileiro surge uma dificuldade, decorrente do fato de que nem sempre os fretes podem ser calculados de forma automática, através de regressão, uma vez que os mesmos podem apresentar variações significativas para uma mesma distância, em função de fatores de mercado e concorrência entre empresas, da possibilidade de se obter frete de retorno e de outros aspectos geográficos. Adicionalmente, pode haver as opções de usar frota própria ou de contratação de terceiros. Assim, na maioria dos casos os fretes precisam ser determinados individualmente para cada par origem-destino, o que aumenta significativamente o trabalho de preparação de dados.

Desta forma, um dos grandes desafios é desenvolver algoritmos de solução mais rápidos, eficientes e robustos, que permitam obter soluções de boa qualidade e possibilitem tratar problemas maiores e mais complexos em termos do número de produtos, de níveis ou camadas, de instalações candidatas e de pontos de demanda.

### **5.1.3 Modelagem da Localização de Instalações com Múltiplos Critérios**

Conforme se procurou demonstrar nas seções anteriores, modelos de otimização são ferramentas importantes e vêm sendo amplamente utilizados para resolver problemas reais que envolvem a localização de instalações, apesar das dificuldades para representar adequadamente a realidade de tais problemas. Por outro lado, há que se considerar que a decisão sobre onde localizar, a qual é de natureza estratégica e geralmente representa investimentos vultosos, envolve a avaliação de inúmeros critérios, com diferentes níveis de influência no resultado final, incluindo, muitas vezes, a necessidade de se considerar aspectos não só quantitativos, como também qualitativos, tornando o problema ainda mais complexo.

Por outro lado, ao longo dos últimos anos, e com maior ênfase a partir dos anos 70, têm sido crescentes as propostas de utilização de novas ferramentas para soluções de problemas complexos, como alternativa aos modelos de otimização tradicionais.

Nesse sentido, o Método de Análise Hierárquica - MAH (do inglês "*Analytic Hierarchy Process*" - AHP), proposto por Thomas L. Saaty (Saaty, 1991), vem sendo adotado em inúmeras situações que envolvem decisões com múltiplos critérios, uma vez que permite tratar, simultaneamente, aspectos quantitativos e qualitativos.

O MAH busca refletir o método natural da mente humana ao comparar dois elementos entre si. Segundo Saaty (1991), em problemas de tomada de decisão normalmente são avaliados e considerados inúmeros elementos que, aparentemente, nem sempre são comparáveis entre si de forma direta. Entretanto, ao se estabelecer um procedimento que agregue tais elementos, segundo propriedades comuns, torna-se possível compará-los.

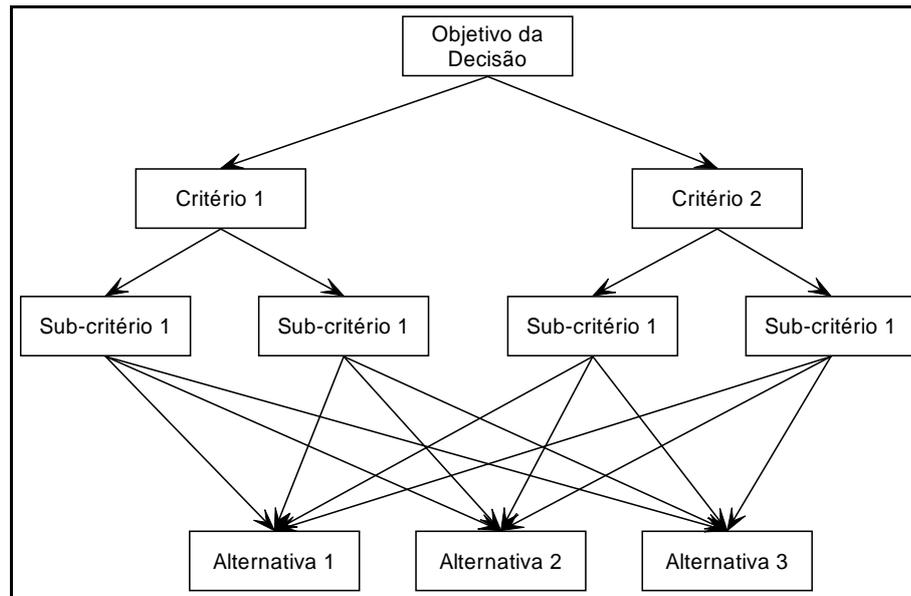
O MAH permite a avaliação de múltiplos critérios, com modelos complexos que incluem e medem todos os fatores importantes, qualitativa e quantitativamente, sejam eles tangíveis ou intangíveis.

A aplicação do MAH requer, inicialmente, a estruturação do problema de modo hierárquico. A estruturação de hierarquias tem sido muito discutida, mas ainda não se estabeleceu um conjunto de procedimentos exatos e rigorosos de forma a gerar objetivos, critérios e as respectivas atividades com relativa clareza e precisão. Assim, os problemas e os sistemas a eles associados teriam sua hierarquia estruturada com base na somatória de experiências dos integrantes do grupo de decisão que, de uma maneira organizada (por exemplo, em sessões de *brainstorming*), o que permitiria auxiliar na identificação dos conceitos, dos objetivos, das atividades e dos atores e, em decorrência, a estruturação hierárquica do problema.

