

PROPOSTA DE UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS INCORPORANDO CUSTOS DE TRANSPORTE

Elisia Teresinha Engelmann

Gláucia Michel de Oliva

Laboratório de Sistemas de Transportes - LASTRAN

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção – PPGE

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

RESUMO

A tomada de decisão integrada pode ser considerada a chave para efetivar o gerenciamento da cadeia de suprimentos. Este artigo é dividido em três partes. Na primeira, apresenta-se uma revisão sobre modelos de gerenciamento da cadeia de suprimentos. Na segunda é apresentada a revisão de um modelo de planejamento que incorpora custos de transporte nas decisões de ressuprimento. Na última parte é apresentada uma proposta de modelo de otimização para a tomada de decisão integrada no gerenciamento da cadeia de suprimentos, incorporando custos de transporte na determinação da quantidade ótima de pedido para os diversos níveis da cadeia e algumas considerações finais.

ABSTRACT

The integrated decision making can be considered the key for the effectiveness of the supply chain management. This paper is divided in three parts. The first one describes a supply chain management models review. The second one describes a review of a planning model that incorporates transportation costs in the replenishment decisions. In the last one is described an optimization model propose for the integrated decision making in the supply chain management, regarding the transportation costs in the economic order quantity determination for all the chain levels and some final considerations.

1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento da cadeia de suprimentos, ou *Supply Chain Management - SCM*, é uma área de conhecimento rica em desafios que tem atraído crescente interesse de economistas, administradores, engenheiros, matemáticos, entre outros profissionais. O principal desafio imposto pelo *SCM* consiste, basicamente, em criar estruturas integradas de tomada de decisão cujo universo de abrangência encerra múltiplas organizações, muitas vezes com interesses contraditórios.

Uma estrutura integrada de tomada de decisão deve ser realizada por meio da administração compartilhada de processos-chave de negócios, que interligam as diversas unidades organizacionais da cadeia, exigindo uma eficiente coordenação funcional e temporal de empresas e clientes.

O desafio da integração presente no *SCM* pode ser enfrentado considerando a cadeia de suprimentos como uma entidade única, cujos programas de planejamento e de atuação têm sido modelados nas mais diversas áreas de interesse, com vistas à otimização global do sistema. Existem na literatura vários tipos de abordagens para modelar o planejamento conjunto e colaborativo da cadeia de suprimentos. Contudo, poucos são os modelos de planejamento conjunto que consideram o custo total de transporte como variável relevante na decisão sobre a quantidade ótima de pedido em cada um dos níveis da cadeia.

O objetivo deste artigo consiste em apresentar uma proposta de modelo de planejamento integrado de uma cadeia de suprimentos de três níveis, considerando o custo de transporte em cada um dos níveis como uma variável relevante na determinação das respectivas quantidades ótimas de pedido, de modo a otimizar a lucratividade total da cadeia. Na modelagem proposta são utilizadas as funções de custo especificadas por Swenseth e Godfrey (2002) em um

modelo geral de planejamento de uma cadeia de suprimentos, seguindo o modelo de Perea-López *et al.* (2003).

Na próxima seção é feita uma breve revisão sobre modelos de planejamento na cadeia de suprimentos. Na seção 3 apresenta-se o modelo de Swenseth e Godfrey (2002), que envolve custo de transporte nas decisões de ressuprimento apenas no nível de decisão do varejista. Na seção 4 desenvolve-se uma proposta de extensão do modelo de Swenseth e Godfrey (2002) para uma cadeia de três níveis, de modo que as decisões tomadas em cada um dos níveis influenciam as decisões nos outros níveis, em todos os períodos de planejamento. Por último são apresentadas algumas considerações sobre o tema.

2. MODELOS DE GERENCIAMENTO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

Os modelos de *SCM* são geralmente desenvolvidos por meio de técnicas convencionais de modelagem, incluindo programação matemática, simulações, heurísticas e ferramentas estatísticas e probabilísticas. A grande maioria desses modelos aborda problemas de gerenciamento da cadeia de suprimentos nos diferentes níveis de planejamento: estratégico, tático e operacional.

