4.
Fundamentos para a localização de instalações

Nesta seção serão analisadas as características e formulações acerca da localização de instalações e do problema de *transshipment* (transbordo), que darão base para a construção do modelo de localização e transbordo para plataformas logísticas e terminais especializados aplicado a múltiplos produtos.

4.1
Planejamento estratégico, tático e operacional

De acordo com Schmidt e Wilhelm (2000), o rápido desenvolvimento dos mercados mundiais vem gerando a dispersão da produção, da montagem, do fornecimento e da operação de distribuição das empresas multinacionais em diversos países que lhes apresentem vantagens competitivas na redução de custos, no aumento do nível de serviço e na sua lucratividade. Para que isto se torne realidade, vários estudos sobre decisão de localização têm sido elaborados ao longo dos anos, com vistas a auxiliar na tomada de decisão empresarial.

Crainic e Laporte (1997) têm utilizado o escopo de planejamento estratégico, tático e operacional com o fim de planejar modelos para o transporte de cargas. Schimidt e Wilhelm (2000), por sua vez, têm-se baseado no planejamento estratégico para tomada de decisões de localização de plantas em redes logísticas internacionais. Os quatro últimos autores citados concordam que os três níveis de planejamento apresentam-se da seguinte forma:

- Nível estratégico (longo prazo): Envolve o mais alto nível de gerenciamento e requer alto investimento em capital no horizonte de longo prazo. As decisões de nível estratégico determinam geralmente o desenvolvimento de políticas e estruturas para o sistema funcionar. Exemplos de decisões de nível estratégico são o desenho da rede (*network*), a localização de facilidades ou instalações e a aquisição de recursos. Essas decisões podem ter âmbito internacional, nacional ou regional.
- Nível tático (médio prazo): Envolve o planejamento eficiente e racional da alocação de recursos para aumentar a *performance* do sistema. As decisões de nível tático incluem escolha de rotas, tipos de serviços oferecidos e alocação de mão-de-obra nos terminais. No âmbito das firmas, as decisões de nível tático incluem decisões de produção das plantas industriais, políticas de produção e montagem, nível de inventário e tamanho de lotes.
- Nível operacional (curto prazo): Envolve o planejamento e decisões de curto prazo, em que a coordenação da rede para atender à demanda do consumidor é a meta principal. Nesse contexto, decisões de *scheduling* de serviços, manutenção de atividades, roteirização de veículos e alocação de recursos são decisões operacionais importantes.

Dentro desses níveis de planejamento, pretende-se neste estudo analisar a localização de terminais especializados no Brasil, sob o ponto de vista estratégico, de forma a contribuir na melhoria do sistema de transporte e propiciar ganhos de competitividade às exportações brasileiras.

4.2

Caracterização dos modelos de localização de instalações (*Facility location*)

O termo "análise de localização" refere-se à modelagem, formulação e solução de uma classe de problemas que pode ser mais bem descrita como localização de facilidades num dado espaço (ReVelle; Eiselt, 2005). O estudo de localização de instalações é um dos aspectos mais importantes dentro do planejamento estratégico aplicado a áreas tanto públicas como privadas, sejam elas localizadas no âmbito doméstico ou no âmbito internacional. Antes de uma instalação ser construída, um estudo de localização deve ser feito, objetivando determinar a apropriada localização e capacidade, bem como o capital necessário para sua alocação.

Segundo Pizzolato (2000), o problema de localizar uma instalação ou posto de serviço consiste em escolher uma posição geográfica para sua operação tal, que seja maximizada uma medida de utilidade, satisfazendo diversas restrições, em particular restrições de demanda.

Historicamente, o estudo da teoria da localização sob a ótica econômica iniciou-se formalmente em 1909, quando Alfred Weber [*Über den Standort der Industrien, traduzido como Alfred Weber's theory of location industries, 1929]* analisou o problema de como posicionar um único armazém e de como minimizar a distância entre este e seus vários clientes (Owen; Daskin,1998; Brandeau e Chiu, 1989). ReVelle e Laporte (1996) afirmam que, após o trabalho publicado por Weber em 1929, foram estudadas várias outras aplicações baseadas em algoritmos, principalmente a partir de meados de 1960, com o auxílio dos programas computacionais.

