

**MODELO INTEGRADO DE DISTRIBUIÇÃO E ESTOQUE: UM ESTUDO DE CASO EM UMA
EMPRESA DE TELECOMUNICAÇÕES****Diego Armando Soto De la vega**

Ms(e) Engenheira de Produção, Universidade Federal de São Carlos
Rodovia João Leme dos Santos (SP-264), Km 110 Bairro do Itinga, Sorocaba – SP, Brasil
die-soto@hotmail.com

José Geraldo Vidal Vieira

Prf. Dr. em Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos
Rodovia João Leme dos Santos (SP-264), Km 110 Bairro do Itinga, Sorocaba – SP, Brasil
jose-vidal@ufscar.br

Eli Angela Vitor Toso

Prfa. Dra. em Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos
Rodovia João Leme dos Santos (SP-264), Km 110 Bairro do Itinga, Sorocaba – SP, Brasil
eli@ufscar.br

RESUMEN

Este artigo apresenta um modelo de otimização integrado para distribuição e estoque de equipamentos em uma empresa de telecomunicações. A rede de distribuição em questão é composta por um conjunto de centros de distribuição que servem a um conjunto de pontos de distribuição com demanda definida. O problema consiste em determinar como distribuir a carga dentro das alternativas de transporte disponível (embarques *full truckload*-FTL e *less than truckload*-LTL) para satisfazer as demanda com o objetivo de minimizar os custos de transporte, de manutenção de estoque, de estoque de segurança e de manter estoque em trânsito. Para gerenciar o inventário, um nível de estoque de segurança é mantido em cada ponto de distribuição baseado em um sistema de revisão periódica semanal. Um estudo de caso foi abordado para demonstrar a eficácia da modelagem proposta. Os resultados mostram que o modelo matemático é uma representação válida do problema real obtendo bons resultados em tempos computacionais aceitáveis para a empresa.

PALABRAS CLAVE. Problema de distribuição, Gestão de inventario, Programação inteira.

ABSTRACT

This article deals with the integration of a distribution problem and inventory. The distribution network in matter is composed by a set of distribution centers which serve to a set of cluster with a normally distributed demand. The problem is to determine how to distribute the load within the available transportation alternatives (truckload and less than truckload shipments) to satisfy the demand points minimizing transportation costs, maintenance costs, inventory, inventory costs and safety keep inventory in transit. To manage inventory, a level of safety stock is held in each cluster based on a system of weekly periodic review (R, S). Introduction of inventory decisions to the distribution model carries to a NP Hard optimization problem. A linear mixed integer model is proposed and an industrial application is discussed to demonstrate the effectiveness of the proposed optimization approach.

KEYWORDS. Distribution problem, Inventory management, Integer programming.

1. Introdução

As empresas embarcadoras têm como uma das principais preocupações atender às necessidades diversas de consumo a um menor custo logístico. A logística tem o desafio de conciliar a capacidade de resposta desse atendimento, por meio da utilização eficiente dos modais de transporte, com baixos níveis de estoques nos canais de distribuição. Entretanto, considerar a redução de custos de transporte e custos de inventário em separado pode não contribuir para a redução do custo total da logística no canal de distribuição, devido à relação de conflito entre custos de transporte e inventário. Assim, é desejável a busca de soluções integradas que levem em conta o equilíbrio entre custos de estoque e de transporte (LI ET AL, 2010). É fato que ao manter estoques em pontos intermediários ou finais nos canais, a frequência de viagens, a utilização de modais com capacidade de maior ou menor carga, assim como a agilidade no atendimento urgente, entre outras características de transporte alteram toda a forma de distribuição e, conseqüentemente, de atendimento à demanda.

Apesar da necessidade de integrar estoques e transporte em um único modelo, a maioria dos estudos sobre otimização na rede de distribuição tem focado em um único componente do sistema global, por exemplo: aquisição, produção, transporte, inventário, gestão, entre outros (Liang, 2008). Poucos estudos têm proposto modelos úteis e métodos operacionais que permitem aos gestores otimizar fluxos de mercadorias em canais de distribuição com o objetivo de redução de custos ou melhorar a eficiência do sistema como um todo (GEBENNINI ET AL., 2009), sendo esta a grande motivação desta pesquisa aplicada.

