

O problema de estoque-roteirização com demanda determinística

A. Znamensky ¹ e C. B. Cunha ²

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

Artigo Recebido: 27/08/2003 - Aprovado: 30/10/2003

RESUMO: Este artigo apresenta um panorama dos principais modelos encontrados na literatura para o problema de estoque-roteirização com demanda determinística. Embora seja eminentemente um problema estocástico, a utilização de modelos com demanda determinística pode apresentar grande atrativo prático. Os modelos encontrados podem ser classificados em duas grandes categorias: modelos de frequência de atendimento e modelos de instante de atendimento. Os primeiros tratam de uma situação estável de atendimento periódico, repetida ao longo de um horizonte de planejamento infinito, já os segundos trabalham em um horizonte de planejamento finito e permitem atendimentos em instantes não necessariamente periódicos.

ABSTRACT: This paper presents a review of inventory routing models with deterministic demand. Although such problems are essentially stochastic in nature, the use of deterministic models may allow solving real instances. Models found in bibliography can be classified as frequency domain or time domain models. The first group deals with steady distribution situation in an infinite planning horizon. Conversely, in the second group the shipments schedules are decided within a finite planning horizon and are not restricted to fixed frequencies as in the former group.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo apresentar um panorama dos modelos encontrados na literatura que tratam do problema de estoque-roteirização com demanda determinística. Esse tipo de problema pode ser visto como uma combinação do problema de roteirização de veículos com o problema de reposição de estoques, podendo ocorrer em diversos sistemas logísticos de distribuição, em especial no chamado VMI (“Vendor Managed Inventory”), que segundo Campbell *et al.* (1998) é uma das recentes tendências da logística. Nesse sistema de gerenciamento, a gestão de estoques nos clientes ou pontos de consumo é de responsabilidade da indústria que abastece esses pontos. Em outras palavras, ao invés dos clientes encaminharem seus pedidos de reabastecimento, o produtor ou fornecedor é quem define as datas de entrega e as respectivas quantidades a ser entregues. Dessa forma, o fornecedor pode auferir vantagens, na medida em que o controle dos processos de abastecimento e de distribuição permite uma melhor coordenação das entregas, reduzindo os custos de transporte e distribuição, bem como evitando o ônus do desabastecimento ou de vendas perdidas pela não disponibilidade do produto. Também ganha o cliente,

que não necessita despender recursos para a administração de estoques nem corre risco de falta do produto. Busca-se assegurar, dessa forma, o custo total dado pela soma do custo de estoque com o de distribuição. Bramel e Simchi-Levi (1997) apontam ainda que, também no caso de demanda estocástica, o gerenciamento de estoques pelo fornecedor pode trazer benefícios, devido ao compartilhamento de um estoque de segurança agregado, o qual é menor que a soma dos estoques de segurança requeridos por cada consumidor, fenômeno esse conhecido como “risk pooling”.

Esse sistema de gerenciamento de estoques e entregas pelo fornecedor é uma consequência natural quando os pontos de demanda pertencem à mesma empresa ou grupo que produz os produtos. Em outros casos, é fruto de negociação entre produtores e consumidores, como forma a responder de forma mais eficiente às variações de demanda e diminuir o risco de falta do produto e de outras flutuações indesejáveis ao longo da cadeia. Em particular, o VMI elimina uma das causas do “efeito chicote” (“bullwhip effect”) identificadas por Lee *et al.* (1997), que consiste em variações ou flutuações cada vez maiores quanto mais a montante da cadeia de suprimentos, em resposta a pequenas variações na ponta de consumo, ocasionadas

por incertezas e lead times elevados, entre outros fatores. Ao possuir a liberdade e a responsabilidade de decidir quando repor os estoques, o fornecedor é também levado a acompanhar de maneira próxima a situação dos estoques de seus clientes, reduzindo assim a distorção de informações na cadeia de suprimentos e por conseqüência o efeito chicote.

Ainda segundo Campbell *et al.* (1998), embora a tecnologia necessária para a implantação do controle de estoques pelo fornecedor seja relativamente barata, uma das razões que impede a sua utilização em larga escala é a dificuldade de se determinar uma estratégia de distribuição que otimize tanto os custos quanto as ocorrências de falta de estoque nos clientes, o que vem a ser, efetivamente, a questão central do problema de estoque-roteirização.

A aplicação prática de modelos integrados de estoque-roteirização tem sido observada desde a distribuição de gases industriais e derivados de petróleo até o abastecimento de lojas de departamentos e distribuição de refrigerantes. Stalk *et al.* (1992) consideram que um eficiente planejamento integrado de reposição de estoques foi a peça central da estratégia competitiva adotada, com sucesso, pelo Wal-Mart, e principal responsável pelo seu notável crescimento no final dos anos 80. Observa-se ainda que, redes de supermercados vêm sistematicamente transferindo a responsabilidade de reposição de determinados produtos a seus fornecedores, o que amplia o leque de situações em que a aplicação de modelos integrados de estoque-roteirização pode ser essencial para a maior eficiência da cadeia de suprimentos.

Embora relevante, esse tipo de problema não tem sido objeto de pesquisa e nem de aplicação no Brasil. Pretende-se assim, contribuir para a pesquisa e o desenvolvimento de algoritmos de solução que possam ser aplicados a problemas reais dentro da realidade brasileira.

