

MODELO PARA LOCALIZAÇÃO DE HUBS NO TRANSPORTE DE ENCOMENDAS EXPRESSAS

Marco Antonio Brinati

Javier Antonio Timaná Alamo

Programa de Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

A rede de distribuição física do transporte de encomendas expressas se caracteriza por ser de tipo *hub-and-spoke*, formada por terminais de consolidação (*hubs*) e instalações físicas intermediárias (lojas, agências, centros operacionais) alocadas a cada *hub*. Na presente pesquisa de mestrado em andamento, pretende-se desenvolver um procedimento que permita determinar o número e a localização dos *hubs*, a alocação das instalações físicas intermediárias aos *hubs* e os roteiros de transporte de carga entre cada par origem-destino, tendo como objetivo a minimização do custo total da rede e considerando, de forma indireta, o cumprimento do prazo de entrega da carga. Propõe-se um modelo de programação linear inteira para projetar uma rede de distribuição constituída por um *hub principal* e um conjunto de *mini-hubs* regionais. A rede *hub-and-spoke* proposta é de tipo alocação múltipla; em que cada nó secundário está conectado a um *mini-hub*, para interagir com os nós da sua região, e conectado a um *hub principal*, para interagir com os nós das demais regiões; de modo que no transporte da carga entre cada par origem-destino se utilizem rotas que tenham como máximo uma parada intermediária.

ABSTRACT

The distribution network for an express package delivery system is characterized by a hub-and-spoke type, formed by consolidation terminals (*hubs*) and intermediate physical facilities (stores, agencies, operational centers) allocated in each hub. The current Master's Degree research intends to develop a procedure that can determine the number and position of the hubs, the allocation of the intermediate physical facilities for the hubs and the routes of freight transportation between each origin-destination pair, aiming the decrease of the total cost and, indirectly, considering to fulfill the load time delivery. We propose a integer linear programming model to project a distribution network composed of a major hub and a set of regional mini-hubs. The proposed hub-and-spoke network is of a multiple allocation type; in which every secondary node is connected to a mini-hub, to interact with its region's nodes, and connected to a major hub, to interact with the other region's nodes, in a way that the freight transportation between each origin-destination pair should take routes which have at most one intermediate stop.

1. INTRODUÇÃO

Nestes últimos anos o setor de encomendas expressas no Brasil está em uma fase de crescimento em virtude do aumento de envio de encomendas no mercado interno e à exportação de produtos de baixo peso. Além disso, os usuários do sistema tornaram-se cada vez mais exigentes quanto a um serviço que seja barato, rápido, seguro e que cumpra com os prazos de entrega oferecidos.

A carga transportada pelo serviço de encomendas expressas abrange documentos, amostras, catálogos, produtos vendidos pela internet, peças de reposição e pacotes de pequeno volume a serem entregues em um prazo de tempo determinado. Esse tipo de serviço engloba as operações de coleta na origem, transferência da carga até terminais intermediários, consolidação com outras cargas de diversas origens e diversos destinos, classificação, desconsolidação e a entrega no destino.

Os sistemas de entrega de carga expressa trabalham com o conceito de que o tempo de entrega oferecido ao cliente (geralmente dentro de um ou dois dias) tem que ser garantido; em consequência, as restrições de tempo são de interesse primordial no momento de projetar sua rede de distribuição. Além disso, a tarefa de classificar os pacotes em terminais de carga

intermediários implica um consumo de tempo; por este motivo, é preciso diminuir o número de paradas desnecessárias nestes terminais ou evitar múltiplas classificações.

A configuração da rede de distribuição física das empresas do segmento de carga expressa é do tipo *hub-and-spoke*, formada por um conjunto de nós (lojas, agências, terminais de carga) ligados por arcos (vias de transporte) que interagem na forma de muitas origens e muitos destinos em que:

- a cada par de nós origem-destino está associado uma demanda de transporte não negativa;
- há um conjunto de nós principais situados, geralmente, na parte central denominados *hubs*, e um conjunto de nós secundários ao redor deles, denominados *spokes*;
- cada nó secundário (*spoke*) estão conectado a um ou mais nós principais (*hubs*), e por sua vez, os *hubs* estão completamente interconectados;
- os *hubs* servem como pontos de transbordo ou como pontos de conexão para o fluxo entre os nós secundários, permitindo, desta maneira, substituir uma grande quantidade de conexões diretas entre todos os nós da rede por uma menor quantidade de conexões indiretas;
- a demanda de transporte entre um nó origem e um nó destino tem que ser movimentada ao longo de uma rota que atravessa pelo menos um *hub*. Desta maneira, os *hubs* constituem pontos intermediários de parada obrigatória nas rotas que saem de nós origens e chegam a nós destinos;
- entre cada par origem-destino existe um custo de transporte baseado em fatores tais como o tempo de percurso e/ou sua distância entre estes nós.