De um lado, os modelos de estoque desenvolvidos para cadeias de suprimentos levam em conta as complexidades dos sistemas de múltiplos níveis de distribuição, mas geralmente falham por não considerar os custos de transporte. Os custos crescentes de petróleo, o congestionamento rodoviário, o custo crescente para atendimento a curtos trajetos, conseqüentemente aumento da frequência de viagens, a dificuldades de acesso, entre outros fatores, são exemplos de problemas que podem aumentar os custos de transporte. Por outro lado, os modelos de transporte têm foco na distribuição física por meio da otimização do fluxo, uso de métodos de roteirização, consideração de diversos modais, entre outros aspectos importantes do transporte urbano de carga. Porém, esses modelos pouco consideram os pontos de estoques ao longo da rede de distribuição (RIEKSTS; VENTURA, 2010).

Existe também um importante *trade-off* entre a minimização dos custos de inventário e maximização do nível de serviço ao cliente. Pois, tradicionalmente, quanto melhores forem os níveis de estoque de segurança (SS) para cada item no *mix* de produtos e para todos os locais de armazenamento na rede de distribuição, portanto maior disponibilidade de produtos, maiores serão os custos de estoques (Gebennini, Gamberini e Manzini, 2009). Esta complexidade leva à aplicação de ferramentas mais sofisticadas para gerar soluções eficientes e viáveis nos canais de distribuição. Além disso, a introdução de inventário e custos de estoque de segurança leva na maioria das vezes a um problema de otimização NP-Hard não linear onde existem limitadas alternativas para o trato eficiente destes problemas (TANONKOU et al, 2006).

O objetivo é apresentar um modelo de otimização integrado para distribuição e estoque de equipamentos de telecomunicações de forma a atender à demanda, às restrições impostas pela Empresa, minimizando os custos de transporte, os custos de manutenção de estoque, de estoque de segurança e de manter estoque em trânsito. O modelo considera embarques do tipo Carga Completa (ou *Full Truckload - FTL*) e Carga Incompleta (ou *Less Than Truckload - LTL*) ou uma combinação destes a partir de centros de distribuição para diferentes pontos de distribuição localizados geograficamente no território brasileiro. O modelo integrado de transporte e estoque desenvolvido para atender às peculiaridades da logística de distribuição da Empresa, assim como às especificidades da composição dos custos FTL e LTL se destaca como a contribuição da pesquisa.

2. Revisão bibliográfica: estudos aplicados a estoques e transporte

Após a formulação do modelo EOQ clássico por Harris (1990), numerosos têm sido os trabalhos que incluíram variáveis e elementos adicionais neste modelo de gestão, ainda levando em conta as decisões conjuntas de estoques e transporte. Neste sentido, algumas pesquisas foram realizadas a partir de um único ponto de distribuição, outras consideraram somente um produto, outras com foco na otimização dos custos de transporte, das rotas de entregas e outras com foco em estoques por meio de minimização de custos e disponibilidade de produto.

Entre os modelos mais antigos de estoques e transporte encontram o de Burns e Hall (1985) que estudaram a minimização do inventário e o custo de transporte por um método de análise que teve apenas um produto, sujeito a um único ponto de início e vários pontos da rede logística sobre demanda incerta. Anily e Federgruen (1990) estudaram um problema de produto único otimizando a rota de transporte com um centro de distribuição e demanda determinística, porém não considerou inventário. Ernst e Pyke (1993) estudaram a distribuição ao varejo, consideraram a demanda aleatória e um centro de distribuição. Baita et al. (1998) apresentaram um problema de roteamento dinâmico que incluiu custos de estoque com um modelo de revisão periódica.

Trabalhos mais recentes buscaram tratar o problema sob a ótica de análise de decisão, envolvendo incerteza e complexidade da logística de distribuição. Neste sentido, Swenseth e Godfrey (2002) incorporaram os custos de transporte no custo total logístico, identificando as funções de custos que emulam a realidade e ao mesmo tempo fornecem uma representação direta dos fretes reais, além de analisarem o erro destas aproximações. Mason (2003) focou no problema de integração de decisões de armazém e transportes, com o objetivo de reduzir o tempo de espera para carga e descarga baseado nas informações de transporte. Zhao et al. (2004) abordaram um problema de lote econômico e frequência de pedido para um sistema de distribuição varejista; além de custos de transporte fixos e variáveis, como apresenta esta pesquisa. Wang (2005) focou na integração ótima do problema de transporte e inventário de múltiplos períodos e um sistema de distribuição com demanda estocástica. Eles formularam um problema não linear inteiro misto de múltiplas camadas de distribuição com uma abordagem de solução heurística, baseada em relaxação Lagrangiana e o método sub-gradiente. Outros modelos não lineares foram propostos por Max Shen e Qi (2007). Viau, Trepanier e Baptiste (2009) propuseram um sistema de apoio à decisão, que poderia estimar as atividades de logística em uma cadeia de distribuição integrada com controle de estoque e o transporte. Seliaman e Ahmad (2008) consideraram o caso de uma cadeia de suprimento de três estágios: fornecedores, fabricantes e varejistas. As decisões de produção e estoque foram feitas pelos fornecedores e a demanda de cada cliente foi assumida como estocástica.