A título de ilustração, a Figura 5.2 mostra uma estrutura de decisão hierárquica típica em 3 níveis, incluindo a forma de comparação paritária entre as alternativas e os critérios.

Os valores dos julgamentos devem ser organizados numa matriz, sendo que, ambos, os valores e a matriz, deverão seguir os conceitos definidos por Saaty (1994), para o que caberia relembrar a formulação da comparação paritária, a saber:

- ao se comparar um elemento com ele mesmo o valor é 1; isto é, na comparação do elemento  $A$  com o elemento  $A$ , o fator comparativo é igual a 1, pois um elemento comparado com si mesmo resulta igualmente importante;
- ao se comparar um elemento com outro e, em seguida, comparar o segundo com o primeiro, os fatores comparativos são inversos entre si; isto é, ao se comparar o elemento  $A$  com o elemento  $B$ , pode-se obter, por exemplo, o fator comparativo de 2; portanto, ao compararmos o elemento  $B$  com o elemento  $A$ , teremos, conseqüentemente, o fator comparativo inverso de 2, ou seja  $1/2$ .



**Figura 5.2:** Estrutura de decisão hierárquica em 3 níveis

Lin e Tu (2000) argumentam que o problema de localização é complexo e o MAH pode, efetivamente, tratar os fatores qualitativos e quantitativos num ambiente de decisão de múltiplos critérios, configurando-se como uma importante ferramenta para tal, pois possui a habilidade de sintetizar cenários e produzir um diagnóstico que permita ao tomador de decisão entender o comportamento inter-relacional dos sub-sistemas que compõem a decisão.

A combinação do uso de modelos matemáticos com o MAH foi proposta por Mau-Crimming e Liberti (2002) para seleção de localização de reservas naturais. Esse estudo contemplou as ponderações dos acionistas da empresa e das demais partes envolvidas na decisão, para estruturação do problema no formato MAH. Os índices obtidos com o uso dessa metodologia foram utilizados como fatores a serem aplicados às variáveis de decisão que compõem a função objetivo e as respectivas restrições do modelo matemático formulado para o problema.

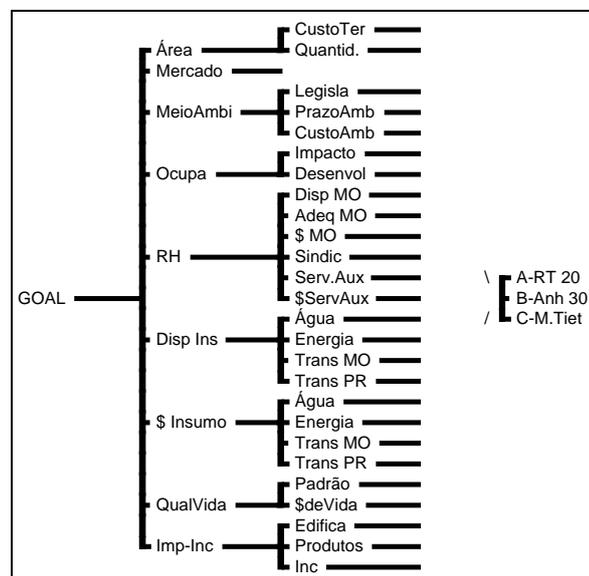
Galvão *et al.* (2003) aplicaram o MAH a um problema que envolvia a seleção de local para implantação do centro de distribuição de uma empresa do setor de bens de consumo não duráveis, cujos produtos requerem embalagem e manuseio diferenciado em função da sua fragilidade. O centro de distribuição envolverá um pequeno processo de industrialização para agregação de valor ao produto final, que nele será embalado, estocado e, a seguir, distribuído.

Uma etapa do processo envolveu a elaboração de uma lista de verificação (*check-list*), reproduzida no Quadro 5.1 e que contempla fatores relevantes a serem considerados e avaliados em problemas de localização. Essa lista almeja englobar diversos pontos de

verificação que podem influenciar a implantação de um empreendimento. A mesma é genérica, e deve ser adaptada ao tipo de instalação que será avaliada e implantada, com os necessários ajustes às respectivas características intrínsecas da instalação em análise, que pode ser um terminal de transbordo, um terminal portuário, uma unidade geradora de energia, um aeroporto, um centro de distribuição etc.

A estrutura hierárquica para o problema de localização do centro de distribuição, baseada na lista de verificação proposta no Quadro 5.1, foi implementada no *software* Expert Choice, conforme ilustrado na Figura 5.3.