A vantagem de usar uma rede *hub-and-spoke* é a obtenção de um benefício pelo volume de tráfego procedente de diferentes origens que chega e concentra-se em um *hub*, antes de ser enviado até um destino final. Esta consolidação de fluxos permite alcançar ganhos de escala (medida através de um fator de desconto α) que influem no custo de transporte das conexões que interligam os *hubs*. Desta maneira, aproveita-se a oportunidade para usar veículos de transporte de maior capacidade para o transporte da carga entre os *hubs*, reduzindo, consideravelmente, o custo por tonelada – milha. Assim, com a utilização de *hubs*, consegue-se reduzir o custo total de transporte na rede, mas há aumento da distancia percorrida por uma encomenda, já que ela passa por um ou mais *hubs*.

A maioria dos estudos sobre localização-alocação de *hubs* formulados até o momento, estiveram voltados para o transporte aéreo de passageiros, existindo um número bastante limitado de modelos matemáticos aplicados a sistemas de transporte de carga expressa. Além disto, os modelos tradicionais têm suas limitações: concentram sua atenção na minimização do custo total da rede sem levar em conta o nível de serviço desejado pelos usuários do sistema, adotam um mesmo valor do fator de desconto (α) para todos os arcos que interligam os *hubs* e consideram rotas de distribuição com mais de uma parada intermediária.

Assim, pretende-se, nesta pesquisa de mestrado em andamento, propor uma configuração de rede de distribuição física que represente de uma forma mais real e simplificada o comportamento operacional de um sistema de transporte de carga expressa e proporcionar uma ferramenta para a toma de decisões de caráter estratégico.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O trabalho de dissertação em andamento pretende resolver o problema de localização-alocação de *hubs* para um sistema de transporte de encomendas expressas envolvendo as seguintes decisões:

- A partir de um conjunto de locais candidatos, determinar quantas e quais destas instalações logísticas deverão ser *hubs*?
- Quais instalações físicas restantes serão alocadas a cada *hub* com o objetivo de obter uma rede de distribuição de mínimo custo e um bom nível de serviço?
- Qual será o roteiro utilizado para movimentar as encomendas expressas entre cada par origem-destino?
- Será possível projetar uma rede de distribuição física restringindo o número de paradas?

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA DA MODELAGEM

Existem dois tipos básicos de redes *hub-and-spoke*, diferenciando-se na maneira como os nós secundários (*spokes*) estão conectados aos nós principais (*hubs*). No primeiro tipo de rede (figura 1) denominado de *Alocação Única* (*Single Allocation*), cada nó secundário está conectado a um único hub, assim, todo o fluxo de carga que sai ou chega ao nó tem que passar sempre pelo mesmo hub, a ele alocado. No segundo tipo de rede (figura 2) denominado de *Alocação Múltipla* (*Multiple Allocation*), cada nó secundário está conectado a mais de um *hub*, incrementando-se, desta maneira, o número das ligações na rede.

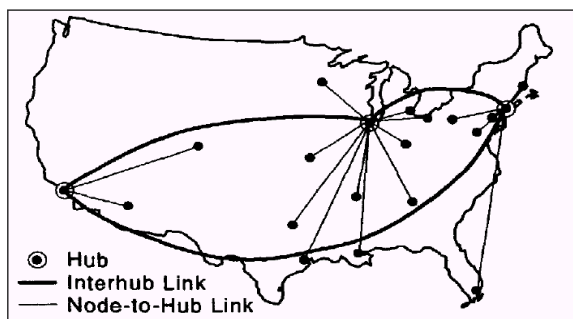


Figura 1: Rede *hub-and-spoke* de Alocação Única (*Single Allocation*)

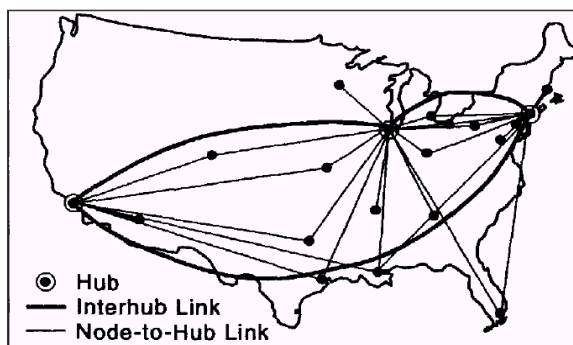


Figura 2: Rede *hub-and-spoke* de Alocação Múltipla (*Multiple Allocation*)

A partir das revisões bibliográficas feitas por Campbell (1994), O'Kelly e Miller (1994), Bryan e O'Kelly (1999), foi possível organizar o crescente número de pesquisas científicas desenvolvidas ao longo destes últimos anos sobre modelagem de localização-alocação de *hubs*, suas aplicações, métodos de resolução exatos e heurísticos, possibilitando sua classificação de acordo com a Tabela 1