Outros modelos adicionaram o problema de localização e diferentes métodos de solução. Miranda e Garrido (2009) propuseram uma abordagem heurística sequencial para otimizar os níveis de serviço de estoque na cadeia de suprimentos de duas fases. A proposta tratou de aproximação com o nível de serviço e as decisões de inventário, em simultâneo com as decisões de desenho de rede, incorporando os custos de demanda não satisfeita no modelo de inventário-localização. Aryanezhad e Jabbarzadeh (2009) desenvolveram um modelo estocástico de desenho de rede na cadeia de suprimentos, onde existem interrupções aleatórias para os centros de distribuição. O modelo determina a localização dos CDs e atribuições de clientes, a fim de minimizar os custos esperados totais, incluindo os custos de localização, custos de inventário não-lineares, custos de transporte e custos de vendas perdidas e levando em conta as perturbações aleatórias. Um algoritmo genérico foi utilizado para solucionar o problema de forma eficaz.

Além de todos esses importantes, estudos parecidos com a pesquisa proposta foram realizadas para tratar o problema integrado de transporte e estoques sob o ponto de vista tático. Kutanoğlu e Lohiya (2008) desenvolveram recentemente um modelo tático de otimização para o problema integrado de estoque e transporte em um único escalão com múltiplas instalações e restrições de nível de serviço. O objetivo foi minimizar os custos relevantes de inventário e transporte, para o estoque normal e de segurança. O modelo foi capaz de lidar com múltiplos modos de transporte em todo o sistema. Gebennini et al. (2009) trabalharam em um caso real de distribuição de produtos eletrônicos de uma empresa italiana. Uma proposta de modelo de

produção-distribuição integrada para o problema de localização-alocação dinâmica com otimização de estoque de segurança foi proposto. Neste caso, determinou-se os níveis ótimos de estoque de segurança (SS) em todas as instalações de armazenamento disponíveis. Em particular, o custo global logístico foi reduzido em 10%, graças a uma redução do estoque de segurança e a otimização de fluxos de transportes. Li et al. (2010) trabalharam no problema integrado de transporte e estoques na logística da cadeia de suprimentos considerando o custo de transporte, custo de inventário, e custo de venda perdida, escolhendo entre os múltiplos tipos de transporte (com diferente tempo, custo e capacidade de transporte). Os autores mostraram que considerar o modelo integrado fornece melhores soluções para a cadeia de suprimentos do que considerar os problemas isolados. Outros trabalhos semelhantes foram desenvolvidos (Aydinel et al., 2008; Kang e Kim, 2010; Liu e Ye, 2009; Madadi, Kurz e Ashayeri, 2010; Zhao, Chen, Leung, e Lai, 2010). Rieksts e Ventura (2010) discutem modelos de estoque ao longo de um horizonte de planejamento infinito com taxa de demanda constante e dois modos de transporte. Estas opções de transporte incluem embarque full truckload (FTL) e less than truckload (LTL). Um algoritmo ótimo é derivado para um sistema de um armazém e múltiplos varejista. Por outro lado, Tsao e Lu (2012) trabalharam em um modelo que integrou os custos de instalação, custos de estoque, custos de transporte e os custos de encomenda. Os custos de transporte foram definidos em função das quantidades encomendadas, incluído descontos por quantidade.

Embora muitos modelos tenham sido desenvolvidos e várias abordagens de solução tenham sido propostas, poucas são as aplicações práticas que estes têm demonstrado. Na seguinte seção será apresentado um modelo integrado de estoque e distribuição baseado em um sistema real de distribuição de aparelhos de telecomunicações.