2 CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO PROBLEMA

Em sua forma mais abrangente, o problema de estoque-roteirização trata da distribuição periódica de um ou mais produtos, a partir de um ou mais depósitos, para um conjunto de clientes geograficamente dispersos, dentro de um horizonte de planejamento, finito ou não. Em linhas gerais, pode-se dizer que a resolução do problema envolve três decisões inter-relacionadas:

- Quando atender cada cliente;
- Quanto fornecer do produto quando o cliente é atendido;

- Que rotas utilizar no atendimento.

É interessante notar aqui as diferenças entre o problema de estoque-roteirização e o problema clássico de roteirização de veículos. Nesse último, as demandas são conhecidas, e a roteirização corresponde a um único período, compatível com a duração das viagens e a jornada de trabalho dos veículos, não fazendo sentido se falar em horizonte de planejamento. Em outras palavras, o problema de roteirização de veículos não considera as questões de quando atender os clientes, nem quanto fornecer ao cliente quando esse é atendido, concentrando-se apenas nas rotas para atendimento dos clientes. Além disso, tais modelos consideram apenas custos associados à distribuição propriamente dita, sejam eles custos variáveis correspondentes às distâncias percorridas ou aos tempos de atendimento, ou mesmo custos fixos decorrentes da utilização dos veículos em alguns casos, principalmente no caso de serem utilizados veículos de terceiros; custos de estoque não são considerados.

Por sua vez, os modelos de gestão de estoques consideram estruturas de custo de distribuição simplificadas, em que se supõe a separabilidade ou independência de custos em relação a pontos de entrega distintos, como se fosse feita uma viagem redonda ida e volta, para cada ponto atendido. Anily e Federgruen (1990) apontam ainda que esses custos são tratados em geral como a soma de um termo fixo e um termo proporcional à quantidade entregue, e que, embora estruturas de custo mais sofisticadas tenham sido encontradas na literatura, as hipóteses adotadas não condizem com o contexto de distribuição com roteirização de veículos, em que ocorre o fracionamento da capacidade de cada veículo, e conseqüentemente dos custos, entre diferentes clientes que compõem uma rota.

Por sua abrangência e complexidade, a classificação dos problemas de estoque-roteirização não é uma tarefa simples. Classificações utilizadas para modelos de roteirização (Bodin *et al.*, 1983) ou modelos de estoque (Lee e Nahmias, 1993; Muckstadt e Roundy, 1993) não se aplicam diretamente. Uma classificação específica para os problemas de estoque-roteirização foi proposta por Baita *et al.* (1998) e reproduzida no Quadro 1.

Observa-se que, embora detalhada, essa classificação não abrange alguns aspectos comuns em problemas de roteirização, e que podem efetivamente ocorrer em problemas de estoque-roteirização. Como exemplo pode-se citar o caso de janelas de atendimento, restrições de precedência ou restrições de alocação de cliente a veículo, no caso de frota heterogênea.

Quadro 1. Elementos de classificação para problemas de estoque-roteirização

Elemento	Atributo	Alternativas		
Topologia da rede de atendimento	Pontos de abastecimento ou distribuição	Um-para-um	Um-para-muitos	Muitos-para-muitos
Itens a ser entregues	Número	Um	Muitos	
Demanda	Tipo	Conhecida	Desconhecida	
	Comportamento	Constante	Variável	
	Distribuição entre clientes	Uniforme	Não uniforme	
Decisões	Domínio	Frequência de atendimento	Instante de atendimento	
Restrições	Capacidade dos veículos	Igual	Diferente	
	Capacidade de estocagem			
	Capacidade de abastecimento			
	Número de veículos	Fornecido	Variável de decisão	Não restritivo
Custos	Estoque	Manutenção	Falta	Pedido
	Distribuição	Fixo	Proporcional à distância	Proporcional ao número de clientes
Estratégia de solução	Decomposição	Tempo	Agrupa-Roteiriza	
	Agregação	Tempo	Frequência	Distância
	Algoritmo	Exato	Aproximado	
	Programação matemática	Linear	Inteira	Não-linear

É fácil constatar que o elevado número de combinações dos diversos elementos de classificação torna a enumeração dos diversos tipos de problemas virtualmente impossível. Porém, da classificação proposta pelos autores, fica claro que algumas classes se destacam, em função da importância e influência de suas características. É o caso da categoria tipo da demanda, que pode ser classificada como conhecida ou desconhecida. O primeiro caso, também denominado determinístico, corresponde ao objetivo do presente trabalho.

Pode-se argumentar que, em última instância, problemas de estoque-roteirização são eminentemente estocásticos, uma vez que o conhecimento preciso do consumo que gera a demanda a ser atendida em cada cliente é a exceção, e não a regra em casos reais de distribuição. Entretanto, modelos com demanda determinística não são irrealistas, visto que o comportamento estocástico pode ser absorvido, por exemplo, pela introdução de um estoque de segurança e a sazonalidade incorporada a um modelo de previsão de demanda.

Vale ainda lembrar que modelos estocásticos em geral requerem grande quantidade de dados históricos e seu adequado tratamento estatístico, que nem sempre estão disponíveis. Sob essa ótica, modelos de demanda determinística apresentam grande aplicabilidade prática, como se pode verificar pelo sucesso de seu emprego em problemas reais descritos por Bell *et al.* (1983) e Blumenfeld *et al.* (1987).