Os modelos de planejamento estratégico envolvem decisões de longo prazo, como: localização de instalações físicas (Min e Melachrinoudis, 1999), seleção de modos de transporte (Eskigun *et al.*, 2004), seleção de fornecedores (Dulmin e Mininno, 2003). Os modelos de planejamento tático são desenvolvidos para abordar decisões de médio prazo, como: planejamento e controle de estoques (Abuo-El-Ata *et al.*, 2003), utilização de veículos (Chan *et al.*, 2002). Os modelos de planejamento operacional envolvem decisões de curto prazo, como: medidas de desempenho da demanda (Sabri e Beamon, 2000), avaliação do serviço de carregamento/descarregamento (Holt, 2000), entre outros.

Com relação ao planejamento tático, os modelos desenvolvidos na área de estoque e de transporte têm dado grande ênfase ao nível de serviço ao consumidor, enquanto simultaneamente procuram minimizar níveis de estoque e seus custos associados. A grande maioria desses modelos tem como característica a determinação da quantidade ótima de pedido, sem considerar o custo de transporte como uma variável que possa vir a influenciar o processo de tomada de decisão. Essa característica foi apontada no estudo desenvolvido por Carter e Ferrin (1995) onde os autores mostraram que, sem considerar os custos de transporte, a otimização conjunta comprador/fornecedor pode resultar em custos totais anuais maiores que o caso da otimização individual. Segundo Dornier *et al.* (2000), as decisões baseadas em otimizações individuais podem gerar falhas de compreensão sobre o impacto que exercem em toda a cadeia de suprimentos. Conforme os autores, um exemplo clássico é o surgimento do efeito chicote na cadeia de suprimentos, amplamente abordado por meio do jogo da cerveja – *beer game*.

Van Eijs (1994) desenvolveu uma heurística para um sistema de estoque composto de vários itens, onde considerou o custo de transporte como função das taxas de frete, do volume transportado e da capacidade de um *container* padrão. A heurística utilizada baseou-se nas trocas compensatórias entre custo de transporte, custo de pedido e custo de manutenção. Com os resultados numéricos observou que o custo total pode ser substancialmente reduzido (em mais de 20%) a partir de decisões integradas sobre planejamento de pedido e de transporte.

Swenseth e Godfrey (2002) desenvolveram uma heurística de cálculo de tamanho de lote de compra onde consideraram o custo de transporte como uma variável relevante para o processo de tomada de decisão. Os resultados mostraram que o fato de considerar ou não o custo de transporte como variável relevante pode influenciar significativamente no processo de tomada de decisão. Contudo, o modelo desenvolvido pelos autores considerou apenas o custo total de uma empresa, sem levar em conta o custo total da cadeia como um todo.

Entre os trabalhos em que foram desenvolvidos modelos considerando os custos totais da cadeia, estão os de Ganeshan (1999), Geunes e Zeng (2001) e Cakravastia *et al.* (2002). Perea-López *et al.* (2003) apresentaram um modelo mais completo que os anteriormente citados, pois consideraram todos os estágios de uma determinada cadeia de suprimentos interligados por uma única função de lucro. Entretanto, novamente o tamanho do lote de compra não foi influenciado pelo custo de transporte.

3. O CUSTO DE TRANSPORTE NO MODELO DE SWENSETH E GODFREY (2002)

Swenseth e Godfrey (2002) desenvolveram um estudo onde demonstraram que as tradicionais funções de custo de transporte disponíveis na literatura podem ser incorporadas nas decisões de ressuprimento, sem comprometer a precisão da decisão e sem adicionar complexidades ao processo de tomada de decisão. Os autores desenvolveram uma heurística de decisão onde o tamanho ótimo de lote é escolhido a partir dos cálculos obtidos por meio de três formas distintas.

A primeira delas refere-se ao modelo tradicional de lote econômico que deriva da função de custo logístico anual. Esse custo é constituído pelo custo de manutenção de estoque (primeira parcela da equação (1)) e pelo custo de realizar um pedido de um produto individualmente (segunda parcela da equação (1)). Acrescentando-se uma taxa fixa de custo de transporte (terceira parcela da equação (1)) obtém-se a função de custo logístico total anual. A equação de custo logístico total anual (L) do modelo tradicional é:

$$L = \frac{QC_h}{2} + \frac{RC_0}{Q} + F_y R_w \quad (1)$$

em que

- Q: quantidade de pedido (unidades);
- C_h: custo de manutenção de uma unidade do produto em estoque por um ano, ($Ch = C * i$), onde C é o custo por unidade, e i é a taxa de custo de manutenção do produto em estoque);
- R: taxa anual de demanda (unidades);
- C₀: custo do pedido;
- F_y: taxa de frete para uma dada faixa de peso y, em uma rota;
- w: peso unitário do produto.