3. Descrição do problema

Problemas de Distribuição (DP) envolvem um planejamento de entrega para o transporte de mercadorias desde um depósito até vários clientes. Em geral, rotas são definidas para minimizar o custo de transporte total ou minimizar as distâncias totais. Assim, o DP é normalmente transformado em um problema de roteamento de veículo (VRP) (HO et al, 2008). No caso de um problema mais complexo, as mercadorias são transportadas a partir de um dos vários depósitos para os clientes. Este tipo de problema é chamado de Problema de Distribuição com múltiplos depósitos (MDDP). Resolver estes problemas envolve um elevado tempo computacional ou não é possível obter uma solução em tempo polinomial. Estes problemas são classificados dentro da categoria de problemas NP-hard (NUNKAEW; PHRUKSAPHANRAT, 2010).

Neste trabalho, vários centros de distribuição (CD) devem satisfazer a demanda de um conjunto de clientes dispersos em uma região A, a partir de dois tipos de carregamento: carga completa (ou *Full Truckload* - FTL) e carga incompleta (ou *Less Than Truckload* - LTL). Para efeitos de agregação da demanda, estes clientes são agrupados em clusters (C) por meio de um processo de agrupamento, o qual não faz parte do escopo deste trabalho, logo as demandas dos clientes são agregadas nestes pontos centrais.

Para um carregamento FTL, um custo fixo é constituído para cada carga de até uma determinada capacidade. Para uma dada carga, o custo é independente da quantidade fornecida. Um exemplo de um carregamento FTL é um caminhão que é designado para um cliente específico. O custo devido ao caminhão, motorista, gerenciamento de risco e as despesas operacionais são proporcionais à distância percorridas e qualquer custo variável dependente da quantidade de carga é considerado pouco significativo. Por outro lado, no transporte LTL, o custo é baseado na quantidade embarcada e distância percorrida. Para pequenas quantidades, usando um FTL pode ser mais caro do que o transporte LTL, em contrapartida, um embarque FTL fornece *lead time* menor. Um exemplo de transporte LTL é um usado por prestadores de serviço logístico (ou *Third-party Logistic* - 3PL), como a empresa United Parcel Service (UPS). Ao consolidar cargas de diferentes empresas para o mesmo envio, o 3PL pode transportar comodamente pequenas quantidades com baixos custos (Rieksts e Ventura, 2010).

O problema aqui exposto consiste em determinar a distribuição da carga dentro das alternativas de carregamento disponíveis (FTL e LTL) para satisfazer a demanda dos clusters,

visando minimizar os custos de transporte, os custos de manutenção de estoque, os custos de manter estoque de segurança e os custos de manter estoque em trânsito dentro de um horizonte de planejamento de uma semana.

No problema, os embarques LTL têm vários pontos de interrupção na quantidade enviada em que o custo por unidade diminui. Nesse trabalho um único ponto de quebra é considerado e uma hipótese simplificadora é proposta para trabalhar com custo constante por unidade. Assim, o custo de embarques LTL está constituído por uma fração fixa até o ponto de quebra e uma fração variável depois do ponto.

Um modelo inteiro misto linear é proposto para minimizar os custos associados ao modelo e para garantir um nível de serviço ao cliente definido previamente. Os pressupostos do modelo são os seguintes:

- as demandas dos clusters são independentes e seguem distribuições normais com média e variância conhecidas;
- a política de estoque é por revisão periódica e nível de reposição variável (R, S);
- os custos de faltas não são considerados;
- os custos para o transporte de produtos até os centros de distribuição são suportados pelos fornecedores externos e não é considerado neste modelo;
- os custos de transporte incluem o transporte de unidades desde o centro de distribuição até os clusters. Este custo é definido com os modos de transporte disponíveis FTL, LTL e combinação dessas alternativas.

A notação seguinte será utilizada ao longo deste trabalho:

Grupos, índices e parâmetros.