3 ESTRATÉGIAS DE SOLUÇÃO

A descrição das estratégias de solução encontradas na literatura segue parcialmente a classificação proposta por Baita *et al.* (1998), que agrupa os modelos segundo a forma em que a decisão temporal da data de atendimento é tratada. A Figura 1 apresenta essa classificação aplicada aos problemas com demanda determinística. O primeiro grupo, como o próprio nome já diz, considera como variáveis de decisão a frequência ou o intervalo entre atendimentos sucessivos, tratando assim de uma situação de

atendimento periódico. De maneira distinta, o segundo grupo trata como variáveis de decisão os instantes de entrega, que não são necessariamente periódicos. Baita *et al.* (1998) apresentam ainda uma subcategoria de modelos de instante de atendimento que considera os casos em que a demanda é desconhecida. Esse caso, naturalmente, não foi incluído por fugir ao escopo do presente trabalho. Já os modelos de frequência de atendimento podem ser subdivididos em três grupos, detalhados nas seções a seguir.

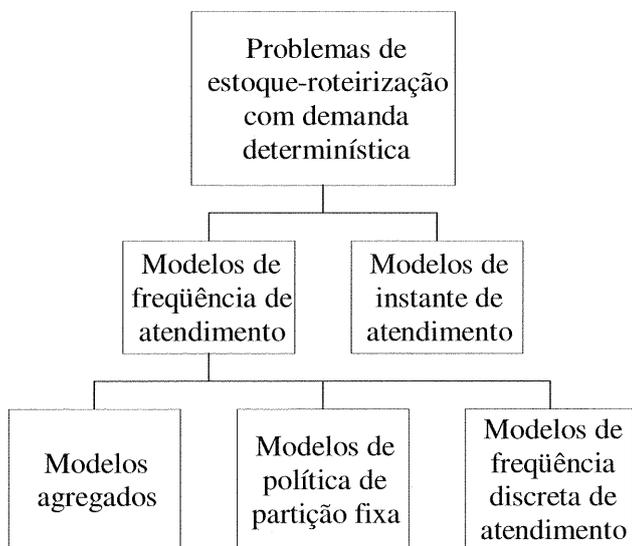


Figura 1. Classificação de problemas de estoque-roteirização com demanda determinística

3.1 Modelos agregados de frequência de atendimento

Nessa categoria estão agrupados os modelos analíticos baseados em premissas simplificadoras relativamente agregadas. São modelos de grande apelo intuitivo, que representam os custos de forma detalhada, mas que muitas vezes chegam a resultados mais qualitativos do que quantitativos. Um resultado típico desse tipo de modelo é a análise de trocas cruzadas (“trade-offs”) entre os custos envolvidos em função das diferentes decisões logísticas possíveis.

Primeiro de uma série de trabalhos nessa linha de pesquisa, Blumenfeld *et al.* (1985) analisaram redes de distribuição com entrega direta de fornecedor para consumidor ou via terminais de consolidação. São analisados os “trade-offs” entre essas duas formas de distribuição e identificadas as configurações de custo que tornam uma mais vantajosa que a outra. Uma extensão desse modelo é proposta por Burns *et al.* (1985), que consideraram também a possibilidade de roteirização na distribuição. É interessante notar que, nesse caso, a localização dos consumidores é tratada de maneira agregada, através de um parâmetro de densidade, e não de maneira individualizada, através

de variáveis discretas, como é usual nos modelos de roteirização.

Como exemplo dos resultados que podem ser obtidos com esse tipo de modelo, Burns *et al.* (1985) afirmam que a roteirização da distribuição é mais vantajosa que a entrega direta quando os itens entregues são de maior valor agregado. Esse resultado decorre do fato de que com entrega direta, isto é, viagens redondas com veículos completos, os atendimentos são menos frequentes e, conseqüentemente, os volumes entregues são maiores, aumentando o custo médio total do estoque nos clientes. Essa vantagem da roteirização sobre entrega direta aumenta com a distância em relação ao fornecedor, com a densidade de consumidores, valor do produto transportado e com a demanda. Uma aplicação real dos modelos anteriores é apresentada em Blumenfeld *et al.* (1987), que descrevem a sua utilização na distribuição de componentes eletrônicos para a indústria automobilística General Motors nos EUA. O número de componentes distribuídos é da ordem de 20 mil itens, e a rede de distribuição envolve cerca de 160 plantas de fabricação e/ou montagem. O modelo permitiu identificar um potencial de redução de custos logísticos da ordem de 26%, o que correspondia à época a cerca de US\$ 2,9 milhões/ano.

Larson (1988) propôs um método baseado na heurística das economias de Clarke e Wright (1964), aplicado com sucesso ao problema de coleta e transporte de resíduos gerados em estações de tratamento de água da cidade de Nova Iorque. Note-se que esta aplicação é um problema de coleta, e não um problema de distribuição, porém matematicamente ambos são equivalentes. O método proposto considera rotas fixas para a coleta dos resíduos das estações de tratamento de esgoto, a consolidação em estações de transbordo, e o posterior transporte até seu destino final em alto mar. É interessante ressaltar que, neste caso, as demandas, isto é, as quantidades de resíduos a serem coletados, não são determinísticas, mas seguem uma distribuição normal, sendo, no entanto, tratadas como determinísticas a partir da especificação prévia de um nível de serviço. A utilização de rotas fixas acarreta, entretanto, o inconveniente de clientes serem visitados com uma frequência muito maior que a necessária, o que levou Webb e Larson (1995) a proporem uma extensão do modelo que considera não apenas a frequência de atendimento, como também a sua defasagem no tempo. Em outras palavras, no modelo original de Larson (1988) todos os clientes de uma rota fixa são visitados no mesmo dia, mesmo os que não têm necessidade de atendimento iminente. Já no modelo de Webb e Larson (1995), estes clientes são atendidos apenas quando realmente necessário, o que possibilita um melhor aproveitamento da frota, e conseqüente redução de custos, em especial quando as demandas dos pontos de atendimento são muito distintas. Vale notar que, tanto um quanto o outro modelo busca a redução da frota total necessária ao

atendimento da demanda, sendo chamados por seus autores de modelos estratégicos de estoque-roteirização, em oposição aos modelos táticos, que considerariam apenas a otimização da utilização de uma frota existente.