A teoria de localização ganhou redobrado interesse em 1964, com a publicação de Hakimi, que objetivava determinar a localização de postos de serviços em redes e postos policiais em *highways*. Hakimi (1964), estabeleceu dois teoremas: o primeiro, determinando que existe um ponto em uma rede que minimiza a soma ponderada das distâncias mais curtas de todos os vértices a este ponto, o qual vem a ser um dos vértices da rede; e o segundo teorema, determinando que, para o caso de se escolher *p* pontos centrais (problema conhecido como *p*-mediana), existirá um conjunto de *p* pontos (vértices da rede) que minimizará a soma das distâncias ponderadas de todos os vértices aos mais próximos de *p* pontos da rede. ReVelle e Laporte (1986, *apud* Owen; Daskin,1998), mais recentemente, modificou a versão do problema da *p*-mediana para exemplificar como essa versão poderia ser aplicada em contextos de tomada de decisão estratégica. Desde então, a teoria da localização tem-se desenvolvido ao longo dos anos e inspirado muitos pesquisadores em várias áreas de aplicação.

Os principais modelos de localização estão assim classificados (Crainic; Laporte,1997):

- Modelos de cobertura: O objetivo é minimizar o custo de localização de uma facilidade pelo qual um máximo nível de cobertura é obtido. Os problemas de cobertura estão divididos em *location set covering problem* (conjunto de problemas de cobertura) e *maximal covering problem* (problemas de máxima cobertura). O primeiro modelo de cobertura foi atribuído a Toregas *et al.* (1971) *apud* Drezner; Hamacher (2002), e posteriormente ampliado por Church e ReVelle (1974) *apud* Drezner; Hamacher, (2002). Alguns desdobramentos desse modelo estão presentes nos estudos de Crainic e Laporte (1997), Daskin (1995) e, Owen e Daskin (1998).

- Modelos centrais: O objetivo é localizar *p* instalações em uma rede, minimizando a máxima distância entre os vértices e a instalação, ou entre um nó de origem e a instalação mais próxima. Esse problema é conhecido como *p–center problem*, ou problema de *minimax* (Daskin, 1995).

- Modelos medianos: São chamados de *median models*. O objetivo é localizar *p* facilidades nos vértices de uma rede e alocar demandas dessas facilidades de forma a minimizar o total do produto peso vezes a distância entre as facilidades (instalações) e os pontos de demanda do consumidor (Hakimi,1964). Segundo Crainic e Laporte (1997), se a instalação é não-capacitada e o número de instalações é fixo, tem-se um problema de *p*-mediana. Se o número de instalações é variável e as instalações não têm restrição de capacidade, tem-se um problema denominado *Uncapacitated Plant Location Model (UPLM)* ou modelo de localização de plantas não-capacitadas [modelo de Balinski (1965) *in* Zhu e Revelle, 1989]. Se o número de localizações é variável e sua instalação é capacitada, tem-se então um problema denominado *Capacitated Plant Location Problem* (CPLP) ou problema de localização de plantas capacitadas.

Inúmeros autores têm feito revisões de literatura sobre o estudo da localização. Entretanto, Brandeau e Chiu (1989), Current e Schilling (1990), Daskin (1995), Hall (1999), Klose e Drexl (2005), entre outros, descreveram uma taxonomia que amplia os problemas de localização de instalações em:

- Modelos planos (*planar*) e modelos de rede (*network model)*: Nos modelos planos, a demanda ocorre em qualquer lugar no plano (com coordenadas x e y). Nesses modelos, supõe-se a inexistência de restrições de percurso, de modo que se pode usar a distância mais curta. Os mais utilizados são os métodos da métrica euclidiana, da métrica metropolitana e o modelo de Weber (1929). Nos modelos de rede, assume-se que as instalações e os pontos de demanda estão localizados nos nós da rede. Dentro desta caracterização, há que se destacar também a importante contribuição de Hakimi para os problemas de *p*-mediana.

- Modelos contínuos e discretos: Quando o modelo permite que as facilidades sejam localizadas em qualquer lugar dentro de um particular espaço de soluções (no plano), dá-se a denominação de modelo contínuo (Klose e Drexl,2005). Um exemplo desse modelo está presente no problema de Weber (1929). Daskin e Owen, citados por Hall (1999), afirmam que os modelos de localização contínua apresentam dificuldades de ordem computacional e prática, por vezes resultando em formulações não-lineares difíceis de serem solucionadas para mais de uma localização ou por apresentar soluções inviáveis na prática.

