

RESENHA

THE LOGIC OF LOGISTICS: THEORY, ALGORITHMS AND APPLICATIONS FOR LOGISTICS MANAGEMENT

Julien Bramel, *Professor Associado em Ciência da
Administração na Universidade de Columbia, em Nova Iorque*

David Simchi-Levi, *Departamento de Engenharia
Industrial e Ciência da Administração da Northwestern
University, em Evanston, Illinois*

Springer-Verlag, New York, 1997, 281 páginas

Claudio Barbieri da Cunha

Departamento de Engenharia de Transportes

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

INTRODUÇÃO

The Logic of Logistics trata essencialmente da aplicação de modelos matemáticos de pesquisa operacional a problemas logísticos. É uma obra que abrange tópicos avançados de modelagem matemática e implementação de algoritmos, sendo indicada para profissionais e pesquisadores com sólida formação e interesse específico em algoritmos e heurísticas aplicados a problemas logísticos e aspectos da sua implementação computacional.

Os autores assumem que o leitor esteja familiarizado com os conceitos básicos de programação linear e de teoria de probabilidades e, na maioria dos capítulos, com a teoria da complexidade e teoria dos grafos.

Não é um livro recomendado para iniciantes nos temas de logística e de pesquisa operacional, uma vez que a leitura é difícil e a compreensão nem sempre imediata. Estes, desejando buscar um enfoque mais

quantitativo do que o geralmente apresentado nos livros-textos clássicos de logística, podem tirar melhor proveito de obras como o livro de Ballou (1972).

O livro foi escrito a partir das experiências de mais de dez anos dos autores em cursos de pós-graduação em logística, bem como do envolvimento dos mesmos com o desenvolvimento, a implementação computacional e a aplicação de modelos de otimização a problemas reais de roteirização de veículos e de localização de instalações, entre outros.

São abordados problemas que englobam modelos logísticos integrados, de roteirização e de estoque. Esses problemas são, em geral, complexos do ponto de vista computacional e, conseqüentemente, impossíveis de serem resolvidos através dos métodos clássicos da pesquisa operacional, como, por exemplo, programação linear, tornando necessário o desenvolvimento de algoritmos e heurísticas especializados para a sua resolução.

Os diferentes modelos e estratégias de solução são analisados em termos do seu desempenho, o que inclui técnicas de análise no "pior caso" ("*worst-case analysis*"), análise probabilística e determinação de funções limitantes baseadas em programação linear.

Conseqüentemente, o livro apresenta um tratamento bastante matemático, com inúmeras expressões matemáticas e fórmulas. As análises de desempenho são, em geral, expressas em termos de lemas e teoremas, com as respectivas provas e demonstrações decorrentes, o que torna a leitura e a compreensão menos triviais.

Não são apresentadas as formulações matemáticas dos problemas analisados, nem detalhadas as principais estratégias de solução para a sua resolução; pressupõe-se que o leitor esteja familiarizado com o estado-da-arte dos problemas tratados. Os autores tiveram o trabalho de relacionar, ao final do livro, cerca de duas centenas de referências bibliográficas, que abrangem os artigos mais relevantes e recentes sobre os assuntos tratados no livro, embora nem sempre as mesmas estejam referenciadas no texto na forma mais didática. Dificilmente o leitor vai

encontrar pistas de por onde iniciar caso queira adquirir um conhecimento prévio necessário para a melhor compreensão da obra. Por exemplo, para problemas de roteirização, este livro não dispensa o leitor de uma leitura prévia e familiaridade como o trabalho clássico de Bodin et al. (1983).

Diversos capítulos do livro, conforme os próprios autores mencionam, se originaram em artigos publicados em periódicos importantes, tais como *Mathematics of Operations Research*, *Mathematical Programming*, *Operations Research* e *IEE Transactions*. Isto ajuda a explicar o cunho mais matemático da obra. Adicionalmente, em uma leitura mais atenta tornam-se evidentes algumas diferenças de forma e conteúdo nos diferentes capítulos, resultado provável de uma compilação de trabalhos escritos por diferentes autores.

Tudo o que foi exposto acima em nada desmerece a obra de Bramel e Simchi-Levi. Pelo contrário, o livro vem preencher uma lacuna existente no tocante à modelagem e à implementação de algoritmos de pesquisa operacional para problemas complexos: uma análise mais quantitativa, matemática e abrangente do desempenho de algumas das principais estratégias de solução encontradas na literatura, de maneira independente em relação a situações específicas ou particulares que foram consideradas na sua avaliação.