A quantidade ótima de pedido, *Economic Order Quantity - EOQ*, derivada a partir da função de custo logístico (1) corresponde a:

$$Q = \sqrt{\frac{2RC_0}{C_h}} \quad (2)$$

Esse resultado mostra que um custo logístico assim considerado tem o mesmo efeito que não incorporar as taxas de frete ao modelo.

É importante ressaltar que pelo fato das taxas de frete serem inversamente proporcionais à carga, considerá-las como variáveis que influenciam a decisão sobre o tamanho do pedido pode resultar em economias de custo. Por esse motivo os autores especificaram as funções de taxa de frete ajustadas para cargas maiores (*TL – truckload*) e para cargas menores (*LTL – less-than-truckload*).

A função de taxa de frete para cargas *TL* é dada por:

$$F_y = \frac{F_x W_x}{W_y} \quad (3)$$

em que F_x : taxa de frete para um caminhão de determinada capacidade;
 W_x : capacidade do caminhão;
 W_y : quantidade a ser carregada (corresponde a quantidade de pedidos em unidades (*Q*) multiplicada pelo peso por unidade (*w*)).

Com a substituição de (3) em (1) obtém-se uma nova função de custo total:

$$L = \frac{QC_h}{2} + \frac{RC_0}{Q} + \left[\frac{F_x W_x}{W_y} \right] R w \quad (4)$$

que corresponde a:

$$L = \frac{QC_h}{2} + \frac{RC_0}{Q} + \left[\frac{F_x W_x}{Q} \right] R \quad (5)$$

A segunda forma de cálculo da quantidade ótima de pedido é obtida pela derivada da função de custo total (5), denominada pelos autores de modelo ajustado para cargas *TL*:

$$Q = \sqrt{\frac{2R(C_0 + F_x W_x)}{C_h}} \quad (6)$$

Este modelo essencialmente adiciona as características de uma carga *TL* ao custo de colocar um pedido na determinação da quantidade ótima.

Para o caso de cargas *LTL*, a função de custo de frete apresentada é:

$$F_y = F_x + \alpha F_x \left[\frac{W_x - W_y}{W_y} \right] \quad (7)$$

em que α : constante entre 0 e 1.

Com a substituição de (7) em (1) obtém-se a função de custo total para cargas *LTL*, denominado de modelo ajustado para cargas *LTL*:

$$L = \frac{QC_h}{2} + \frac{RC_0}{Q} + \left[F_x + \alpha F_x \left[\frac{W_x - W_y}{W_y} \right] \right] R w \quad (8)$$

que corresponde a:

$$L = \frac{QC_h}{2} + \frac{RC_0}{Q} + \left[F_x + \alpha F_x \left[\frac{W_x - Q w}{Q w} \right] \right] R w \quad (9)$$

Logo, a terceira forma de cálculo de quantidade ótima de pedido, construída para o caso de cargas *LTL* é dada por:

$$Q = \sqrt{\frac{2R(C_0 + \alpha F_x W_x)}{C_h}} \quad (10)$$

A heurística de decisão de quantidade ótima de pedido consiste na comparação e escolha entre os valores das quantidades obtidas em cada um dos três casos, conforme o procedimento de solução ilustrado na Figura 1.