Em contraste aos modelos contínuos, os modelos de localização em rede são classificados como modelos discretos, pois assume-se que a demanda e as instalações estão localizadas nos nós de uma rede, em um conjunto finito de localizações (Mirchandani; Francis, 1990 e Daskin; Owen, *apud* Hall,1999).

- Modelos estáticos e dinâmicos: A maioria dos modelos de localização conhecidos são estáticos, ou seja, independente do tempo. Entretanto, a maioria dos problemas de localização tem a determinação do tempo como um condicionante. Portanto, nos modelos dinâmicos, considera-se a questão de onde e quando localizar. A condição tempo passa a ser utilizada.
- Modelos probabilísticos (estocásticos) e determinísticos: Como os modelos podem ser estáticos e dinâmicos, estes também podem ser probabilísticos (sujeitos a incertezas) ou determinísticos (não-sujeitos a incertezas).
- Modelos para um único produto (*single product)* ou modelos que levam em consideração múltiplos produtos (*multi-products ou multi-commodities*).
- Modelos com um único objetivo (determinação de mínimo custo ou localização) ou com múltiplos objetivos (determinação de mínimo custo e maximização da demanda coberta).

- Modelos de localização capacitados ou não-capacitados: Os modelos de localização (cobertura, medianos e centrais) tratam a localização como um problema não-capacitado ou com capacidade ilimitada (*uncapacitated location model*). Entretanto, existem modelos que já impõem esse limite ou tamanho da capacidade nas restrições ao modelo (*capacitated facility location model*).

Existem, entretanto, inúmeros fatores que têm interferido na decisão locacional, além de fatores referentes unicamente à minimização de distância e custo. Wu e Wu (1983), Badri e Davis (1995), Canel e Khumawala (1996), Heizer (1999), Hoffman e Schniederjans(1994), Alberto (2000) e Lirn, et al. (2003) atribuem os principais fatores qualitativos que interferem na decisão locacional:

- Localização dos mercados fornecedores e consumidores;
- Disponibilidade e custos de mão-de-obra, serviços de comunicação, saúde, energia e segurança;
- Taxa de câmbio e barreiras comerciais;
- Regulamentação de impacto ambiental;
- Grau de organização sindical;
- Disponibilidade e custos de serviços públicos;
- Facilidades para o sistema de transporte;
- Custos de instalação, operação e transporte;
- Localização dos concorrentes;
- Clima e temperatura da região;
- Incentivos governamentais;

Dentro destes fatores, destaquem-se os incentivos governamentais dados pelos governos a empresas que desejem investir nas localidades, objetivando um melhor desenvolvimento econômico da região, geração de empregos e o aumento da potencialidade da arrecadação tributária no longo prazo. Alberto (2000), baseado no *Conway Data Global Survey of Development Organization,* cita que os incentivos fiscais são hoje um dos cinco principais fatores de decisão locacional perante os executivos. Ratificando este fato, o trabalho de Nicolay (2003) *apud* Nazário (2001), reforça a idéia de que os incentivos governamentais são um dos principais fatores de decisão locacional e têm gerado disputas (Guerra Fiscal) entre estados e municípios no Brasil, objetivando inicialmente a instalação da empresa e no longo prazo a possibilidade de aquisição de maior fatia de impostos.

O modelo a ser discutido nesta tese baseia-se no modelo de *transshipment* (transbordo), combinado com o modelo de localização de plantas capacitadas, aplicado à localização de plataformas logísticas portuárias ou terminais especializados que utilizam uma cadeia de suprimentos rumo à exportação. Esse problema, segundo a taxonomia e a literatura anteriormente apresentadas, caracteriza-se como um modelo de rede, discreto, determinístico, aplicado a múltiplos produtos e com restrições de capacidade. Apesar de se saber que as variáveis qualitativas interferem nas decisões de localização, principalmente no tocante aos incentivos fiscais dados à implantação do investimento em localização de instalações no Brasil, esta tese se baseará única e exclusivamente no modelo quantitativo, em virtude das limitações de informações e da dificuldade de mensuração e adição destas variáveis qualitativas ao modelo.