Benjamin (1989) estudou o problema de distribuição de vários fornecedores para vários clientes, considerando custos de estoque nos fornecedores, nos clientes e os custos de transporte. Partindo da decomposição do problema e da solução, de maneira independente, das etapas de determinação do lote econômico de produção, do problema de transporte e da determinação do lote econômico de pedido, e considerando que a solução exata do problema envolve a resolução de um problema de programação não linear, viável apenas para instâncias de menor porte, o autor apresenta uma heurística para a resolução simultânea dos três subproblemas de uma maneira conjunta. Vale a pena ressaltar que, o modelo não considera roteiros de entrega, apenas distribuição direta fornecedor-consumidor através de viagens redondas.

3.2 Modelos de frequência de atendimento com política de partição fixa

Nessa categoria estão os modelos que adotam uma política de partição dos clientes, ou seja, modelos que definem, a priori, conjuntos fixos de clientes que serão tratados como regiões de atendimento. Embora a determinação de uma política ótima de partição que minimize os custos de estoque e transporte seja computacionalmente difícil (NP-hard), uma vez definidas as regiões a determinação da frequência de atendimento de cada região e os custos associados é simples e se assemelha à conhecida fórmula de lote ótimo de pedido. Essa característica frequentemente permite a dedução de limites inferiores e superiores para os custos e uma avaliação mais objetiva da política de abastecimento.

Anily e Federgruen (1990) propuseram uma heurística que particiona os clientes, de modo que cada grupo seja atendido por um único veículo, a intervalos regulares e segundo uma rota fixa. Em outras palavras, todas as vezes que um cliente do grupo deva ser atendido, todos do grupo o serão, o que se repete a intervalos regulares ao longo do horizonte de planejamento. Uma importante característica desse modelo é a possibilidade de fracionar a demanda dos clientes, de forma que partes da demanda de um dado cliente sejam atendidas independentemente por rotas distintas. A partição do conjunto de clientes é feita segundo uma heurística que agrupa os clientes em setores circulares contíguos, com centro no depósito, sendo posteriormente subdivididos em seções correspondentes a cada um dos veículos a serem utilizados. A frequência de atendimento é determinada de maneira análoga à fórmula de lote econômico ótimo de pedido com restrição da quantidade de atendimento.

Os autores determinaram limitantes inferiores e superiores para o custo da classe de política de

abastecimento adotada, e demonstram que a heurística proposta é assintoticamente ótima dentro da referida classe de políticas de abastecimento. Isto é, ao se aumentar o número de clientes, o custo e o seu limitante superior tendem para o limitante inferior deduzido para a política de abastecimento. Vale recordar que toda a análise considera um horizonte de planejamento infinito, e por conseguinte os custos associados são custos de longo prazo.

Essa heurística foi criticada por Hall (1991), que mostrou que o modelo superestima os custos de distribuição quando do fracionamento da demanda dos clientes, uma vez que não se considera a possibilidade de coordenação entre as entregas ou compartilhamento dos estoques. Em resposta às críticas recebidas, Anily e Federgruen (1991) argumentam que tais deficiências são inerentes à política de abastecimento adotada, em que cada região da partição é tratada independentemente das demais, mesmo que alguns pontos de entrega de várias regiões correspondam a um mesmo cliente físico. Os autores argumentam ainda que a heurística não deve ser avaliada exclusivamente pelo desempenho do pior caso ou sua comparação com o mínimo custo possível, devendo ser consideradas também aspectos positivos tais como a facilidade de implementação e administração da estratégia de solução proposta.

Em trabalho posterior, Anily e Federgruen (1993) consideram o caso em que a distribuição se faz a partir de um depósito que também serve como ponto de armazenagem, devendo ser incluídos no modelo o custo de estoque e a capacidade do depósito, assim como o custo de reposição do estoque no depósito. Os autores propõem uma política de partição fixa similar à apresentada em Anily e Federgruen (1990), porém nesse caso os intervalos entre atendimentos são arredondados para potências de dois. Esse artifício permite que seja estimado o custo da política proposta em relação a resultados encontrados na literatura, o que segundo os autores não excede a 6%. Uma avaliação similar foi realizada por Gallego e Simchi-Levi (1990) para o caso de entregas diretas fornecedor-consumidor. Após deduzir um limitante inferior de custo para todas as políticas de atendimento, os autores demonstram que, se o lote econômico de pedido corresponder a no mínimo 71% da capacidade do veículo de distribuição, então a política de entrega direta apresenta um custo no máximo 6% superior ao limitante deduzido anteriormente.