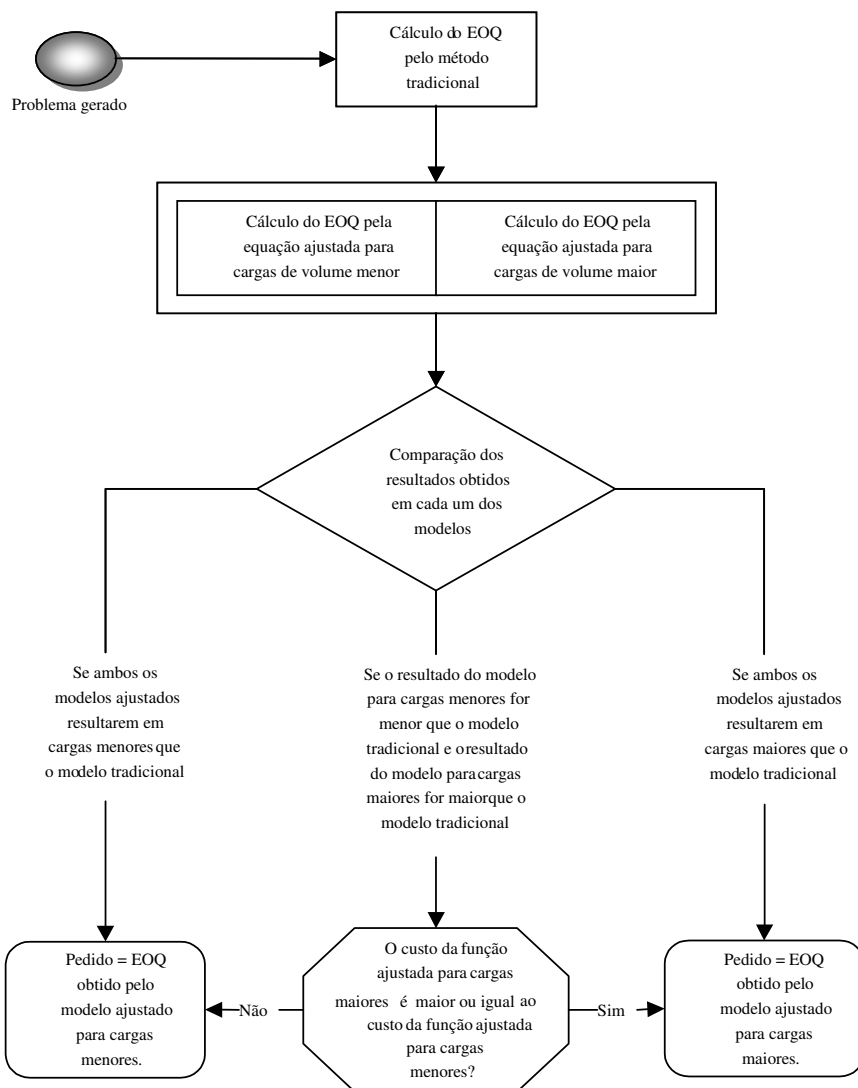


Figura 1 : Seqüência do processo heurístico do modelo de Swenseth e Godfrey (2002)

Os autores concluíram que a partir do conhecimento do impacto decorrente da incorporação da função adequada de taxa de frete na tomada de decisões de ressuprimento é possível

incorporar funções similares em modelos alternativos que possam ter um melhor ajuste com suas aplicações particulares. A partir dessas conclusões, e da constatação da escassez de trabalhos que incorporam o custo de transportes nas decisões de compra, considera-se oportuno apresentar uma proposta de modelo de planejamento integrado de uma cadeia de suprimentos de três níveis, com a implementação das funções de custo propostas por Swenseth e Godfrey (2002).

4. PROPOSTA DE MODELAGEM

O modelo aqui proposto é de uma cadeia de suprimentos constituída de três níveis: varejista, distribuidor e fornecedor. Tem como característica principal considerar o custo de transporte na determinação da quantidade ótima de pedido para cada nível da cadeia, em cada período, de forma a minimizar o custo total da cadeia, ao mesmo tempo em que mantém o nível de serviço desejado em cada um dos níveis da cadeia. Esse tipo de modelagem visa otimizar a lucratividade total da cadeia, considerando a participação dos diferentes níveis na tomada de decisão. O modelo é especificado de forma a permitir que no processo de decisão possam ser considerados vários critérios para otimização, representando os diferentes pontos de vista dos interessados no processo, inclusive dos transportadores.

Utilizando como base o modelo desenvolvido por Swenseth e Godfrey (2002), e considerando que os custos de cada nível da cadeia de suprimentos são dados por L_{ij} (custo total do nível j para quantidade da fórmula i), o objetivo do modelo é encontrar a quantidade ótima de pedido para cada nível, em cada período, maximizando a lucratividade total da cadeia (π_c) que é dada por:

$$MAX\pi_c = \sum_i^N SP_v * Y_v(t) - \sum_i^N \sum_j^N \sum_t^N A_{ij}(t) * L_{ij}(t) - \sum_t^N L_f(t) \quad (11)$$