i	Centros de distribuição ($i = 1, 2, \dots, CD$)
j	Clusters ($j = 1, 2, \dots, CL$)
k	Tipos de transporte FTL ($k = 1, 2, \dots, K$)
t	Período, ($t = 1, 2, \dots, T$)
CD	Numero total de centros de distribuição
CL	Numero total de clusters
K	Numero total de tipos de veículos do carregamento FTL
T	Total de períodos
D_{jt}	Demanda média do cluster j na semana t
σ_{jt}	Desvio padrão da demanda do cluster j na semana t
Dd_j	Demanda diária no cluster j ($D_{jt}/7$)
σDd_j	Desvio padrão da demanda diária no cluster j
C_{ijk}	Custo de atendimento com o veículo k desde o CD i para o cluster j
F_{ij}	Custo fixo por uso de embarque LTL no atendimento do cluster j desde o CD i .
β	Ponto de quebra no qual se incluem custos variáveis por unidade extra no frete LTL.
g_{ij}	Custo variável por unidade após o ponto de quebra no uso do embarque LTL para o atendimento do cluster j desde o centro de distribuição i .
h_j	Custo unitário de manter estoque de segurança no cluster j
IT_j	Custo diário de manter estoque em trânsito para o cluster j
B_k	Capacidade do tipo de veículo $k \in K$.
LT_{FTLij}	Lead time de atendimento com carregamento FTL desde o CD i para o cluster j .
σLT_{FTLij}	Desvio padrão do lead time com carregamento FTL desde o CD i para o cluster j .
LT_{LTLij}	Lead time de atendimento com carregamento LTL desde o CD i para o cluster j .
σLT_{LTLij}	Desvio padrão do lead time com carregamento LTL desde o CD i para o cluster j .
α	Porcentagem desejada de não haver falta durante o lead time. (nível de serviço)
z_α	Valor da distribuição normal padrão de modo que $P(Z \leq z_\alpha) = \alpha$
R	Período de revisão.

- Q_{max} Quantidade máxima permitida transportada no período
 RM_{jk} 1 se o tipo de veículo j pode atender o cluster i e 0 caso contrario
 $R_{FTL_{ij}}$ 1 se o cluster j esta a menos de um período de ser atendido com carregamento FTL desde o CD i , 0 caso contrario.
 $R_{LTL_{ij}}$ 1 se o cluster j esta a menos de um período de ser atendido com carregamento LTL desde o CD i , 0 caso contrario.
 M Numero suficientemente grande

Variáveis de decisão

- X_{ijkt} Número de veículos k usados para atender o cluster j desde o CD i na semana t
 Z_{ijt} Quantidade de carga transportada em carregamento LTL desde o CD i para o cluster j na semana t
 I_{jt} Quantidade em estoque regular no cluster j ao final do período t
 W_{ijkt} 1 se o cluster j é atendido com o tipo de veículo k do embarque FLT desde o CD i na semana t , 0 caso contrario
 Y_{ijt} 1 se o cluster j é atendido com embarque LTL desde o CD i na semana t , 0 caso contrario
 ss_j Estoque de segurança no cluster j
 LT_{jt} Lead time de atendimento real (combinado) para o cluster j na semana t .
 max_{jt} 1 se o cluster j é atendido na semana t , 0 caso contrario
 $Mmax_j$ 1 se o cluster j é atendido a cada dois períodos, 0 caso seja atendido periodicamente.

A formulação matemática inteira mista linear do problema é dada por:

$$\text{minimizar f. o.} = \sum_{i \in CD} \sum_{j \in CL} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} X_{ijkt} C_{ijk} \quad (1a)$$

$$+ \sum_{i \in CD} \sum_{j \in CL} \sum_{t \in T} (Y_{ijt} F_{ij} + (Z_{ijt} - \beta Y_{ijt}) g_{ij}) \quad (1b)$$

$$+ \sum_{i \in CD} \sum_{j \in CL} \sum_{t \in T} h_i \left(\sum_{k \in K} (X_{ijkt} B_j) + Z_{ijt} \right) / 2 \quad (1c)$$

$$+ \sum_{j \in CL} \sum_{t \in T} h_j ss_{jt} \quad (1d)$$

$$+ \sum_{i \in CD} \sum_{j \in CL} \sum_{t \in T} IT_i \left(LTD_{ij} \sum_{k \in K} (X_{ikjt} B_j) + LTF_{ij} Y_{ijt} \right) \quad (1e)$$

O termo (1a) representa os custos de transporte com carga FTL, o (1b) inclui os custos de frete fracionado LTL (fixo e variável por unidades), logo a terceira somatória (1c) determina os custos de manutenção de estoque regular, a quarta soma (1d) determina os custos de manter estoque de segurança dado um nível de serviço estabelecido e o último elemento (1e) representa os custos de manter estoque em trânsito. Estimam-se as quantidades de estoque regular como a media das quantidades que são transportadas para o cluster e que são consumidas ao longo do período