A importância dessa abordagem decorre do fato de que muitas estratégias de solução apresentadas na literatura para os problemas tratados no livro são heurísticas, isto é, métodos que não asseguram a obtenção da solução ótima (do ponto de vista matemático). É frequente encontrar avaliações de desempenho de heurísticas através de algum estudo de caso ou de algum resultado de processamento para problemas teste gerados aleatoriamente. Consequentemente, nem sempre se consegue verificar a robustez de uma estratégia de solução, isto é, a variação do desempenho computacional para problemas com características distintas, assim como a qualidade das soluções, medida pelo desvio em relação à solução ótima e pela capacidade de geração de soluções viáveis.

Finalizando, do ponto de vista mais acadêmico, *The Logic of Logistics* pode ser utilizado de forma complementar, em cursos que tratam de tópicos avançados de pesquisa operacional aplicada a problemas logísticos, com ênfase na implementação computacional de algoritmos para problemas combinatórios.

OS AUTORES

Julien Bramel é Professor Associado em Ciência da Administração (*Management Science*) na Universidade de Columbia, em Nova Iorque, onde está desde 1993. Suas áreas de interesse abrangem logística, planejamento da distribuição, roteirização de veículos e programação de produção. Durante cinco anos esteve envolvido na concepção e implementação de algoritmos de roteirização para o transporte de escolares na cidade de Nova Iorque. É editor associado das revistas *Operations Research* e *Management Science*. Foi agraciado com dois prêmios de destaque nacional, enquanto cursava seu PhD na Universidade de Columbia: *Best Thesis in Transportation Science* e *Best Student Paper in Operations Research*.

David Simchi-Levi leciona no Departamento de Engenharia Industrial e Ciência da Administração da Northwestern University, em Evanston, Illinois, desde 1993. É diretor do Laboratório de Produção e Logística, e também preside o Programa de Engenharia de Manufatura. Seus interesses de pesquisa englobam a análise, o desenvolvimento e a implementação de técnicas eficientes para projeto, operação e controle de sistemas logísticos e redes de comunicação e sua aplicação em problemas de cadeias de suprimentos, localização de instalações, modelos de estoques, roteirização e programação de produção. É editor associado das publicações *Operations Research*, *Naval Research Logistics*, *Transportation Science* e *Telecommunication Systems*.

Ambos são autores de diversos artigos, muitos dos quais são relacionados ao final da obra, principalmente na área de modelos de otimização aplicados a problemas logísticos, em particular modelos de roteirização de veículos.

CONTEÚDO

The Logic of Logistics está organizado em 5 partes:

- técnicas de análise de desempenho;
- modelos de roteirização de veículos;
- modelos de estoque;
- modelos hierárquicos;
- algoritmos aplicados a problemas logísticos reais.

O primeiro capítulo discute a problemática da administração ou gerenciamento logístico ("*logistics management*") nos níveis estratégico, tático e operacional. Diversos problemas são descritos sucintamente, como motivação para uma análise mais detalhada que se segue: problemas de configuração de rede de distribuição, de planejamento de produção, de controle de estoques, de "*cross-docking*", de integração de estoque e transporte, de gestão de frotas de veículos e de roteirização, entre outros. Os autores também apresentam sucintamente as principais técnicas utilizadas para a avaliação de qualidade de algoritmos e heurísticas, tratadas em detalhes nos capítulos subsequentes que compõem a Parte I do livro.

Parte I - Técnicas de Análise de Desempenho

O Capítulo 2 apresenta a técnica de análise de desempenho no pior caso ("*worst-case analysis*") para a avaliação de estratégias de solução heurísticas. Esta técnica permite determinar, para uma dada heurística, o desvio máximo em relação à solução ótima.

Os autores aplicam a técnica de análise de desempenho no pior caso a diferentes heurísticas clássicas na literatura para os problemas do caixeiro viajante e de *bin-packing* ("*bin-packing problem*").

Entretanto, pode ocorrer alguma situação em que uma heurística que apresente bom desempenho em problemas práticos reais tenha um resultado fraco no desempenho do pior caso. Isto ocorre quando a

heurística não se comporta bem em um ou mais casos patológicos muito específicos, na maioria das vezes pouco prováveis de ocorrerem na prática.

A fim de superar essa deficiência, os autores descrevem, no Capítulo 3, a análise do desempenho médio, que é desenvolvida através de uma análise probabilística do desempenho dos algoritmos sob determinadas hipóteses da distribuição de dados dos problemas. A análise do desempenho médio é, em geral, assintótica, isto é, medida apenas para problemas de dimensões extremamente elevadas (indicada, por exemplo, pelo número de nós no problema de caixeiro viajante). Novamente os autores ilustram essa técnica através da sua aplicação a heurísticas para os mesmos problemas tratados no capítulo anterior: caixeiro viajante e *bin-packing*.