em que

- i: índice que indica a fórmula a ser utilizada para o cálculo do custo (1,2,3);
- j: índice que indica o nível (varejista – v, distribuidor – d);
- t: número de períodos, $t = 1, 2, 3, \dots, N$;
- N: número total de períodos;
- $L_{ij}(t)$: custo total do nível j para quantidade da fórmula i , no período t ;
- $L_f(t)$: custo total do fornecedor no período t ;
- $A_{ij}(t)$: constante binária que indica qual das fórmulas i de cálculo de tamanho de lote é utilizada para cada nível j , em cada período t ;
- $Y_v(t)$: vendas do varejista no período t ;
- SP_v : preço de venda do varejista;
- π_c : lucratividade da cadeia.

A primeira parcela da equação (11) representa o somatório das receitas provenientes das vendas do varejista ao consumidor final, durante todo o período de planejamento. A segunda parcela, composta por um somatório em i , j e t , representa a soma do custo total do varejista e do distribuidor (somatório em j) para todos os períodos (somatório em t). O somatório em i de $A_{ij}(t) * L_{ij}(t)$ representa a escolha de uma das três funções i de cálculo de custo total, para cada nível j (varejista ou distribuidor), em cada período t . A escolha da função ocorre da seguinte maneira: dadas as funções i de cálculo de custo total para cada nível j apresentadas nas equações (12) a (17), o otimizador, sujeito às restrições e à função objetivo, escolherá – nenhuma das funções, no caso em que não for necessário realizar o pedido; uma delas quando

for necessário realizar o pedido. A terceira parcela é constituída pelo somatório em t do custo total associado ao fornecedor, representados pela equação (18).

$$L_{1v}(t) = \frac{Y_d(t) * C_{hv}}{2} + \frac{Y_v(t) * C_{ov}}{Q_{1v}(t)} + F_y * Y_d(t) * w \quad (12)$$

$$L_{2v}(t) = \frac{Y_d(t) * C_{hv}}{2} + \frac{Y_v(t) * C_{ov}}{Q_{1v}(t)} + \frac{F_x * W_x}{Y_d(t)} \quad (13)$$

$$L_{3v}(t) = \frac{Y_d(t) * C_{hv}}{2} + \frac{Y_v(t) * C_{ov}}{Q_{1v}(t)} + \left(F_x + \alpha * F_x * \left(\frac{W_x - Y_d(t) * w}{Y_d(t) * w} \right) \right) * w \quad (14)$$

$$L_{1d}(t) = \frac{Y_f(t) * C_{hd}}{2} + \frac{Y_d(t) * C_{od}}{Q_{1d}(t)} + F_y * Y_f(t) * w \quad (15)$$

$$L_{2d}(t) = \frac{Y_f(t) * C_{hd}}{2} + \frac{Y_d(t) * C_{od}}{Q_{1d}(t)} + \frac{F_x * W_x}{Y_f(t)} \quad (16)$$

$$L_{3d}(t) = \frac{Y_f(t) * C_{hd}}{2} + \frac{Y_d(t) * C_{od}}{Q_{1d}(t)} + \left(F_x + \alpha * F_x * \left(\frac{W_x - Y_f(t) * w}{Y_f(t) * w} \right) \right) * w \quad (17)$$

$$L_f(t) = \beta * Q_f(t) \quad (18)$$

em que:

- C_{hv} : custo de manutenção de uma unidade no estoque por um período t, para o varejista;
- C_{hd} : custo de manutenção de uma unidade no estoque por um período t, para o distribuidor;
- $R(t)$: demanda observada no período t;
- C_{0v} : custo do pedido do varejista;
- C_{0d} : custo do pedido do distribuidor;
- $Y_d(t)$: nível de vendas do distribuidor no período t;
- $Y_f(t)$: nível de vendas do fornecedor no período t;
- β : custos do fornecedor por unidade;
- $Q_{ij}(t)$: quantidade ótima de pedido da fórmula j, para o nível i, no período t;
- $Q_f(t)$: quantidade disponibilizada pelo fornecedor;
- $A_{ij}(t)$: variável binária (0 ou 1).

As funções de custo total do varejista e do distribuidor $L_{ij}(t)$, acima apresentadas, correspondem às equações (1), (5) e (9) do modelo de Swenseth e Godfrey (2002). Estas equações foram ajustadas para atender as características do novo modelo proposto.