Sujeito a:

$$I_{jt-1} + \sum_{i \in CD} \left((1 - R_{LTL_{ij}}) \sum_{k \in K} (X_{ijkt-1} B_k RM_{jk}) + (R_{LTL_{ij}} - 1) Z_{ijt-1} \right) + \sum_{i \in CD} \left(R_{LTL_{ij}} \sum_{k \in K} (X_{ijkt} B_k RM_{ik}) + R_{LTL_{ij}} Z_{ijt} \right) - D_{jt} = I_{jt} \quad \forall j, t \quad (2)$$

$$\beta Y_{ijt} \leq Z_{jt} \quad \forall i, j, t \quad (3)$$

$$X_{ijkt} \leq W_{ijkt} M \quad \forall i, j, k, t \quad (4a)$$

$$Z_{ijt} \leq Y_{ijt} M \quad \forall i, j, t \quad (4b)$$

$$W_{ijkt} \leq X_{ijkt} \quad \forall i, j, k, t \quad (4c)$$

$$\begin{aligned} \overline{LT}_j \geq & (1 - Mmax_j) \sqrt{(LTFTL_{ij} + R)(\sigma Dd_j)^2 + (Dd_j * \sigma LTFTL_{ij})^2} \\ & + Mmax_j \sqrt{(LTFTL_{ij} + 2R)(\sigma Dd_j)^2 + (Dd_j * \sigma LTFTL_{ij})^2} \\ & + (w_{ijkt} - 1) \left[\sqrt{(LTFTL_{ij} + R)(\sigma Dd_j)^2 + (Dd_j * \sigma LTFTL_{ij})^2} \right. \\ & \left. + \sqrt{(LTFTL_{ij} + 2R)(\sigma Dd_j)^2 + (Dd_j * \sigma LTFTL_{ij})^2} \right] \quad \forall i, j, k, t \quad (5a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{LT}_j \geq & (1 - Mmax_j) \sqrt{(LTLTL_{ij} + R)(\sigma Dd_j)^2 + (Dd_j * \sigma LTLTL_{ij})^2} \\ & + Mmax_j \sqrt{(LTLTL_{ij} + 2R)(\sigma Dd_j)^2 + (Dd_j * \sigma LTLTL_{ij})^2} \\ & + (Y_{ijt} - 1) \left[\sqrt{(LTLTL_{ij} + R)(\sigma Dd_j)^2 + (Dd_j * \sigma LTLTL_{ij})^2} \right. \\ & \left. + \sqrt{(LTLTL_{ij} + 2R)(\sigma Dd_j)^2 + (Dd_j * \sigma LTLTL_{ij})^2} \right] \quad \forall i, j, t \quad (5b) \end{aligned}$$

$$ss_j = z_{\alpha j} * \sigma_{jt} * \overline{LT}_j \quad \forall j \quad (6)$$

$$max_{jt} \geq W_{ijkt} \quad \forall i, j, k, t \quad (7a)$$

$$max_{jt} \geq Y_{ijt} \quad \forall i, j, t \quad (7b)$$

$$Mmax_j \geq max_{jt+1} - max_{jt} \quad \forall j, t \quad (8a)$$

$$Mmax_j \geq max_{jt} - max_{jt+1} \quad \forall j, t \quad (8b)$$

$$\sum_{j \in CL} \left(\sum_{k \in K} (X_{ijkt} RM_{jk} B_k) + Z_{ijt} \right) \leq Qmax \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$X_{ijkt} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i, j, k, t \quad (10a)$$

$$W_{ijt}, Y_{ijt}, max_{jt}, Mmax_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j, t \quad (10b)$$

$$Z_{ijt}, I_{jt}, \overline{LT}_{jt} \text{ e } ss_j \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i, j, k, t \quad (10c)$$

A restrição (2) garante a satisfação da demanda. O primeiro termo representa o inventario final (estoque regular) do período anterior, o primeiro somatório representa as quantidades enviadas no período anterior em embarque FTL e LTL respectivamente e que devido aos leads time de transportes superiores ao período só estarão disponíveis para serem usados no período atual. O segundo somatório representa as quantidades enviadas no período atual nos dois tipos de embarque e que estarão disponíveis para serem usadas nesse mesmo período. A soma dessas quantidades menos a demanda deve ser igual ao inventario final. Nota-se que as quantidades recebidas pelo cliente podem ser disponibilizadas em simultâneo desde diferentes centros de distribuição. Esta restrição considera ainda as limitações de acesso para veículos FTL desde os centros de distribuição para clientes localizados em cidades com restrição de veículos de grande tamanho.