Finalizando esta primeira parte do livro, no Capítulo 4 os autores demonstram o potencial de algumas relaxações lineares de problemas inteiros do tipo NP-completo a fim de obter bons valores limitantes inferiores para os problemas originais. Consequentemente, essas relaxações podem ser utilizadas para resolver problemas logísticos complexos até a otimalidade, ou para obter soluções viáveis muito próximas da ótima, através de alguma estratégia de enumeração implícita.

Entre elas destaca-se a aplicação da técnica de relaxação Lagrangiana para o problema de caixeiro viajante, proposta por Held e Karp (1970, 1971), e que também foi objeto da pesquisa de Cunha relacionada ao problema de roteirização com janelas de tempo (Cunha e Gualda, 1997 e Cunha, 1997); nesta última referência são também apresentados os conceitos básicos e os fundamentos da relaxação Lagrangiana.

Parte II - Modelos de roteirização de veículos

Os capítulos 5, 6 e 7 tratam da roteirização de veículos, com ênfase para heurísticas que apresentam bons resultados em termos de desempenho médio ou no pior caso.

O Capítulo 5 trata do problema específico de roteirização com demandas divisíveis, isto é, que podem ser divididas para atendimento. Os autores abordam uma estratégia de solução para problemas em que a carga pode ser dividida e entregue, utilizando uma frota de veículos. Neste caso, um dado ponto de atendimento com demanda q pode ser transformado em q atendimentos, com demandas unitárias, todos situados na mesmo ponto geográfico. Consequentemente, a restrição de capacidade se restringe ao número máximo de atendimentos que podem ser alocados a um veículo (Q atendimentos, correspondendo à capacidade do veículo). O problema tratado pressupõe frota homogênea de veículos, isto é, idênticos, além das restrições adicionais de capacidade de carga nos veículos e da localização dos veículos em uma única base.

Os autores analisam o desempenho médio e no pior caso de uma heurística para esse problema que havia sido proposta por Haimovich e Rinnooy Kan (1985) e aprimorada por Altinkemer e Gavish (1990). Essa heurística consiste no particionamento de um roteiro gigante (produzido a partir da resolução do problema do caixeiro viajante) em diversos segmentos, de forma que cada segmento corresponda a um veículo e, conseqüentemente, atenda no máximo Q pontos. Diferentes procedimentos de particionamento são analisados.

Já o Capítulo 6 trata do problema mais geral de roteirização, em que as demandas são diferentes e não podem ser divididas para atendimento por mais de um veículo; em outras palavras, cada ponto deve ser atendido por apenas um veículo. Novamente os autores analisam o desempenho médio e no pior caso para as principais categorias de heurísticas clássicas da literatura: métodos construtivos (método de economias); métodos de roteirização e agrupamento (do tipo roteiro gigante); métodos de agrupamento e roteirização (método de varredura angular); e métodos de otimização incompleta (métodos de plano de corte).

Problemas de roteirização com janelas de tempo, isto é, com horários para atendimento dos clientes, são objeto do Capítulo 7. Duas heurísticas são propostas e analisadas em termos dos seus desempenhos médio e no pior caso. Os resultados experimentais obtidos em

problemas testes consagrados na literatura e propostos por Solomon (1986) confirmam a superioridade da qualidade das heurísticas propostas, já verificadas nas análises de desempenho.

Por fim, as estratégias de solução para problemas de roteirização sem janelas de tempo formulados como problemas de particionamento ("*set-partitioning*") e que são baseadas em técnicas de geração de colunas são analisadas, em termos do seu desempenho, no Capítulo 8.

Parte III - Modelos de estoque

Problemas de produção e estoque são abordados nos capítulos 9, 10 e 11. O Capítulo 9 trata de problemas determinísticos de estoque, mais especificamente modelos de tamanho de lote econômico com demandas constantes ao longo do tempo e conhecidas antecipadamente. Além do modelo clássico (lote econômico de compra ou EOQ - "*economic order quantity*"), o capítulo abrange ainda modelos com horizonte de tempo finito, modelos de estoque para múltiplos itens e modelos de reposição de estoque de varejo.

O Capítulo 10 trata de problemas de estoque com demanda conhecida previamente, porém variável ao longo do tempo. São analisados modelos para um único item com e sem restrição de capacidade de produção, assim como modelos para múltiplos itens.

Já o Capítulo 11 enfoca modelos de estoque em que a demanda é estocástica, isto é, varia ao longo do tempo segundo uma função de distribuição conhecida. São revisados alguns dos principais resultados para modelos estocásticos, em particular modelos para um único período, modelos para horizontes de tempo finito e infinito e modelos para cadeias de suprimentos ou distribuição.

Parte IV - Modelos Hierárquicos

Esta parte trata dos problemas hierárquicos em redes logísticas e, em particular, a integração das decisões nos diferentes níveis: estratégico, tático e operacional.