Na primeira parcela de cada equação de $L_{ij}(t)$, que representa os custos de armazenagem, foram realizados ajustes na quantidade de pedido Q e no custo de manutenção C_h . Em relação à quantidade de pedido, o ajuste foi necessário, uma vez que é considerada a possibilidade de o pedido não ser plenamente atendido. Isso significa que as vendas podem não satisfazer toda a demanda. Logo, as quantidades armazenadas pelo varejista, dependerão, das vendas do distribuidor (Q substituído por $Y_d(t)$). De modo análogo, as quantidades armazenadas pelo distribuidor dependerão das vendas do fornecedor (Q substituído por $Y_f(t)$). Quanto ao custo de manutenção C_h , este apenas foi alterado na nomenclatura para C_{hv} e C_{hd} para permitir diferentes custos de manutenção, tanto para o varejista quanto para o distribuidor.

Na segunda parcela das equações (12) a (17), que representa o custo de pedido, a demanda R que na função original corresponde às vendas, foi substituída pelas vendas do varejista em $L_{iv}(t)$ e pelas vendas do distribuidor em $L_{id}(t)$. O custo de pedido C_0 foi alterado na nomenclatura para C_{0v} e C_{0d} para permitir diferenças nos custos de pedido do varejista e do distribuidor. O mesmo foi feito com a quantidade Q , que foi alterada para $Q_{iv}(t)$ e $Q_{id}(t)$.

Na terceira parcela das equações (12) a (17), que corresponde ao custo de transporte entre os níveis, considerou-se que este custo é suprido pelo nível que compra o produto. Assim, as vendas do distribuidor em cada período geram um custo de transporte para o varejista e as vendas do fornecedor em cada período, geram-no para o distribuidor. A demanda total R presente no modelo de Swenseth e Godfrey (2002) não aparece mais no novo modelo proposto devido ao fato de que o custo é calculado periodicamente.

As quantidades ótimas de pedido do varejista e do distribuidor $Q_{ij}(t)$, e a quantidade do fornecedor $Q_f(t)$ para cada período t , são dadas por:

$$Q_{1v}(t) = \sqrt{\frac{2 * R(t) * C_{0v}}{C_{hv}}} \quad (19)$$

$$Q_{2v}(t) = \sqrt{\frac{2 * R(t) * (C_{0v} + F_x * W_x)}{C_{hv}}} \quad (20)$$

$$Q_{3v}(t) = \sqrt{\frac{2 * R(t) * (C_{0v} + \alpha * F_x * W_x)}{C_{hv}}} \quad (21)$$

$$Q_{1d}(t) = \sqrt{\frac{2 * \left(\sum_i A_{iv}(t) * Q_{iv}(t) \right) * C_{0d}}{C_{hd}}} \quad (22)$$

$$Q_{2d}(t) = \sqrt{\frac{2 * \left(\sum_i A_{iv}(t) * Q_{iv}(t) \right) * (C_{0d} + F_x * W_x)}{C_{hd}}} \quad (23)$$

$$Q_{3d}(t) = \sqrt{\frac{2 * \left(\sum_i A_{iv}(t) * Q_{iv}(t) \right) * (C_{0d} + \alpha * F_x * W_x)}{C_{hd}}} \quad (24)$$

$$Q_f(t) = \sum_i A_{id}(t) * Q_{id}(t) \quad (25)$$

As equações (19), (20) e (21) representam a quantidades ótima de pedido do varejista para cada função i e correspondem às equações (2), (6) e (10) respectivamente, com a nomenclatura ajustada ao novo modelo proposto. O mesmo é válido para equações (22), (23) e (24), que representam a quantidade ótima de pedido do distribuidor. Nessas últimas, a demanda R do modelo inicial corresponde ao pedido do varejista para o distribuidor em cada período, dado pelo somatório em i de $A_{iv}(t) * Q_{iv}(t)$. Este somatório corresponde à escolha realizada pelo otimizador da quantidade ótima de pedido i do varejista, que será efetivada para cada período. Admite-se que pode haver períodos em que nenhuma quantidade de pedido seja efetivada.

A equação (25) corresponde à quantidade que o fornecedor disponibilizará ao distribuidor. Admite-se neste modelo que o fornecedor terá um nível de produção em cada período igual à quantidade de pedido realizado pelo distribuidor.