4.3

Problema de localização de plantas capacitadas *(The capacitated plant location problem)*

Segundo Sridharan(1995), a localização de unidades logísticas, como armazéns e fábricas, é inevitavelmente, uma decisão estratégica para a maioria das organizações. Esses problemas de localização têm sido amplamente estudados na literatura com o nome de problemas de localização de plantas, armazéns, instalações ou facilidades. Quando uma potencial planta tem uma capacidade, isto é, um limite superior de capacidade de atendimento, o problema passa a ser denominado problema de localização de plantas capacitadas *(Capacitated Plant Location Problem – CPLP).* Quando a restrição de capacidade não é assumida, tem-se então um problema de localização de plantas sem restrição de capacidade *(Simple Plant Location Problem – SPLP)*. Brandeau e Chiu (1989) dizem que *The simple plant location problem (*problema de localização de plantas*)* é uma versão particular do problema de localização de armazéns pelo qual se busca selecionar um número de localizações não determinado, proveniente de um número finito de potenciais localizações pré-selecionadas, que minimize o custo fixo de instalar o serviço, acrescido do custo variável da operação.

A esse conjunto de problemas de localização de plantas capacitadas e não-capacitadas dá-se a denominação de problemas de localização de instalações com custos fixos *(Fixed charge facility location problems*).

A primeira formulação do problema de localização de plantas sem restrição de capacidade foi atribuída a Balinski (1965) *apud* (Harkeness; ReVelle, 2003). Posteriormente, o estudo foi re-analisado por ReVelle *et.al.* (1970), Eilon *et.al. (*1971) e Pruzan (1978), citados por Krarup e Pruzan (1983), entre outros. Esses mesmos autores fizeram uma revisão, síntese e proposição de algoritmos para solucionar o problema.

O problema de localização de plantas capacitadas consiste em considerar um conjunto *J = {1,...n}* de potenciais localizações para plantas, com custos fixos f_j associados com a planta, com capacidades s_j de atendimento e um conjunto *I = {1,....m}* de clientes, onde c_{ij} representa o custo total de transporte da planta *j* para o cliente *i* e d_i a demanda do cliente *i*. Portanto, os parâmetros dados consistem em c_{ij}, d_i, s_j, *e* f_j . As variáveis de decisão são:

x_{ij} representando a fração da demanda do consumidor *i*, fornecida pela planta *j* e

$y_j = 0$ representando a planta fechada ou

$y_j = 1$ representando a planta aberta.

O problema consiste em descobrir um subconjunto de plantas que minimize o custo total de transporte e que satisfaça toda demanda d_i dentro dos limites de capacidade das plantas s_j. Sridharan (1995) apresenta a seguinte versão do modelo de localização de plantas capacitadas para *n* potenciais plantas e *m* consumidores:

$$Z = Min \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^{n} f_j y_j \qquad (1)$$

sujeito a

$$\sum_{j=1}^{n} x_{ij} = 1, \qquad i = 1,.........m; \qquad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{m} d_i x_{ij} \leq s_j y_j, \qquad j = 1,........n; \qquad (3)$$

$$0 \leq x_{ij} \leq y_j \leq 1, \qquad i = 1,...m; \quad j = 1,....n; \qquad (4)$$

$$y_j = \{0,1\}, \qquad j = 1,...n; \qquad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{n} s_j y_j \geq \sum_{i=1}^{m} d_i \qquad (6)$$

Nesse modelo, a restrição (2) garante que a demanda de cada cliente *i* seja satisfeita; a restrição (3) estabelece que cada planta aberta não forneça mais do que a sua capacidade; a restrição (4) garante que cada fração da demanda x_{ij} esteja entre zero e 1, e os clientes sejam supridos somente por plantas abertas; a restrição (5) define a condição binária da variável y_j, indicando o status de aberto ou fechado; e a restrição (6) especifica que a capacidade total das plantas abertas deve ser no mínimo tão grande quanto a demanda total dos consumidores. Embora esta última restrição seja redundante, pois é derivada das restrições (2) e (3), o autor argumenta sua permanência para fortalecimento do modelo quando a relaxação for empregada. Sridharan (1995) descreve, posteriormente, em seu texto, várias heurísticas para solucionar esse problema. Afirma também que os atuais programas computacionais só resolvem problemas até determinado limite de centenas de plantas e clientes. Fora isso, haverá a necessidade de desenvolver algoritmos especiais ou heurísticas para solucionar esses problemas.