Bramel e Simchi-Levi (1995) apresentaram uma heurística que tem como idéia principal determinar uma partição do conjunto de clientes por meio da resolução de um problema de localização de concentrador capacitado ("Capacitated Concentrator Location Problem"). A aplicação da heurística a um conjunto de instâncias extraídas da literatura indica que em média os resultados obtidos são cerca de 6% maiores que um limitante inferior deduzido para a classe de

políticas de partição fixa. Entretanto, é importante notar que os autores adotam a hipótese de capacidade de estoque ilimitada nos clientes, o que pode não ser aceitável na prática, e consequentemente levar a programações de atendimento que não sejam factíveis.

3.3 Modelos de frequência de atendimento com frequência discreta

Conforme comentado anteriormente, nos modelos de partição fixa o cálculo dos custos e da frequência de atendimento se assemelha à fórmula de lote econômico ótimo de pedido. O maior problema desse tipo de formulação é que os intervalos entre entregas são geralmente fracionários. Hall (1985) reconhece esse resultado como inviável, e sugere o arredondamento para o intervalo inteiro mais próximo. Esse procedimento, conquanto aparentemente natural, pode elevar desnecessariamente os custos da distribuição.

Speranza e Ukovich (1994) estudaram o problema da distribuição de múltiplos produtos no caso de entregas diretas fornecedor-consumidor. O problema consiste em determinar as frequências (e defasagem) das entregas de cada produto dentre um conjunto discreto de possíveis frequências de atendimento, com o objetivo de minimizar os custos de transporte e estocagem. Os autores separam o problema segundo a frequência de atendimento adotada: única ou múltipla, e segundo o tipo de consolidação adotado: por frequência ou por instante de atendimento. A combinação dessas categorias define quatro formas distintas do problema, que é modelado como problema de programação linear inteira ou inteira mista conforme o caso.

O caso da distribuição com múltiplos consumidores foi abordado por Bertazzi *et al.* (1997), que propuseram uma heurística de três etapas para sua resolução. Na primeira etapa cada consumidor é tratado isoladamente, seguindo o modelo proposto por Speranza e Ukovich (1994). Com base nos resultados obtidos, são separados na segunda etapa subconjuntos de consumidores atendidos com a mesma frequência, e identificadas agregações de consumidores e/ou modificações de frequência que gerem redução de custo. Finalmente, a última fase consolida rotas geradas na segunda etapa por meio da heurística de economias de Clarke e Wright (1964).

Posteriormente, Bertazzi e Speranza (2002) realizaram uma comparação de modelos que tratam do problema com entrega direta fornecedor-consumidor. Sob esse enfoque, são analisados o caso em que a frequência de atendimento pode tomar qualquer valor real, e dois casos em que apenas valores discretos são permitidos. O primeiro corresponde ao modelo desenvolvido por Blumenfeld *et al.* (1985), já o segundo corresponde à situação em que às frequências se associam volumes constantes de entrega, analisado em Speranza e Ukovich (1994).

Finalmente o terceiro caso considera que as frequências possíveis estão uniformemente distribuídas ao longo de um horizonte de planejamento, sendo que as quantidades entregues, com uma certa frequência, não são necessariamente constantes. Os autores demonstram que a solução ótima do primeiro modelo nunca será pior que as soluções obtidas pelos demais modelos, e de forma similar, que a solução do terceiro modelo nunca será pior que a do segundo.

3.4 Modelos de instante de atendimento

Nessa categoria estão os modelos que tratam como variáveis de decisão os instantes de entrega. Se nos modelos de frequência de atendimento procura-se minimizar os custos de distribuição periódica em um horizonte infinito de planejamento, nos modelos de instante de atendimento tal horizonte é necessariamente finito, e as entregas podem ser realizadas sem obedecer a uma periodicidade fixa. Surge aqui uma das questões mais importantes desse tipo de abordagem: como conciliar a minimização de custos em um modelo de curto prazo com a minimização de custos em um horizonte de longo prazo?

Um dos primeiros esforços em tratar explicitamente a relação dos custos de longo prazo com os de curto prazo foi o trabalho de Dror e Ball (1987), que estudaram o caso da distribuição de óleo combustível. Os autores propõem a redução do problema de um horizonte de planejamento anual para uma série de subproblemas semanais, por meio da introdução de parcelas de custo no modelo de curto prazo, parcelas essas que refletem as relações de custo do período considerado com os períodos futuros de planejamento. São analisados os casos de demanda determinística e estocástica, sendo sugerida a utilização de uma estratégia de solução baseada na heurística de Fisher e Jaikumar (1981) para o problema de roteirização de veículos, e que consiste na determinação dos dias de atendimento dos clientes pela resolução de um problema de alocação generalizada (“generalized assignment problem”), seguido da determinação dos roteiros de cada dia de atendimento por meio de uma versão modificada da heurística das economias de Clarke e Wright (1964). Por fim, as rotas obtidas passam por uma etapa de melhorias baseada em busca local.

Na mesma linha de redução do problema de horizonte anual para semanal, Dror e Levy (1986) analisaram a aplicação de duas heurísticas de busca local, baseadas em trocas de atendimentos entre rotas e/ou dias. Na primeira heurística, a cada iteração é realizada a troca que resulte na maior redução de custo. Em outras palavras, é uma heurística míope do tipo guloso (“greedy”), que realiza apenas um movimento por iteração, até que não seja mais possível a realização de trocas que acarretem redução de custo. A segunda heurística analisada busca realizar a cada iteração o conjunto de trocas que resulte na maior redução de

custo. As trocas realizadas devem ser independentes, isto é, a realização de uma troca não afeta as rotas envolvidas nas demais trocas, e a determinação dessas trocas é feita por meio da resolução de um problema de emparelhamento (“maximum weight matching problem”).