Dadas as equações de definição do modelo, apresenta-se abaixo o conjunto de restrições:

$$\sum_i A_{ij}(t) \leq 1 \quad (26)$$

$$I_v(t+1) = I_v(t) + Y_d(t+1) - Y_v(t+1) \quad (27)$$

$$I_v(t) \leq \text{Cap}_v \quad (28)$$

$$Y_v(t) \leq R(t) \quad (29)$$

$$Y_v(t+1) \leq I_v(t) + Y_d(t+1) \quad (30)$$

$$I_d(t+1) = I_d(t) + Y_f(t+1) - Y_d(t+1) \quad (31)$$

$$I_d(t) \leq \text{Cap}_d \quad (32)$$

$$Y_d(t+1) \leq \sum_i A_{iv}(t) * Q_{iv}(t) \quad (33)$$

$$Y_{us_v}(t) = R(t) - Y_v(t) \quad (34)$$

$$Y_{us_v}(t) \leq \phi_v * R(t) \quad (35)$$

$$Y_{us_d}(t+1) = \sum_i A_{iv}(t) * Q_{iv}(t) - Y_d(t+1) \quad (36)$$

$$Y_{us_d}(t) \leq \phi_d * \sum_i A_{iv}(t) * Q_{iv}(t) \quad (37)$$

$$Y_d(t+1) \leq I_d(t) + Y_f(t+1) \quad (38)$$

$$Y_f(t+1) \leq Q_f(t) \quad (39)$$

$$I_f(t) \leq \text{Cap}_f \quad (40)$$

em que

- $I_v(t)$: nível de estoque do varejista no período t ;
- Cap_v : capacidade de armazenagem do varejista;
- $Y_{us_v}(t)$: vendas perdidas do varejista;
- ϕ_v : constante entre 0 e 1;
- $I_d(t)$: nível de estoque do distribuidor no período t ;
- Cap_d : capacidade de armazenagem do distribuidor;
- $Y_{us_d}(t)$: vendas perdidas do distribuidor;
- ϕ_d : constante entre 0 e 1;
- $I_f(t)$: nível de estoque do fornecedor no período t ;
- Cap_f : capacidade de produção e armazenagem do fornecedor

No conjunto de restrições dado acima, a equação (26) representa a efetivação ou não do pedido em cada período t , para cada nível j (varejista e distribuidor). As equações (27) e (31) representam o equilíbrio de estoque do varejista e do distribuidor respectivamente, em cada período $(t+1)$ que é dado em função dos estoques no período t , adicionado das quantidades recebidas em $(t+1)$, ou seja das vendas do distribuidor e do fornecedor respectivamente, e subtraídas das vendas realizadas no período $(t+1)$.

As equações (28), (32) e (40) representam as restrições de capacidade de armazenagem do varejista, distribuidor e fornecedor, respectivamente. As equações (29), (33) e (39) estabelecem que as vendas de cada nível, no período $(t+1)$, são menores ou iguais aos pedidos recebidos no período t . As vendas no período $(t+1)$ para o varejista e o distribuidor dependem da disponibilidade de estoque no período t e dos pedidos efetivados (vendas do nível superior) no período $(t+1)$, o que é demonstrado nas equações (30) e (38), respectivamente. Para o fornecedor, as vendas dependem da quantidade disponibilizada (equação (39)).

Ainda tem-se como restrição do modelo o nível máximo de vendas perdidas em cada período t , admitido para o varejista e o distribuidor, apresentado nas equações (35) e (37). Este nível máximo de vendas perdidas é representado como um percentual dos pedidos recebidos para cada nível. As vendas perdidas em cada nível i são dadas pelas equações (34) e (36) e correspondem às quantidades de pedidos recebidos subtraídos das vendas realizadas.

O problema pode ser resumido como segue: dada uma cadeia de suprimentos e a correspondente demanda do consumidor final sobre um horizonte de tempo que consiste em intervalos discretos, a meta é definir para cada nível da cadeia o tamanho ótimo de cada pedido, os níveis de estoque em cada período e as vendas, de forma a maximizar a lucratividade total mantendo o nível de serviço desejado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo proposto fornece como resposta as séries temporais de tamanho ótimo de pedido, níveis de estoque e vendas, de modo a satisfazer as restrições impostas pelo sistema ao mesmo tempo que maximiza a lucratividade da cadeia. No entanto, pelo fato de ser um modelo dinâmico, é importante que se realize a análise de sua estabilidade tornando-se essencial entender a resposta do sistema a pequenas variações nas condições iniciais do modelo. Atualmente, tem-se na bibliografia como sugestão para efetuar este tipo de análise, o cálculo de funções de transferência (Disney e Towill, 2002).