O modelo de Barcelo e Casanovas (1984) possui a mesma função objetivo (1) e restrições (7) e (10). Embora seja anterior ao descrito por Sridharan (1995), estes autores incluem uma restrição importante, limitando o número de plantas a serem abertas. Afirmam que esse é um modelo de programação inteira, onde J = {1,2,....n} representa o conjunto de potenciais localizações de plantas e I = {1,2,.....m}, o conjunto de centros a serem atendidos pelas plantas. c_{ij} representa o custo para satisfazer a demanda do cliente *i,* proveniente da planta *j,* com custos fixos f_j para a abertura da planta b_j. Quanto às demais restrições, a (7) garante que a demanda de cada centro seja satisfeita, a (8) limita o número de K plantas a serem abertas e a (9) tem por objetivo determinar que a demanda somente seja satisfeita por plantas abertas, análoga à restrição (3) do modelo apresentado por Sridharan (1995). A restrição (10) impõe a condição binária da variável de decisão y_j e o fornecimento exclusivo de um único cliente para uma única planta.

$$Min. \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in J} f_j y_j$$

sujeito a

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \qquad \forall i \in I, \qquad (7)$$

$$\sum_{j \in J} y_j \leq K, \qquad (8)$$

$$\sum_{i \in I} d_i x_{ij} \leq b_j y_j, \qquad \forall j \in J \qquad (9)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad y_j \in \{0,1\}, \qquad \forall i \in I \quad e \quad j \in J \qquad (10)$$

As contribuições deste modelo são a inclusão de x_{ij} como variável binária de decisão, estabelecendo-se que $x_{ij} = 1$ para a decisão de fornecer ao centro de consumo *i*, proveniente da planta *j,* e $x_{ij} = 0$, para a decisão contrária; e $y_j = 1$, para representar a decisão de abrir a planta, e $y_j = 0$, para a decisão contrária. Outra contribuição que difere o modelo de Barcelo e Casanovas (1982) do de Sridharan (1995) é o estabelecimento da restrição no número de *K* plantas a serem abertas. Barcelo e Casanovas (1982) destacam que esse tipo de problema só se tornará viável se, e somente se, a condição de capacidade b_j superior à demanda d_i for atendida, ambas presentes nos modelos dos autores citados (restrições 3 e 9, respectivamente).

Revelle e Laporte (1996) concordam que existem importantes problemas ainda não investigados a respeito do tema localização de instalações. Esses autores fazem sua análise, tomando por base o modelo de localização de plantas não-capacitadas, e investigam outros modelos de localização de plantas capacitadas, considerando a inclusão de custos de produção, capacidade de instalação, múltiplos produtos e múltiplas máquinas.

Os modelos de localização de plantas com custos fixos (capacitados ou não), segundo Nozick (2001), têm apresentado inúmeras aplicações, entre elas as que dizem respeito à localização de plataformas *off-shore* (Ballas; Padberg, 1976), visando à identificação de localizações para contas do sistema bancário (Cornuejols *et.al.,*1977) e de localização de centros de distribuição (Nozick; Turnquist, 1998). Posteriormente, Mirchandani e Francis (1990) e Daskin (1995) pesquisaram algumas metodologias para a solução deste tipo de problema. Nozick (2001) tomou por base estes modelos e mais tarde investigou o problema de localização de facilidades com restrições de cobertura às demandas a serem atendidas.

A maioria das pesquisas sobre o assunto localização de plantas capacitadas tem foco no desenvolvimento de eficientes soluções algorítmicas. Nessas pesquisas se incluem, segundo Melkote e Daskin (2001), os trabalhos com algorítmos *branch and bound* (Akinc; Khumawala, 1977), relaxação lagrangeana (Cristophides; Beasley, 1983 e Barcelo; Casanovas,1982), métodos de base dual (Guignard; Spielberg, 1979 e Jacobsen, 1983), além da investigação do modelo de localização de plantas capacitadas com demandas estocásticas, atribuído a Laporte *et. al* (1994).

O estudo de problemas de localização de plantas capacitadas para *multi-commodities* passa a ser uma variação dos modelos mencionados acima, cuja apresentação e análise serão feitas na seção a seguir.