Outra forma de conciliar a minimização de custos de curto e longo prazos é a adoção de um horizonte de planejamento deslocável. Essa abordagem parte da premissa de que decisões distantes no futuro têm pouca influência em decisões de curtíssimo prazo, e que essa influência decresce quanto mais distante no futuro estejam tais decisões. A extensão do horizonte de planejamento pode assim ser ajustada para considerar prováveis decisões futuras de curto prazo, muito embora apenas os instantes iniciais do horizonte de planejamento (curtíssimo prazo) sejam efetivamente implementados. Esse processo se repete periodicamente, deslocando-se o horizonte de planejamento com o passar do tempo, daí a denominação de horizonte de planejamento deslocável.

Um exemplo dessa estratégia é o trabalho de Campbell *et al.* (2002), que decompõem o problema em duas etapas: Na primeira fase é resolvido um problema de programação inteira mista que determina as quantidades a ser entregues aos clientes, os respectivos dias de atendimento, e quais atendimentos serão feitos por quais rotas. Na segunda fase determina-se a programação efetiva das rotas a partir dos resultados obtidos na primeira fase. Tendo em vista que a resolução do problema de programação inteira é computacionalmente inviável para um horizonte de planejamento extenso, os autores propõem um procedimento de agregação geográfica de clientes e uma agregação dos períodos de tempo à medida que se avança no horizonte de planejamento. Isto é, para o início do período de planejamento é gerada uma roteirização diária, ao passo que para o final do período é gerada uma roteirização semanal.

Um modelo de duas etapas também foi a estratégia

de solução adotada por Bell *et al.* (1983). Na primeira etapa são geradas rotas viáveis por enumeração, sem especificar horários de atendimento ou quantidades distribuídas, o que é determinado numa segunda etapa, pela resolução de um problema de programação inteira mista. Argumenta-se que o número de rotas viáveis geradas na primeira etapa não chega a tornar inviável a abordagem descrita, pois o número de clientes atendidos diariamente por rota é pequeno (tipicamente 2, e raramente mais que 4), além do fato de que várias rotas podem ser descartadas a priori, com base em considerações de custo ou capacidade do veículo.

Chien *et al.* (1989) estudaram o caso da alocação e distribuição de uma quantidade limitada de produto a um conjunto geograficamente disperso de clientes. Esse problema envolve a seleção dos clientes a ser atendidos, uma vez que no caso mais geral o estoque no centro de distribuição não é suficiente para o atendimento de todos os clientes. A cada unidade de demanda atendida de um cliente corresponde uma receita fixa e inversamente uma penalidade para o não atendimento. O modelo considera ainda custos fixos e variáveis da roteirização e tem por objetivo a maximização do lucro total da operação do sistema. Esse é um modelo que não considera explicitamente um horizonte de planejamento, sendo sugerido pelos autores a sua utilização como um modelo diário em que ajustes nas penalidades e estoques reflitam a influência do período anterior.

Finalmente, Herer e Levy (1997) trataram de uma versão do problema em que são considerados também os custos de manutenção de estoques e de falta do produto. Os autores propuseram uma heurística para a programação com um horizonte semanal que determina a melhor data para abastecimento, de forma a estabelecer uma “distância temporal” entre clientes, a partir da qual as rotas são formadas com base num método de economias baseado no algoritmo proposto por Clarke e Wright (1964).

Quadro 2: Modelos de frequência de atendimento

Autor(es)	Ano	Topologia	Itens	Demanda	Capacidade	Custos Estoque	Custos Distribuição
Blumenfeld <i>et al.</i>	1985	M-M	M	CI	VC	MP	C
Burns <i>et al.</i>	1985	U-M	U	CD	V	M	FDC
Blumenfeld <i>et al.</i>	1987	M-M	U	CD	V	M	C
Larson	1988	U-M	U	CD	VC		F
Benjamin	1989	M-M	U	CD	VD	MP	D
Anily e Federgruen	1990	U-U	U	CD	VC	M	FD
Gallego e Simchi-Levi	1990	U-U	U	CD	V	MP	D
Anily e Federgruen	1993	U-M	U	CD	VD	MP	FD
Speranza e Ukovich	1994	U-U	M	CD	V	M	C
Bramel e Simchi-Levi	1995	U-M	U	CD	V	MP	D
Webb e Larson	1995	U-M	U	CD	VC		F
Bertazzi <i>et al.</i>	1997	U-M	M	CD	V	M	D
Bertazzi e Speranza	2002	U-U	M	CD	V	M	C

Quadro 3: Modelos de instante de atendimento

Autor(es)	Ano	Topologia	Itens	Demanda	Capacidade	Custos Estoque	Custos Distribuição
Bell et al.	1983	U-M	U	VD	VC		FD
Dror e Levy	1986	U-M	U	VD	V	MP	D
Dror e Ball	1987	U-M	U	CD	VC	MPF	D
Chien et al.	1989	U-M	U	CD	V	P	FD
Herer e Levy	1997	U-M	U	CD	VC	MPF	D
Campbell et al.	2002	U-M	U	CD	VC		D

onde:

topologia/itens: U= um, M= muitos;

demanda (tempo): C= constante, V= variável;

demanda (distrib.): I= igual para todos clientes,

D=diferente para cada cliente;

capacidade: V= veículos, D= depósito, C= clientes;

custos (estoque): M= manutenção("holding"), F= falta, P= pedido/setup;

custos (distrib.): F= fixo, D= proporcional à distância, C= proporcional ao número de clientes.