Os problemas de configuração de redes de distribuição e de localização de instalações estão no escopo do Capítulo 12. São abordados os problemas das p -medianas, de localização com restrição de capacidade das instalações candidatas e, finalmente, de localização de armazéns ou centrais de distribuição em redes logísticas mais complexas. Neste capítulo, ao contrário dos demais precedentes, são apresentadas as formulações matemáticas dos diferentes modelos apresentados. São também descritas as estratégias de solução baseadas em técnicas de relaxação Lagrangiana, bem como analisados sucintamente os respectivos desempenhos.

O Capítulo 13 trata de problemas integrados de estoques e distribuição física, mais especificamente a análise integrada de decisões operacionais de controle de estoque e roteirização de veículos. São tratados problemas com um único depósito e estratégias de consolidação em depósitos, porém sem armazenagem intermediária, conhecidas como "*cross-docking*".

Parte V - Algoritmos Logísticos na Prática

Nesta parte são relatadas experiências práticas e estudos de caso relativos a aplicações em problemas logísticos reais, de grande escala.

O Capítulo 14 relata a experiência de implementação de um algoritmo de roteirização e programação de veículos para o problema de transporte de escolares na cidade de Nova Iorque. Após uma breve revisão da literatura, é apresentada uma descrição detalhada do problema e suas restrições, englobando aspectos críticos como a estimativa de distâncias e tempos de viagem através de um sistema de informações geográficas (SIG). Na sequência é delineado o algoritmo de solução, incluindo os critérios considerados na sua seleção. Os autores apontam as restrições e os requisitos adicionais identificados durante a fase de implementação do algoritmo, bem como as opções de otimização e um sumário dos resultados obtidos com o modelo.

No Capítulo 15 são discutidos os principais aspectos envolvidos no desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para o problema

de configuração ótima da rede logística. Esse problema complexo envolve decisões estratégicas no tocante à determinação do número adequado de armazéns; respectivas localizações e tamanhos; quais produtos serão abastecidos a partir de cada local; e estimativa de alocação de área para os produtos em cada instalação. O objetivo é a minimização do custo logístico total, que compreende as parcelas de aquisição, produção, estoque, transporte e de instalações (custos fixos, de armazenagem e de movimentação). São descritos sumariamente os procedimentos adotados nas etapas de levantamento e estimativa de dados, bem como os requisitos do sistema.

Ao final de cada capítulo são propostos diversos problemas derivados dos problemas tratados, sendo que na maioria deles são pedidas demonstrações e provas matemáticas de limites e de desempenho.

Em síntese, o livro de Julien Bramel e David Simchi-Levi trata do desempenho e da aplicação de modelos matemáticos de pesquisa operacional à gestão de problemas logísticos. O enfoque principal está direcionado à análise de desempenho de algoritmos e heurísticas aplicados aos principais problemas combinatoriais da área de logística, utilizando técnicas matemáticas, de maneira a produzir resultados que permitam avaliar o desempenho e a robustez das estratégias de solução de maneira independente de testes com instâncias particulares de problemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altinkemer, K.e B. Gavish (1991). Parallel savings based heuristics for the delivery problem. *Operations Research*, v.39, n.3, maio-junho.
- Ballou, R. (1972). *Business Logistics Management*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, Nova Iorque.
- Bodin, L.D.; B.Golden; A.Assad e M. Ball. (1983). Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art. *Computers and Operations Research*, v.10, n.2.

- Cunha, C.B. (1997) *Uma contribuição para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais*. São Paulo: EPUSP, Departamento de Engenharia de Transportes. 222p. (Tese de Doutorado).
- Cunha, C.B. e N.D.F.Gualda (1997) Heurísticas baseadas em relaxação lagrangiana para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 11., Rio de Janeiro, 1997. Anais. Rio de Janeiro: ANPET, v.2, p.843-855.
- Haimovich, M.e A.H.G. Rinnooy Kan (1985). Bounds and heuristics for capacitated routing problems. *Mathematical Operational Research*, v.10, p.527-542.
- Held M.e R. M. Karp (1970). The traveling-salesman problem and minimum spanning trees. *Operations Research*, v.18, p.1138-1162.
- Held M.e R. M. Karp (1971). The traveling-salesman problem and minimum spanning trees: Part II. *Mathematical Programming*, v.1, p.6-25.
- Solomon, M.M. (1986). On the worst-case performance of some heuristics for the vehicle routing and scheduling with time windows constraints. *Networks*, v.16, p.161-174.

Endereço do autor:

Prof. Dr. Claudio Barbieri da Cunha
Departamento de Engenharia de Transportes – Escola Politécnica da USP
Av. Prof. Almeida Prado travessa 2 – Cidade Universitária
05508-900 São Paulo – SP - Brasil