Tabela 1: Classificação dos Modelos de localização de *hubs*

Classe Modelos	Sub-classes	Versão	Autor	Aplicação	Foco
Localização de hubs não capacitados	Alocação única	Quadrática	O' Kelly (1987)	Localização de terminais para transporte de passageiros e carga	Custo total da rede
		Linear	Campbell (1994) Skorin-Kapov, Skorin-Kapov e O' Kelly (1996) Ernst e Krishnamoorthy (1996)		
	Alocação múltipla	Linear	Campbell (1994) Skorin-Kapov, Skorin-Kapov e O' Kelly (1996) Ernst e Krishnamoorthy (1998)		
			Ernst e Krishnamoorthy (1999)		
Localização de hubs capacitados	Alocação única		O' Kelly e Bryan (1998)		
Modelo Flow Loc	Alocação múltipla				
Hub Center			Campbell (1994) Kara e Tansel (2000)	Localização de bases de serviço de emergência	Tempo de atendimento
Hub Covering			Campbell (1994) Kara e Tansel (1999)		
Posições fixas de hubs		Conexões diretas	Jeng (1987) Miller (1990) Flynn e Ratick (1988)	Transporte aéreo de passageiros e carga	Custo total da rede
		Stopovers e feederes	Kuby e Gray (1993)		
		Maximizar lucros	Daskin e Panayotopoulos (1989) Dobson e Lederer (1993)		
		congestionamento	Grove e O' Kelly (1986)		
		hubs principais e mini-hubs	Hall (1989) O' Kelly e Lao (1991)		
Hub principal e mini-hubs			O' Kelly (1998)	Sistemas de carga expressa	Custo rede + tempo entrega

Fonte: elaboração dos próprios autores

O primeiro grupo de modelos contempla formulações que não impõem restrições com relação ao fluxo entre nós secundários e *hubs*, não limitam a quantidade de nós secundários alocados a um *hub*, nem consideram restrições de capacidade das instalações físicas.

O segundo grupo de modelos engloba formulações matemáticas que impõem restrições da capacidade de carga movimentada pelos hubs. Um problema de localização deste tipo é mais difícil de resolver, por envolver, geralmente, um maior número de restrições.

No terceiro grupo de modelos estão aquelas formulações que refletem melhor a realidade dos ganhos de escala obtidos pela consolidação do fluxo nos *hubs*, ao considerar que a função

custo transporte nas conexões que interligam os *hubs* depende da quantidade do fluxo que passa por essas conexões.

O quarto grupo de modelos se caracteriza por focalizar sua atenção no tempo de atendimento, estabelecendo uma função objetivo que visa minimizar o máximo tempo de viagem por uma rota que sai de um nó origem, passa por pelo menos um *hub* e chega a um nó destino.

O quinto grupo de modelos se rege pelo princípio de que as demandas dos diversos pontos da rede são cobertas, se as instalações que funcionam como *hubs* forem localizadas suficientemente próximas dos pontos da rede de modo a atendê-los de acordo com uns níveis de serviço pré-especificados.

O sexto grupo de modelos envolve formulações simplificadas, considerando posições fixas de *hubs* e acrescentando diversas extensões que influem sobre a etapa de alocação. Entre as variantes englobadas aparecem: o uso de conexões diretas entre nós secundários, o projeto de redes em que os lucros devem ser maximizados, a presença de congestionamento nos *hubs*.

O sétimo e último grupo de modelos é uma variante da configuração de uma rede pura *hub-and-spoke* com aplicação em redes de entrega expressa de pacotes. Este grupo de modelos propõe instalações concentradoras principais e regionais, de diferentes raios de cobertura, que restringem a distância percorrida por cada pacote dentre da rede.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da revisão bibliográfica, conclui-se que o modelo que representa mais adequadamente o problema objeto desta pesquisa é aquela formulação matemática pertencente à última classe de abordagens e que foi proposta por O'Kelly (1998).

O'Kelly propôs um projeto de rede tipo *hub-and-spoke* de alocação múltipla em que as interações entre nós utilizam uma rota com uma única parada. Na configuração proposta, cada nó está conectado a um *mini-hub* para interagir com aqueles nós da sua região, enquanto todos os nós da rede estão conectados a um único *hub principal* para poder interagir com os nós das restantes zonas. Além, entre o *hub principal* e os *mini-hubs* não existe nenhuma conexão.

O modelo de O'Kelly é difícil de resolver porque requer forçosamente de variáveis binárias, e os resultados computacionais obtidos pelo autor, mostraram que para determinados pares de interação surgem uns alocações “caros” devido a que regra de designação obriga a determinados pares origem-destino a seguir interagindo através do *mini-hub*, mesmo se existisse uma rota mais barata via o *hub principal*.