Os Quadros 2 e 3 apresentam comparativos das principais características dos modelos comentados anteriormente, agrupados segundo a categoria de frequência de atendimento e instante de atendimento, respectivamente.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo teve como finalidade apresentar uma revisão dos principais modelos encontrados na literatura que tratam do problema de estoque-roteirização com demanda determinística. Embora em sua forma mais geral este seja um problema eminentemente estocástico, a utilização de modelos com demanda determinística é justificado em grande parte das instâncias encontradas na prática. Algumas observações podem ser realizadas a partir da revisão realizada:

- Foram identificadas duas famílias de modelos: de frequência de atendimento e de instante de atendimento. Os primeiros tratam de uma situação estável de distribuição periódica em um horizonte de planejamento infinito, ao passo que os segundos trabalham dentro de um horizonte de planejamento limitado e permitem programação de atendimentos sem restrição de frequência.
- A adoção de diferentes parcelas de custos e a consideração das restrições de capacidade é significativamente distinta, mesmo entre modelos de uma mesma categoria, como se pode inferir das tabelas 2 e 3.
- Métodos exatos de resolução foram encontrados

apenas para casos específicos de modelos agregados ou modelos de frequência de atendimento que tratam de entrega direta fornecedor-consumidor. Modelos que envolvem roteirização, via de regra, fazem uso de alguma heurística para tal.

- Modelos de instante de atendimento permitem tratar situações em que a demanda não é constante, diferentemente dos modelos de frequência de atendimento. Dessa forma, podem ser utilizados conjuntamente com um modelo exógeno de previsão de demanda, e assim considerar variações da demanda tais como sazonalidade.
- A aplicação de modelos de instante de atendimento dentro de um horizonte de planejamento de longo prazo (tipicamente 1 ano) não é viável do ponto de vista prático, devido ao grande número de variáveis envolvidas. Por esse motivo, tais modelos são aplicados apenas a horizontes de curto prazo (tipicamente dias ou semanas), e a forma mais comum de contornar as distorções decorrentes é considerar o horizonte de planejamento deslocável.
- Mesmo dentro de um horizonte de curto prazo, modelos de instante de atendimento frequentemente fazem uso de alguma estratégia de decomposição do problema em etapas ou subproblemas, o que permite sua aplicação a instâncias de maior porte, sacrificando-se porém a otimalidade do resultado obtido.

Considerando-se a bibliografia analisada, verifica-se que os modelos de estoque-roteirização buscam conciliar duas funções conflitantes, tradicionalmente tratadas de maneira separada pelas empresas, o que contribui para a integração e otimização da cadeia de distribuição como um todo. Nesse sentido, Ballou (1992) afirma que a integração do controle de estoques e distribuição física impõe restrições cada vez mais rígidas às funções de produção e distribuição das empresas, e que pode-se esperar no futuro uma integração ainda maior de ambas. Isto sinaliza uma tendência de integração dos modelos ainda mais abrangente que a otimização conjunta do estoque e da

roteirização, com a incorporação de aspectos da produção, não encontrados, salvo poucas exceções, nos modelos aqui analisados.