Nesse sentido, considera-se oportuno para dar continuidade ao modelo proposto, efetuar o cálculo de suas funções de transferência. A partir deste cálculo, além de avaliar a reação do sistema a pequenas alterações nas condições iniciais, pode-se obter uma descrição mais detalhada das contribuições individuais de cada nível na lucratividade total da cadeia.

REFERÊNCIAS

- Abuo-El-Ata, M.O.; H. A. Fergany e M. F. El-Wakeel (2003) Probabilistic multi-item inventory model with varying order cost under two restrictions: A geometric programming approach. *International Journal of Economics*, 83, p. 223-231.
- Cakravastia, A.; I. S. Toha, e N. Nakamura (2002) A two-stage model for the design of supply chain networks. *International Journal of Production Economics*, v. 80, p. 231-248.
- Carter, J.R. e B.G. Ferrin (1995) The impact of transportation costs on supply chain management. *Journal of Business Logistics*, v. 16, n. 1, p. 189-212.
- Chan, L.M.A.; A. Muriel; Z.J.M. Shen; D. Simchi-Levi e C.P. Teo (2002) Effective Zero-Inventory-Ordering Policies for the Single-Warehouse Multiretailer Problem with Piecewise Linear Cost Structures. *Management Science*, v. 48, n. 11, p. 1446-1460.
- Disney, S.M. e D.R. Towill (2002) A discrete transfer function model to determine the dynamic stability of a vendor managed inventory supply chain. *International Journal of Production Research*, v. 4, n. 1, p. 179-204.
- Dornier, P.; R. Ernst; M. Fender e P. Kouvelis (2000) *Logística e Operações Globais: textos e casos*. São Paulo, Atlas, 721p.
- Dulmin, R. e V. Mininno (2003) Supplier selection using a multi-criteria decision aid method. *Journal of Purchasing and Supply Management*, v. 9, p. 177-187.

- Eskigun, E.; R. Uzsoy; P.V. Preckel; G. Beaujon; S. Krishnan e J.D. Tew (2004) Outbound supply chain network design with mode selection, lead times and capacitated vehicle distribution centers. *European Journal of Operational Research*, [s.v.], [s.p.].
- Ganeshan, R. (1999). Managing supply chain inventories: A multiple retailer, one warehouse, multiple supplier model. *International Journal of Production Economics*, v. 59, p. 341-354.
- Geunes, J. e A.Z. Zeng (2001). Impacts of inventory shortage policies on transportation requirements in two-stage distribution system. *European Journal of Operational Research*, v. 129, p. 299-310.
- Holt, K.F. (2000) Evaluating the trade-off between the level of customer service and transportation costs in a ship scheduling problem. *Maritime Policy & Management*, v. 27, n. 2, p. 145-153.
- Min, H. e E. Melachrinoudis (1999). The relocation of a hybrid manufacturing/distribution facility from supply chain perspectives: a case study. *Omega*, v. 27, p. 75-85.
- Perea-López, E.; B.E. Ydstie e I.E. Grossmann (2003). A model predictive control strategy for supply chain optimization. *Computers and Chemical Engineering*, v. 27, p. 1201-1218.
- Sabri, E.H. e B.M. Beamon. (2000) A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega*, v. 28, p. 581-598.
- Swenseth, S.R. e M.R. Godfrey (2002) Incorporating transportation costs into inventory replenishment decisions. *International Journal of Production Economics*, v. 77, p. 113-130.
- Van Eijs, M.J.G. (1994) Multi-item inventory systems with joint ordering and transportation decisions. *International Journal of Production Economics*, v. 35, p. 285-292.

Endereço dos Autores

Laboratório de Sistemas de Transportes
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Praça Argentina, 09, sala 408
CEP 90040-020 – Porto Alegre – RS
Telefone: 51 3316 3596/ Fax 21 3316 4007
E-mail: elisia@producao.ufrgs.br
gmichel@producao.ufrgs.br