A aplicação do MAH ao problema permitiu comprovar que o mesmo pode ser uma ferramenta útil para apoio à tomada de decisão sobre localização de instalações, principalmente na fase inicial do processo de avaliação, na qual há ausência de dados para uma modelagem mais sofisticada. Sua aplicação possibilitou a identificação da localização mais adequada para implantação do Centro de Distribuição, numa fase inicial do estudo. Essa ferramenta poderia também ser aplicada numa fase posterior do estudo, em que pudessem ser considerados, na estrutura hierárquica proposta, os resultados obtidos a partir de modelos de otimização aplicados ao problema.



**Figura 5.3:** Estrutura hierárquica para o problema de localização do centro de distribuição

Fonte: Galvão *et al.* (2003)

**Quadro 5.1:** Lista de verificação proposta para seleção de localização

<p>1. Área para implantação</p> <p>a) custo da área</p> <p>b) disponibilidade de quantidade de área necessária para o projeto</p> <p>2. Insumos</p> <p>a) Águas e Efluentes</p> <p>i) disponibilidade de fontes de abastecimento</p> <p>ii) disponibilidade de lançamento de efluentes</p> <p>iii) custos de fornecimento</p> <p>(1) disponibilidade em quantidade de água industrial e potável</p> <p>(2) distâncias das fontes</p> <p>(3) disponibilidade de corpo receptor para o lançamento de efluentes</p> <p>(4) sistemas de captação de água / adução / tratamento e armazenamento</p> <p>(5) tratamento da água</p> <p>(6) tratamento do efluente</p> <p>b) Gás Natural</p> <p>i) disponibilidade de gás natural</p> <p>ii) contrato de fornecimento de gás natural e sua confiabilidade</p> <p>iii) custo de fornecimento</p> <p>(1) distância do gasoduto</p> <p>(2) custos de acesso às redes de gás</p> <p>(3) custo do gás</p> <p>c) Energia Elétrica</p> <p>i) disponibilidade e fontes de energia elétrica</p> <p>ii) contrato de fornecimento de energia e sua confiabilidade</p> <p>iii) custo de fornecimento</p> <p>(1) distancias às redes elétricas</p> <p>(2) custo de acesso às redes de energia elétrica</p> <p>(3) integração na rede</p> <p>(4) reforços necessários para a saída da energia gerada</p> <p>d) Transporte</p> <p>i) Mão de Obra</p> <p>(1) Disponibilidade</p> <p>(2) Custo</p> <p>ii) Produto</p> <p>(1) Disponibilidade</p> <p>(2) Custo</p> <p>iii) Matéria Prima</p> <p>(1) Disponibilidade</p> <p>(2) Custo</p> <p>iv) Vias de Acesso</p> <p>(1) Rodoviário</p> <p>(2) Ferroviário</p> <p>(3) Hidroviário</p> <p>(4) Aeroviário</p> <p>e) Matéria-Prima</p> <p>i) disponibilidade e custo</p>	<p>3. Mercado</p> <p>a) Local</p> <p>b) Exportação para outros centros consumidores</p> <p>c) identificação de investimentos previstos na região</p> <p>d) concorrência</p> <p>4. Aspectos Ambientais</p> <p>a) legislação ambiental estadual e municipal</p> <p>b) etapas e prazos para licenciamento ambiental</p> <p>c) impedimentos ambientais</p> <p>d) custo de atendimento à legislação</p> <p>5. Vegetação, Fauna e Clima</p> <p>a) vegetação e seus dispositivos legais de proteção</p> <p>b) espécies de fauna em extinção e seus dispositivos legais de proteção no município</p> <p>c) clima e temperatura</p> <p>d) regime pluviométrico, enchentes e inundações</p> <p>e) ventos</p> <p>6. Ocupação Urbana e Habitação</p> <p>a) cidades próximas</p> <p>b) população</p> <p>c) planos de desenvolvimento</p> <p>d) impacto social</p> <p>7. Recursos Humanos</p> <p>a) legislação trabalhista</p> <p>b) sindicatos e sua atuação na região</p> <p>c) empresas de engenharia e de construção</p> <p>d) disponibilidade de serviços e de profissionais especializados</p> <p>e) disponibilidade de programas de treinamento educacional e vocacional</p> <p>f) disponibilidade de serviços de assistência médica e odontológica</p> <p>g) custos</p> <p>i) mão de obra direta</p> <p>ii) serviços auxiliares</p> <p>iii) mão de obra indireta e de suporte</p> <p>8. Qualidade de Vida</p> <p>a) outras indústrias na região e qualidade de mão-de-obra e seu comportamento geral</p> <p>b) condições para moradia de trabalhadores na região</p> <p>c) moradia, segurança e infra-estrutura social</p> <p>d) disponibilidade para lazer</p> <p>e) custo de vida na região</p> <p>i) moradia</p> <p>ii) transporte</p> <p>iii) infra-estrutura</p> <p>9. Impostos e Taxas</p> <p>a) área</p> <p>b) insumos</p> <p>c) mão-de-obra</p> <p>d) remessa de lucros</p> <p>e) outros</p> <p>10. Incentivos Fiscais e Tributários</p> <p>a) estaduais</p> <p>b) municipais</p>
--	---