Pretende-se introduzir modificações no modelo proposto por O'Kelly e, posteriormente, aplica-lo a um caso real. Dada a natureza combinatória do problema, sabe-se que sua resolução nos casos de grande porte envolve um grande número de variáveis binárias e haverá muita dificuldade em obter uma solução exata. Para problemas de menor porte, pretende-se resolver o modelo utilizando o solver CPLEX em conjunto com a linguagem de modelagem GAMS. Para problemas de maior porte, pretende-se desenvolver um procedimento heurístico que seja capaz de gerar uma boa solução dentro de um tempo de processamento aceitável.

Uma análise de sensibilidade permitirá conhecer os impactos das variações dos parâmetros do sistema sobre as soluções obtidas e, assim, avaliar a robustez dos procedimentos propostos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bryan, D.L. e M.E. O'Kelly. (1999) Hub-and-spoke networks in air transportation: an analytical review. *Journal of Regional Science*, v. 39, n. 2, p. 275-295.
- Campbell, J. F. (1994) Integer programming formulations of discrete hub location problems. *European Journal of Operational Research*, n. 72, p. 387-405
- Daskin, M. S. e N. D. Panayotopoulos. (1989) A Lagrangian Relaxation Approach to Assigning Aircraft to Routes in Hub-and-Spoke Networks. *Transportation Science*, v23, p. 91-99.
- Dobson, G. e P. J. Lederer. (1993) Airline Scheduling and Routing in a Hub-and-Spoke System. *Transportation Science*, v27, p. 281-297.
- Ernst, A. e M. Krishnamoorthy. (1996) Efficient algorithms for the uncapacitated single allocation p-hub median problem. *Location Science*, v. 4, n. 3, p. 139-154.
- Ernst, A. e M. Krishnamoorthy. (1998) Exact and heuristic algorithms for the uncapacitated multiple allocation p-hub median problem. *European Journal of Operational Research*, n. 104, p. 100-112.
- Ernst, A. e M. Krishnamoorthy. (1999) Solution algorithms for the capacitated single allocation hub location problem. *Annals of Operational Research*, n. 86, p. 141-159.
- Flynn, J. e S. Ratick. (1988) A Multiobjective Hierarchical Covering Model for the Essential Air Services Program. *Transportation Science*, v 22, p. 139-147.
- Grove, P. G. e M. E. O'Kelly. (1986) Hub Networks and Simulated Schedule Delay. *Papers of the Regional Science Association*, v.59, p.103-119.
- Hall, R.W. (1989) Configuration of an overnight package air network. *Transportation Research A*, v. 23, p. 139-149.
- Jeng, Chawn-Yaw. (1987) Routing Strategies for an Idealized Airline Network. Unpublished Ph.D dissertation, University of California-Berkeley.
- Kara,B.Y. e B.C. Tansel. (1999) On the hub covering problem. Technical report IE-OR 9901, Bilkent University, Department of Industrial Engineering, 06533, Bilkent, Ankara, Turkey.
- Kara,B.Y. e B.C. Tansel. (2000) On the single assignment p-hub center problem. *European Journal of Operational Research*, n. 125, p. 648-655.
- Kuby, M.J. e R. Gray. (1993) The hub network design problem with stopovers and feeders: The case of Federal Express. *Transportation Research A*, n. 27, p. 1-12.
- Miller, H. J. (1990) Route 6: Routing Algorithm for Hub Networks, unpublished manuscript.
- O'Kelly, M.E. (1987) A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*, n. 32, p. 393-404.
- O'Kelly, M. E. (1998) On the allocation of a set of nodes to a minihub in a package delivery network. *Papers in Regional Science: The Journal of the Regional Science Association International*, v.77, n. 1. p. 77-99.
- O'Kelly, M.E e D.L Bryan. (1998) Hub location with economies of scale. *Transportation Research B*, v. 32, n. 8, p. 605-616
- O'Kelly, M.E. e Y. Lao. (1991) Mode Choice in a Hub-and-Spoke Network: A Zero-One Linear Programming Approach. *Geographical Analysis*, v 23, p. 283-297.
- O'Kelly, M.E. e H.J. Miller. (1994) The hub network design problem: a review and synthesis. *Journal of Transport Geography*, n. 2, p. 31-40.
- Skorin-Kapov, D.; J. Skorin-Kapov e M.E. O'Kelly. (1996) Tight linear programming relaxations of uncapacitated p-hub median problems. *European Journal of Operational Research*, n. 94, p. 582-593

Endereço dos autores:

Javier Antonio Timaná Álamo

E-mail: javier.alamo@poli.usp.br

Mestrando em Engenharia de Sistemas Logísticos

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Marco Antonio Brinati

E-mail: marco.brinati@poli.usp.br

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo