

Um Modelo de localização/distribuição numa rede logística

Sueli Bacchi Machado

Antonio G. N. Novaes

Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas
UFSC – Florianópolis, SC

RESUMO

A determinação dos locais ótimos para instalação de terminais (depósitos, armazéns) de triagem e distribuição de carga, numa rede logística, é um problema clássico que tem gerado um grande número de trabalhos de pesquisa. No entanto, ao se considerar o custo logístico global, que inclui as despesas de transporte, de triagem, de coleta/entrega e de estoque, a estratégia ótima de distribuição vai variar com o tipo de produto, os fluxos, os tempos, etc. Em alguns casos será mais conveniente efetuar as entregas através de viagens diretas indústrias/consumidor; noutros, a distribuição via depósito se apresentará como a mais adequada.

O modelo apresentado neste trabalho procura resolver simultaneamente: (a) o problema de localizar K terminais numa rede logística; (b) selecionar a estratégia ótima de distribuição para cada par produtor/consumidor, considerando transferência direta ou distribuição consolidada via um dos terminais.

O método heurístico desenvolvido mostrou-se adequado, tendo sido testado em redes diversas, de porte elevado.

1. Introdução

A determinação dos locais ótimos para instalação de terminais (depósitos, armazéns) de triagem e distribuição de carga, numa

rede logística, é um problema clássico que tem gerado um grande número de trabalhos de pesquisa. No entanto, ao se considerar o custo logístico global, que

inclui as despesas de transporte, de triagem, de coleta/entrega e de estoque, a estratégia ótima de distribuição vai variar com o tipo de produto, os fluxos, os tempos, etc. Em alguns casos será mais conveniente efetuar as entregas através de viagens diretas indústrias/consumidor; noutros, a distribuição via depósito se apresentará como a mais adequada.

O modelo apresentado neste trabalho procura resolver simultaneamente: (a) o problema de localizar K terminais numa rede logística; (b) selecionar a estratégia ótima de distribuição para cada par produtor/consumidor, considerando transferência direta ou distribuição consolidada via um dos terminais.

O método heurístico desenvolvido mostrou-se adequado, tendo sido testado em redes diversas, de porte elevado.

O presente trabalho foi elaborado com base em dissertação de mestrado [13] realizada com o apoio financeiro do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e da FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

2. Metodologias Existentes para Resolução do Problema

Para localização dos terminais são conhecidos o método de k medianas, de um lado, e os métodos clássicos em que os deslocamentos podem se dar numa superfície contínua. Em ambos, a função utilizada para avaliação considera que os custos são crescentes com a distância e independem do tamanho do lote.

Para resolução do problema de k medianas podem ser utilizados procedimentos de programação linear [6], [7], “branch and bound” [3], [4], [5], [10], [11], [14], e heurísticos [2], [12], [16]. Nenhum dos procedimentos avalia economias de escala e garante a solução ótima em redes de porte, dentro de razoável tempo de processamento.

Os procedimentos baseados em programação linear conseguem avaliar redes de grande porte. Todavia incorrem em risco de não atingir o ótimo, por falta de convergência e identificação da solução ótima. Esse problema se acentua para os casos de maior interesse, ou seja, para redes com grande número de nós e pequeno número de medianas.

Para eficiência das técnicas de “branch and bound” é de grande importância a qualidade dos limites. A solução ótima é atingida desde que o tempo de

processamento não sofra restrição.

Os procedimentos heurísticos avaliam redes grandes, obtendo soluções próximas à ótima. KHUMAWALA (11) apresentou comprovação entre diversos procedimentos. Foram consideradas redes de até 30 nós e com número de medianas variando de 2 a 28. O método heurístico atingiu o ótimo em todos os casos, à exceção de um. Os procedimentos baseados em programação linear falharam em dois casos. O mais eficiente dentre os modelos baseados em técnicas de "branch and bound" não determinou o ótimo em apenas um caso.

Os métodos clássicos [15] não consideram a rede viária e sim uma superfície contínua sobre a qual se deslocam os veículos. Só podem ser aplicados quando a rede apresenta-se conexa, bem distribuída e densa por toda região. São utilizados na fase de planejamento, tanto a nível urbano quanto regional, exigindo menor volume de dados e menor tempo de processamento. Os resultados são obviamente menos precisos.

BLUMENFELD [1] desenvolveu modelo para a determinação conjunta da estratégia ótima de atendimento e definição do

tamanho do lote. Esse modelo realiza um balanceamento entre custos de transporte e de estoque, desagregando a rede em sub-redes. O custo de transporte é função da distância e independe do tamanho do lote. O modelo é eficiente para avaliar redes com um terminal já localizado.

3. Estudos preliminares

Nesse trabalho é proposto um método heurístico para a definição da estratégia de atendimento mais adequada. Uma estratégia fica determinada através da definição dos seguintes e interdependentes aspectos:

- fluxos de carga nas interligações de diversos mercados consumidores com os centros de produção;
- decisão de implantação de terminal, considerando o número de terminais necessários e sua localização;
- determinação do atendimento para cada destino, considerando atendimento direto ou via terminal;
- levantamento dos custos de transporte, de estoque, de operação do terminal e economias de escala.

Para resolução do problema é necessário preliminarmente serem determinados:

- função custo de transporte;
- possibilidade de restrição de possíveis localizações de terminais na rede;
- procedimento de busca do conjunto ótimo de localização.

Para o estabelecimento do custo devem ser consideradas parcelas referentes ao custo de transporte e ao custo de estoque.

Através de regressão linear, utilizando dados da NTC (Associação Nacional dos Transportadores de Carga), foi obtido o custo de transporte unitário C_{TU} em função das variáveis lote W (em toneladas) e distância d (em km/h):

$$C_{TU} = \left(\frac{k_6}{W} + k_7 \cdot k_8 \times W \right) \times d$$

Os valores de k_6 , k_7 e k_8 são constantes para uma dada velocidade média de operação.

O estoque pode ser representado de três formas diferentes: estoque em trânsito E_t , estoque nos extremos e estoque de reserva E_r , segundo NOVAES [15].

O estoque em trânsito diário E_t que proporciona melhor aproveitamento do lote é:

$$E_t = \frac{W \times T}{t_f} = \frac{Q \times T}{30} = \frac{Q}{30} \times \frac{d}{VEL \times HJ \times 24}$$

com Q sendo a demanda mensal,

W o lote, t_f o intervalo entre remessas, T o tempo de percurso, d a distância, HJ número de horas da jornada de trabalho e VEL a velocidade média de operação.

No produtor e no consumidor o estoque médio é $W/2$, totalizando estoque médio W . Já o estoque de reserva E_r no produtor é uma fração do estoque máximo. Nesse trabalho foi considerado que o estoque de reserva no produtor é igual ao do consumidor, totalizando $2E_r$. O estoque de reserva pode ser expresso como fração α do lote W .

O estoque médio E_d é então:

$$E_d = E_t + W + 2 \times E_r$$

O custo de estoque mensal unitário C_{EU} é:

$$C_{EU} = \frac{P \times R \times 30}{Q} \times E_d = P \times R \times (30 + 60\alpha) \frac{W}{Q} + \frac{P \times R \times d}{VEL \times HJ \times 24}$$

sendo constantes o preço unitário P , a taxa diária de juros R , a velocidade média de operação VEL e a jornada de trabalho HJ .

O custo de estoque mensal unitário C_{EU} é função da variável distância d , do lote W e da demanda mensal Q :

$$C_{EU} = K_9 \times W / Q + K_{10} \times d$$

Para um determinado fluxo tem-se:

$$C_{EU} = K_{11} \times W + K_{10} \times d$$

O custo unitário C_U é dado pela soma dos custos unitários de transporte e de estoque. A função é contínua em relação à variável distância e descontínua em relação ao tamanho do lote. Admitindo que o mercado tem condições de oferecer lotes com mínima diferença de tamanho, o lote pode ser considerado como variável contínua. O ponto de mínimo da função pode ser determinado igualando-se a zero a derivada em relação à variável d , sendo assim determinado o lote ótimo W^* .

Os lotes possíveis apresentam limite superior W_{MAX} e limite inferior W_{MIN} , impostos pela indústria. Para calcular a função custo C_U atribui-se a W o valor de W_{MIN} para distância d inferior a

$$\frac{w_{MIN}^2 \times K_{11}}{K_6 + K_8 \times W_{MIN}^2}$$

para d superior a $\frac{W_{MAX}^2 \times K_{11}}{K_6 + K_8 \times W_{MAX}^2}$.

Para distância no intervalo definido pelos limites anteriores, atribui-se ao lote W o valor W^* .

A função custo unitário C_U para um dado fluxo Q é:

$$C_U = \frac{K_6 \times d}{W} + K_7 \times d - K_8 \times W \times d + K_{11} \times W + K_{10} \times d$$

Os valores obtidos devem ser corrigidos monetariamente, conforme critério apresentado em [13], uma vez que foram utilizados dados referentes ao ano de 1986.

Estabelecida a função custo, faz-se necessário avaliar a possibilidade de restrição de localização. A localização de terminais pode se dar sobre os vértices ou ao longo dos arcos da rede. Há portanto infinitos possíveis locais para instalação de terminais.

HAKIMI [8], [9] demonstrou que, para funções-custo crescentes em relação à variável distância, existe pelo menos um conjunto ótimo de K medianas sobre os vértices da rede. Nessa condição a pesquisa para localização pode ser restrita aos nós da rede.

Demonstra-se que a função custo é crescente em relação a variável distância d , sendo válida a aplicação do teorema de HAKIMI. O universo de busca é restrito aos conjuntos de K elementos constituídos pela combinação dos vértices da rede.

Em redes de grande porte esse universo é ainda muito extenso, apresentando grandes dificuldades para avaliação das estratégias. Há necessidade de ser estabelecido um procedimento mais

restritivo de busca de localizações. O procedimento utilizado é o método heurístico apresentado por LARSON e ODONI [12]. A busca é realizada através da substituição de um dos nós, de modo sistemático.

4. Hipóteses e restrições do modelo

Para o modelo desenvolvido [13] assume-se que:

- a rede não apresenta demanda com grandes desvios em torno da média, sendo todo estudo desenvolvido supondo-se rede determinística;
- a variável lote é discreta e para a determinação do lote ótimo são comparados os custos de transporte utilizando veículos disponíveis no mercado de tamanho imediatamente inferior e imediatamente superior à W^* , assumindo aquele que acarretar menor custo;
- cada centro, consumidor ou interseção, tem seu fornecimento alocado ao produtor mais próximo;
- os produtores apresentam capacidade ilimitada;
- existe um único produto ou uma composição constante de produtos;
- a função custo é crescente em relação à variável distância.

5. Estrutura do modelo

O procedimento a seguir apresentado utiliza critérios simples de decisão, baseando-se no método heurístico de LARSON e ODONI [12] e é de fácil manipulação computacional.

Passo 1: cálculo do custo de atendimento direto de cada consumidor e do atendimento direto da rede: o custo de atendimento direto é atribuído ao valor de referência.

Passo 2: cálculo do custo de atendimento indireto, ou seja, do custo de transporte entre os nós da rede, considerando as distâncias e a demanda de cada consumidor; o número de terminais é 1 e é escolhida a localização a ser avaliada.

Passo 3: cálculo do limite inferior de custo no trecho fornecedor-terminal; para cada consumidor, se o custo indireto somado ao limite for menor que o custo de atendimento direto, o fluxo entre fornecedor e o ponto candidato a mediana é aumentado da demanda correspondente.

Passo 4: com o fluxo determinado é calculado o custo no trecho fornecedor-terminal; para cada consumidor, se esse custo somado ao custo de atendimento indireto for inferior ao custo de atendi-

mento direto, faz-se o ajuste no fluxo correspondente; com esse fluxo reitera-se uma vez, no passo 4.

Passo 5: se o terminal não tiver movimentação, seguir para passo 7.

Passo 6: cálculo do custo entre fornecedor e terminal, considerando os fluxos determinados: é calculado o custo de atendimento para essa localização; se esse custo for inferior ao valor de referência, esse custo é atribuído à referência e a solução incumbente é a alternativa em análise.

Passo 7: verifica nova localização e reitera-se no passo 3 até não haver nó a ser avaliado. Quando essa situação ocorre, imprimem-se os resultados para uma mediana.

Passo 8: incrementa-se o número de terminais: se esse número for superior ao máximo estabelecido, o algoritmo imprime a resposta obtida e encerra a análise.

Passo 9: escolhe nova localização e incrementa o número de interações; se esse número for superior ao máximo estabelecido o algoritmo imprime a resposta obtida e encerra a análise.

Passo 10: para cada localização é feita a seguinte avaliação

dos consumidores em ordem crescente de demanda:

- o fluxo no trecho fornecedor-terminal é incrementado de um valor igual à demanda do consumidor e é calculado o custo nesse trecho;
- escolhe-se para o atendimento do consumidor o terminal que apresenta menor valor da soma do custo indireto e do custo no trecho fornecedor-terminal.

Passo 11: se todos terminais apresentarem movimentação, são recalculados os custos nos trechos fornecedores-terminais; caso contrário voltar ao passo 9.

Passo 12: o atendimento de cada consumidor, avaliado em ordem decrescente de demanda, é atribuído à alternativa que apresentar menor custo; se o atendimento não for direto é atualizado o fluxo no trecho fornecedor-terminal atendente.

Passo 13: se algum terminal não apresentar movimentação, o algoritmo segue para o passo 14; caso contrário, são recalculados os custos nos trechos fornecedores-terminais e o custo total da alternativa. Se o custo total for superior ao valor de referência, segue-se para o passo 14; caso contrário a referência assume o valor do custo total da alternativa,

que passa a ser a nova solução incumbente.

Passo 14: se já foram realizadas todas as substituições indicadas pelo procedimento de LARSON e ODONI [12] sem obtenção de melhores resultados, o algoritmo segue para o passo seguinte; caso contrário voltar ao passo 9.

Passo 15: imprimem-se os resultados, seguindo-se para o passo 8.

6. Avaliação do modelo

O modelo define uma estratégia para minimização do custo logístico total. Todavia, a garantia de ser obtido o ótimo só é atingida mediante a utilização de busca exaustiva, pois não se trata de um método exato. É conveniente efetuar a avaliação dos resultados fornecidos pelo modelo para uma série de casos. Para isso foi elaborado um programa que calcula os custos de todas as possíveis alternativas de atendimento e seleciona as melhores. Esse programa, que é uma busca exaustiva, foi processado e compilado no computador Burroughs 7900 da USP, sendo aplicado em diversas redes aleatórias de pequeno porte. Essas mesmas redes foram avaliadas pelo modelo desenvolvido e os resultados foram comparados.

Foi considerado como ade-

quado o resultado do modelo que apresentou, como solução ótima, uma estratégia com custo superior não mais de 10% acima do custo mínimo. O modelo apresentou resultados adequados para 94% das redes de interesse avaliadas. Uma vez que o método heurístico mostrou-se adequado, foi aplicado em rede de grande porte, com 54 vértices, resultando na respectiva estratégia de atendimento.

7. Conclusões

1. Os modelos de programação linear, de "branch and bound" e heurísticos disponíveis na literatura para localização de terminal em redes não avaliam o custo logístico global.

2. O modelo clássico de localização de terminal em área contínua não é sensível à economia de escala, utiliza custo médio regional e não garante a localização ótima.

3. O método de BLUMENFELD [1] para estabelecimento da estratégia ótima de atendimento determina a localização do terminal e só cumpre o seu objetivo na avaliação de terminal único.

4. O modelo desenvolvido é heurístico, capaz de avaliar redes de grande porte e define todas as

características da estratégia de atendimento.

5. Para o modelo fornecer bons resultados é de fundamental importância que a função custo espelhe adequadamente a realidade.

6. Se o custo apresentar-se crescente em relação a variável distância, a busca para localização dos terminais poderá ser restrita aos nós da rede, sendo viável a aplicação do modelo

7. As principais restrições do modelo são: a exigência de capacidade de produção ilimitada e a existência de produto único ou composição constante de produtos.

8. O modelo desenvolvido considera a rede determinística, não considerando as oscilações estocásticas.

9. A avaliação efetuada indica que os resultados obtidos são adequados para significativa porcentagem dos casos analisados, podendo ser utilizado em redes de grande porte.

8. Referências Bibliográficas

- [1] BLUMENFELD, D. E & BURNS E DELTZ, *Analyzing Trade Offs Between Transportation, Inventory and Production Costs on Freight* Networks, Transportation Research, 19B, 1985.
- [2] EILON, S. & NOVAES, A.G., *Single and Double Vertex Substitution in Heuristic Procedures for the p-Median Problem*, Management Science, vol. 24, Nº 16, 1978.
- [3] EL SHAIEB, A M., *A New Algorithm for Locating Sources Among Destinations*, Management Science, vol. 20, Nº 2, 1973.
- [4] GALVÃO, R.D., *A Dual Bounded Algorithm for the p-Median Problem*, Operations Research, vol. 28, Nº 5, 1979.
- [5] GALVÃO, R.D., *A Graph Theoretical Bound for the p-Median Problem*, European Journal of Operational Research, 6, 1981.
- [6] GALVÃO, R.D., *A Note on Garfinkel, Neebe and Rao's Decomposition for the p-Median Problem*, Transportation Science, vol. 15, nº 3, 1981.
- [7] GARFINKEL, S. & NEEBE & RAO, *An Algorithm for the M-Median Plant Location Problem*, Transportation Science, 8, 1974.
- [8] HAKIMI, S.L., *Optimum Locations of Switching Center and the Absolute Centers and*

- Medians of a Graph*, Operations Research, 12, 1964.
- [9] HAKIMI, S.L., *Optimum Distribution of Switching Centers in a Communication Networks and Some Related Graph Theoretic Problem*, Operation Research, 13, 1965.
- [10] JARNIVEN, PERTTI & RAJALA & SINERVO, *A Branch and Bound Algorithm for Seeking the p-Median*, Operations Research, Technical Notes, 20, 1972.
- [11] KHUMAWALA, M. & NEEBE & DANNENBRING, *A Note on El Shaieb's New Algorithm for the Locating Sources Among Destinations*, Management Science, vol. 21, 1974.
- [12] LARSON & ODONI, *Urban Operations Research*, Prentice-Hall, 1981.
- [13] MACHADO, SUELI B., *Estratégias de Atendimento em Redes Logísticas e Dimensionamento de Terminais*, Dissertação de Mestrado apresentada à EPUSP, 1989.
- [14] NARULA, C. & OGBU, *An Algorithm for the p-Median Problem*, Operations Research, 25, 1977.
- [15] NOVAES, A.G.N., *Sistemas Logísticos: Transporte, Armazenagem e Distribuição Física de Produtos*, Ed. Edgard Blucher Ltda., 1989.
- [16] TEITZ, M.B. & BART, *Heuristic Methods for Estimating the Generalized Vertex Median of a Weighted Graph*, Operation Research, 16, 1968.