4.4

Problema de localização de plantas capacitadas para múltiplos produtos (*multi-commodity facility location problem).*

O problema de localização de plantas *multi-commodity* foi introduzido por Warszawski (1973) *apud* Karkasis; Boffey (1981) para o caso de instalações que necessitavam operar com vários produtos. Esses autores analisaram, ampliaram o modelo original e desenvolveram os métodos de base dual e o método lagrangeano para a solução desses problemas. O modelo de minimização de custos pode ser assim descrito:

i índice de plantas

j índice de consumidores

r índice de commodities

$$Min. \sum_{r=1}^{w}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} c_{ij}^{r} x_{ij}^{r} + \sum_{r=1}^{w}\sum_{i=1}^{n} g_{i}^{r} y_{i}^{r} \qquad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{ij}^{r} \geq 1 \qquad \forall \quad r, j \qquad (12)$$

$$\sum_{r=1}^{w} y_{i}^{r} \leq 1 \qquad \forall \quad i \qquad (13)$$

$$y_{i}^{r} - x_{ij}^{r} \geq 0 \qquad \forall \quad r, i, j \qquad (14)$$

$$x_{ij}^{r}, y_{i}^{r} = 0,1 \qquad \forall \quad r, i, j \qquad (15)$$

Onde os parâmetros são:

c^{r}_{ij} custo de transporte da planta *i* para o consumidor *j,* transportando a *commodity r*

g^r_i custo fixo do estabelecimento de uma planta no local *i,* transportando a *commodity* do tipo *r*

E as variáveis de decisão são:

$$x^r_{ij} \begin{cases} 1, \text{ se o cliente } j \text{ é fornecido pela origem } i \text{ com a } commodity \text{ r ;} \\ 0, \text{ caso contrário;} \end{cases}$$

$$y^r_i \begin{cases} 1, \text{ se existe uma planta } i \text{ para fornecer a } commodity\ r; \\ 0, \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

A restrição (12) garante a existência de no mínimo uma planta *i* fornecendo a *commodity r* para o cliente *j*, enquanto a equação (13) restringe a abertura de apenas 1 planta *i* para cada *commodity r,* e a restrição (14) somente envia a *commodity r* da origem *i* a produz para o destino *j* e a restrição (15) garante a utilização de variáveis binárias ao modelo.

Geoffrion e Graves (1974) analisam também a distribuição de *multi-commodities* produzidas por várias plantas com capacidades de produção diferentes. Existe uma demanda conhecida para cada *commodity* de cada uma das zonas consumidoras. Essa demanda é satisfeita por embarques via centros de distribuição (CD), e cada zona é atendida exclusivamente por um único CD. Existe também um limite mínimo e máximo de atendimento total anual para cada CD. O objetivo do modelo é determinar o mínimo custo total de distribuição, estabelecendo qual(ais) centro(s) de distribuição usar, que tamanho devem ter e quais clientes devem ser servidos por esses centros. O modelo, os parâmetros e as variáveis de decisão são apresentados a seguir:

i índice de *commodities*

j índice de plantas

k índice de potenciais CDs

l índice de zonas de demanda de consumidores

Parâmetros:

D_{il} demanda pela *commodity i* na zona de clientes *l*

$\underline{V}_k$, $\overline{V}_k$ volume total mínimo e máximo permitido, passando pelo CD instalado em k

f_k custos fixos para instalar um centro de distribuição em k

v_k custos variáveis de um centro de distribuição situado em k

C_{ijkl} custo unitário médio de produção e embarque da *commodity i* da planta *j*, via centro de distribuição *k*, para os clientes da zona *l*

X_{ijkl} variável que determina o montante de *commodity i* embarcado da planta *j*, via CD *k*, para clientes da zona *l*.

Variáveis de decisão:

$$y_{kl} \begin{cases} 1, \text{ se o centro de distribuição } k \text{ serve aos clientes da zona } l \\ 0, \text{ caso contrário;} \end{cases}$$

$$Z_k \begin{cases} 1, \text{ se o centro de distribuição } k \text{ será aberto;} \\ 0, \text{ caso contrário;} \end{cases}$$

$$Min.\sum_{ijkl} C_{ijkl} X_{ijkl} + \sum_{k}\left[f_k Z_k + v_k \sum_{il} D_{il} y_{kl} \right] \qquad (16)$$

$$\sum_{kl} X_{ijkl} \le S_{ij} \qquad \forall ij \qquad (17)$$

$$\sum_{j} X_{ijkl} = D_{il} y_{kl} \qquad \forall ikl \qquad (18)$$

$$\sum_{k} y_{kl} = 1 \qquad \forall l \qquad (19)$$

$$\underline{V}_v Z_k \le \sum_{il} D_{il} y_{kl} \le \overline{V}_k Z_k \qquad \forall k \qquad (20)$$