Uma última consideração pode ainda ser feita em relação aos modelos encontrados na literatura. Embora tenham crescido a utilização em problemas de planejamento da produção ou roteirização de veículos, não foram encontradas aplicações de metaheurísticas tais como busca tabu ou algoritmos genéticos na bibliografia pesquisada. Esse fato indica a existência de um campo de pesquisa ainda pouco explorado, e de grande potencial, uma vez que metaheurísticas têm apresentado grande sucesso na resolução de problemas combinatórios similares.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anily, S. e A. Federgruen (1990) One warehouse multiple retailer systems with vehicle routing costs. *Management Science*, Vol. 36, No.1, p. 92-114.
- Anily, S. e A. Federgruen (1991) Rejoinder to “Comments on One-warehouse multiple retailer systems with vehicle routing costs”. *Management Science*, Vol. 37, No.11, p. 1497-1499.
- Anily, S. e A. Federgruen (1993) Two-Echelon distribution systems with vehicle routing costs and central inventories. *Operations Research*, Vol. 41, No.1, p. 37-47.
- Baita, F. e W. Ukovich e R. Pesenti e D. Favaretto (1998) Dynamic Routing-and-Inventory Problems: A Review. *Transportation Research A*, Vol. 32, No. 8, p. 585-598.
- Ballou, R.H. (1992) *Business Logistic Management*. (3rd ed.) . Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Bell, W.J. e L.M. Dalberto e M.L. Fisher e A.J. Greenfield e R. Jaikumar; P. Kedia; R.G. Mack e P.J. Prutzman (1983) Improving the Distribution of Industrial Gases with an On-line Computerized Routing and Scheduling Optimizer. *Interfaces*, Vol. 13:6, p. 4-23.
- Benjamin, J. (1989) An Analysis of Inventory and Transportation Costs in a Constrained Network. *Transportation Science*, Vol. 23, No. 3, p. 177-183.
- Bertazzi, L. e M.G. Speranza e W. Ukovich (1997) Minimization of Logistic Costs with Given Frequencies. *Transportation Research B*, Vol. 31, No. 4, p. 327-340.
- Bertazzi, L. e M.G. Speranza (2000) Continuous and Discrete Shipping Strategies for the Single Link Problem. *Transportation Science*, Vol. 36, No. 3, p. 314-325.
- Blumenfeld, D.E. e L.D. Burns e J.D. Diltz e C.F. Daganzo (1985) Analyzing Trade-Offs between Transportation, Inventory and Production Costs on Freight Networks. *Transportation Research B*, Vol. 19B, No. 5, p. 361-380.
- Blumenfeld, D.E. e L.D. Burns e C.F. Daganzo e M.C. Frick e R.W. Hall (1987) Reducing Logistics Costs at General Motors. *Interfaces*, Vol. 17, No. 1, p. 26-47.
- Bodin, L. e B. Golden e A. Assad e M. Ball (1983) Routing and scheduling of vehicles and crews. *Computers & Operations Research*, Vol. 10, No. 2, p. 63-211.
- Bramel, J. e D. Simchi-Levi (1995) A Location Based Heuristic for General Routing Problems. *Operations Research*, Vol. 43, p. 649-660.
- Bramel, J. e D. Simchi-Levi (1997) *The logic of logistics: theory, algorithms and applications for logistics management*. Springer-Verlag, New York.
- Burns, L.D. e R.W. Hall e D.E. Blumenfeld e C.F. Daganzo (1985) Distribution Strategies that Minimize Transportation and Inventory Costs. *Operations Research*, Vol. 33, p. 469-490.
- Campbell, A. e L. Clarke e A. Kleywegt e M.W.P. Savelsbergh (1998) The Inventory Routing Problem. In: *Fleet Management and Logistics*, T.G. Crainic, G. Laporte (eds), Kluwer Academic Publishers, p. 95-112.
- Campbell, A. e L. Clarke e M.W.P. Savelsbergh (2002) Inventory Routing in Practice. In: *The Vehicle Routing Problem*, P. Toth, D. Vigo (eds), SIAM monographs on discrete mathematics and applications, p. 309-330.
- Chien, T.W. e A. Balakrishnan e R.T. Wong (1989) An Integrated Inventory Allocation and Vehicle Routing Problem. *Transportation Science*, Vol. 23, No.2, p. 67-76.
- Clarke, G. e J.W. Wright (1964) Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, Vol. 12, p. 568-581.
- Dror M. e M. Ball (1987) Inventory/Routing: Reduction from an Annual to a Short-Period Problem. *Naval Research Logistics*, Vol. 34, p. 891-905.
- Dror M. e L. Levy (1986) A Vehicle Routing Improvement Algorithm Comparison of a “Greedy” and a Matching Implementation for Inventory Routing. *Computers and Operations Research*, Vol. 13, No. 1, p. 33-45.
- Fisher M. e R. Jaikumar (1981) A Generalized Assignment Heuristic for Vehicle Routing. *Networks*, Vol. 11, p. 109-124.
- Gallego, G. e D. Simchi-Levi (1990) On the Effectiveness of Direct Shipping Strategy for the One-Warehouse Multi-Retailer R-Systems. *Management Science*, Vol. 36, No.2, p.240-243.
- Hall, R.W. (1985) Determining Vehicle Dispatch Frequency when Shipping Frequency Differs among Suppliers. *Transportation Research*, Vol. 19B, p.421-431.
- Hall, R.W. (1991) Comments on “One-warehouse multiple retailer systems with vehicle routing costs”. *Management Science*, Vol. 37, No.11, p.1496-1497.
- Herer, Y.T. e R. Levy (1997) The metered inventory routing problem, an integrative heuristic algorithm. *International Journal of Production Economics*, v. 51, p. 69-81.
- Larson R.C. (1988) Transporting Sludge to the 106-Mile Site: An Inventory/Routing Model for Fleet Sizing and Logistics System Design. *Transportation Science*, Vol. 22, p. 186-198.
- Lee, H.L. e S. Nahmias (1993) Single-Product, Single-Location Models. In: *Handbooks in Operational Research and Management Science*, Vol. 4: *Logistics of Production and Inventory*, S.C. Graves, A.H.G. Rinnooy Kan, P.H. Zipkin (eds), North-Holland, p. 3-55.
- Lee, H.L. e V. Padmanabhan e S. Whang (1997) Information distortion in a supply chain: the bullwhip effect. *Management Science*, v. 43, No. 4, p. 546-558.
- Muckstadt, J.A. e R.O. Roundy (1993) Analysis of Multistage

- Production Systems. In: *Handbooks in Operational Research and Management Science, Vol. 4: Logistics of Production and Inventory*, S.C. Graves, A.H.G. Rinnooy Kan, P.H. Zipkin (eds), Noth-Holland, p. 59-131.
- Speranza, M.G. e W. Ukovich (1994) Minimizing Transportation and Inventory Costs for Several Products on a Single Link. *Operations Research*, Vol. 42, No. 5, p. 879-894.
- Stalk, G. e P. Evans e L.E. Shulman (1992) Competing on capabilities: the new rules of corporate strategy. *Harvard Business Review*, Vol. 70, No. 2, p. 57-69.
- Webb, I.R. e R.C. Larson (1995) Period and phase customer replenishment: A new approach to the Strategic Inventory / Routing Problem. *European Journal of Operational Research*, Vol. 85, p. 132-148.

CONTATOS

¹Nome: Andrei Znamensky
E-mail: az.2001@ig.com.br

²Nome: Cláudio barbieri da Cunha
E-mail: cbcunha@usp.br