$$Y_{kl} \in \{0,1\} \quad e \quad Z_k \in \{0,1\} \qquad (21)$$

A restrição (17) assegura que toda a quantidade de *commodity i* embarcada da planta *j* e recebida no CD *k* com destino à zona *l*, tem que ser menor ou igual do que a quantidade da *commodity i* fornecida ou ofertada pela planta *j*. A restrição (18) garante que a quantidade embarcada de todas as plantas *j* para o CD *k* será igual à demandada em *l*. A restrição (19) garante que somente um CD *k* servirá aos clientes da zona *l*. Por fim, a restrição (20) determina que haja um limite inferior e superior anual de volume, passando pelo centro de distribuição. A restrição (21) garante a condição binária das variáveis Y_{kl} e Z_k. Geoffrion *et.al* (1974) descrevem todo o modelo para uma cadeia alimentícia com dezessete classes de *commodities*, quatorze plantas, quarenta e cinco possíveis CD e 121 zonas de clientes, utilizando o método de decomposição de Bender. Posteriormente, Love *et al.*(1988) fizeram uma revisão desse problema, aplicando-o a um novo sistema de distribuição.

Várias aplicações desse problema têm sido desenvolvidas ao longo dos anos dada a variedade de soluções computacionais possíveis. Nesses aspectos, destacam-se Brown (1987) que utilizou o modelo de *multi-*

commmodity para gerenciar um problema que envolvia a seleção de instalações (10 - 20 plantas), a localização e utilização de equipamentos dentro da firma, a manufatura e distribuição de múltiplos produtos (100 – 200 grupos de produtos) para uma cadeia multinacional produtora de alimentos.

As principais referências e trabalhos encontrados quanto ao problema de *multi-commodity facility location* no ambiente de rede (*network*) são de Hu (1963), Ahuja (1993), Crainic *et. al* (1986, *apud* Gendron,B. 1999), além de Goldberg *et al* .(1997, *apud* Scott, 2005), com inúmeras aplicações na área de logística e transportes. Destaque deve ser dado também ao trabalho de Pirkul e Jayaraman (1998), que desenvolveram uma formulação denominada PLANWAR, com vistas à minimização de custos totais para *multi-commodities,* múltiplas plantas, múltiplos CD, sujeitos às restrições de limitação de capacidade das plantas e dos armazéns.

Revistas as principais obras referentes ao modelo de localização de plantas capacitadas para simples e múltiplos produtos, cabe analisar a seguir o problema de *transshipment (transbordo).* Esse assunto fundamentará a construção do modelo de *multi-commodity, multi-facility location and transshipment model* (múltiplos produtos, múltiplas facilidades e modelo de transbordo) que será aplicado a plataformas logísticas portuárias, funcionando como terminais de transbordo de produtos exportáveis da cadeia produtiva brasileira, apresentado na Seção 5.

4.5

O problema do transbordo - *The transshipment problem*

The Transshipment Problem (TSP) ou o problema de transbordo é uma versão modificada do problema de transporte (Hiller; Lieberman,1986 e Winston,2004), no qual bens e serviços são permitidos passar por pontos intermediários de transbordo, provenientes de uma fonte original, a um destino final (Sharma *et al.*,2003). O modelo advém do estudo de Orden (1956).

A ação de transbordar a carga em um ponto intermediário (ponto de transbordo) tem grande relevância nos estudos logísticos, em função das análises de localização, agregação de valor ao produto, redução de custos, entre outros. Como o conceito de plataforma logística ou terminal especializado se assemelha ao conceito de uma instalação de transbordo, a partir deste momento, utilizar-se-á neste estudo o conceito de plataforma/terminal especializado como ponto de transbordo de cargas, podendo nele ser efetuada agregação ou não de valor e/ou volume de produto. A Figura 7 exemplifica o conceito de plataforma logística ou terminal especializado como ponto de transbordo.

Matisziw (2005) argumenta que a meta de um problema de transbordo é alocar o fluxo de carga (*commodities*, por exemplo) proveniente de um conjunto de pontos de origem para um conjunto de pontos de destino, via facilidades intermediárias. Essas facilidades podem ser dedicadas à transferência (entre modais de transporte, entre diferentes tipos de veículos ou embarcadores). Nesse contexto, objetiva-se ampliar o conceito para que uma plataforma logística possa funcionar como um terminal de transbordo, e assim realizar serviços de armazenamento, manufatura, *merge in transit* (fusão ou beneficiamento em trânsito), *postponement* (postergação de fases finais de produção), ou qualquer serviço logístico agregador de valor.

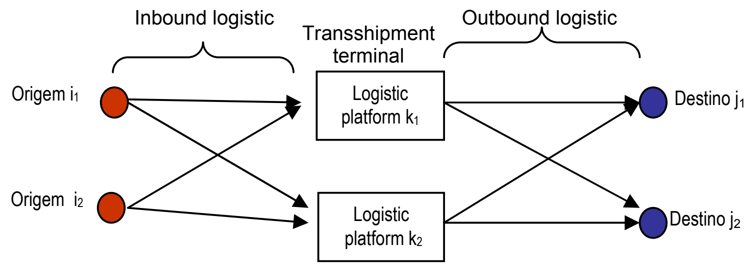

Figura 7 : Rede representando o problema de transbordo (*The transshipment problem)*

O problema de *transshipment* pode ser assim descrito:

i índice de pontos de fornecimento – origens

j índice de pontos de demanda – destinos

k índice de pontos de transbordo

Parâmetros:

c_{ij} custo de movimentação entre a localização de origem i e a localização de demanda j

s_i quantidade ofertada na origem i

d_j quantidade demandada no destino j

Variável de decisão:

x_{ij} fluxo alocado da origem i com destino a j

$$Minimizar \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}x_{ij}$$

$$sujeito \quad a$$

$$\sum_j x_{ij} = s_i \qquad \forall i \qquad (22)$$

$$\sum_i x_{ij} = d_j \qquad \forall j \qquad (23)$$

$$\sum_i s_i = \sum_j d_j \qquad \forall i, j \qquad (23.1)$$

$$\sum_i x_{ik} - \sum_j x_{kj} = 0 \quad \forall k \qquad (24)$$

$$x_{ij} \geq 0 \qquad \forall i, j \qquad (25)$$

O objetivo é minimizar o custo total de transporte entre um ponto de origem *i* e o ponto de destino *j*, passando por uma instalação intermediária *k* e designando as quantidades transportadas entre esses pontos. A restrição (22) assegura que a origem *i* despacha toda a sua oferta. A restrição (23) assegura que a demanda do destino *j* seja satisfeita e a restrição (23.1) assegura que o total fornecido em *i* seja igual ao total demandado em *j.* A restrição (24), denominada de equação de conservação de fluxo, representa o equilíbrio entre toda a quantidade que chega ao ponto de transbordo *k* e dali sai. Finalmente, a restrição (25) indica que toda a alocação de fluxo deve ser não-negativa. (Matisziw, 2005; Hiller e Lieberman, 1986 e Winston, 2004)

Supõe-se que descontos associados ao aumento do volume de carga não se aplicam a esse modelo e admite-se também que oferta e demanda são fixas e não existe competição entre as fontes de origem ou entre demandas no destino. (Taafee *et.al.* 1996, *apud* Matisziw,2005)

Anderson (1985) menciona que nesse tipo de problema podem existir limitações de capacidades de embarque nos links (limitações de capacidade do veículo, por exemplo). Para esses casos, devem ser adicionadas restrições, determinando o limite superior de capacidade (*upper bound)* na rota. A esse tipo de problema, dá-se o nome de "*The capacitated transshipment problem* (problema de transbordo capacitado)".

Vários autores têm trabalhado ao longo dos anos aplicando o modelo de *transshipment* com muitos objetivos. Campbell (1993) contribuiu criando um modelo analítico de distribuição de uma simples origem para muitos destinos, utilizando terminais de transbordo. Sharma *et al. (*2003) estudaram o problema de *transshipmet* aplicando a metodologia de *goal programming* para o gerenciamento de problemas de tomada de decisão em refinarias. No mesmo período, Lirn *et al.* (2003) utilizaram a técnica de *Analytic Hierarchy Process - AHP* como critério de tomada de decisão para seleção de um porto de *transshipment* em Taiwan e Matisziw (2005) estudou recentemente um modelo de *transshipment* ampliado para minimizar custo de transporte de cargas rodoviárias que cruzam as fronteiras entre o México, os EUA e o Canadá, bem como seus impactos sobre a rede. Portanto, o modelo de *transshipment* (transbordo) tem sido utilizado ao longo dos anos na solução de problemas de transporte e na tomada de decisão estratégica, como base de inúmeras metodologias.