Por políticas da organização, a restrição (3) garante que as cargas com embarques LTL sejam superiores ao valor do ponto de quebra. Esta restrição evita os envios de quantidades muito pequenas que não tem lugar dentro de um planejamento mais estratégico. O conjunto de restrições (4) garante o uso do carregamento FTL e LTL caso

realmente sejam carregados. Estas restrições definem os valores das variáveis binárias W_{ijkt} e Y_{ijt} usadas para o cálculo dos leads time e posteriormente os níveis de estoques de segurança. O M representa um número suficientemente grande.

As restrições (5) em conjunto determinam o valor do *lead time* utilizado para o cálculo do estoque de segurança. Caso a carga seja compartilhada entre as duas alternativas de embarque, o modelo considera o *lead time* da carga mais lenta. Logo a restrição (6) determina o valor do estoque de segurança levando em conta o nível de serviço fixado para o cluster (α_i) e o lead time anteriormente definido.

As equações (7) fazem $max_{jt} = 1$ caso o cluster seja atendido na semana, independente do tipo de carregamento utilizado. Após as restrições (8) fazem $Mmax_j = 1$ caso o cluster seja atendido cada dois períodos ou $Mmax_j = 0$ se o atendimento é período a período.

A restrição (9) garante que a quantidade de mercadoria total transportada desde os centros de distribuição para os clientes (com FTL e LTL) deve ser inferior a certa quantidade definida pelas limitações da instalação para distribuir periodicamente e pelas políticas da organização. Por último as restrições (10) definem o domínio das variáveis.

4. Estudo de caso: distribuição de equipamentos de telecomunicações

A proposta de modelo integrado foi utilizada para otimizar a rede de distribuição e políticas de estoque de uma empresa do ramo de telecomunicação. Em primeiro lugar, a rede existente foi analisada em detalhe para verificar se o modelo proposto anteriormente ilustrado é apropriado para a aplicação.

A rede de distribuição real é complexa pela quantidade de clientes, instalações e produtos envolvidos. A complexidade do problema foi reduzida, fazendo as seguintes premissas:

- **Tamanho da rede de distribuição.** A empresa dispõe de um grande número de centros de distribuição onde os clientes foram alocados por políticas prévias. Por isso este planejamento será feito para um único centro de distribuição e a metodologia poderia ser facilmente aplicada às instalações restantes.
- **Número de clientes.** As demandas dos clientes são agregadas para o ponto central chamado “ponto de distribuição”.
- **Carga utilizada.** A empresa apresenta uma variedade grande de produtos eletrônicos. No entanto, é possível reduzir esta mistura de produto para um único item, assim foram quantificados os fluxos de produtos em volume (m^3) em vez de peças ou artigos. Consequentemente, todos os custos podem ser considerados nesta unidade homogênea de medição. Assim a demanda dos clusters foi dada em volume por período.
- **Variabilidade da demanda.** Assume-se que a demanda dos clientes siga um distribuição estatística normal com média e variância conhecida para cada ponto de demanda.
- **Nível de serviço ao cliente.** O parâmetro de segurança z_{α_i} definido pelos gerentes da empresa é assumido como sendo 2,55. Este valor corresponde a um nível de serviço ao cliente de aproximadamente 98% para todos os *clusters* do sistema.
- **Horizonte de planejamento.** Neste trabalho, duas (2) semanas foram objeto de planejamento, onde as demandas dos clientes estão atribuídas para o final de cada semana.
- **Frota.** Não existem limitações na quantidade embarcada em frota tipo LTL, nem restrições no número de veículos FTL utilizados. Sete tipos de veículos foram considerados apresentados em ordem decrescente de capacidade: Carreta, Truck, Toco, Caminhão médio, VUC (Veículo Urbano de Carga), Sprinter, Fiorino.

De acordo com esse conjunto de hipóteses, uma análise foi realizada com base em diferentes simulações de cenários operacionais diferentes. O modelo foi resolvido na plataforma CPLEX 10.1, utilizou a linguagem para modelagem GAMS e todos os experimentos foram realizados e testados em um computador pessoal Intel(R) core (TM) i5-2,4GHz.

5. Resultados

Testes computacionais foram realizados com os dados reais do estudo de caso apresentado na seção anterior para analisar o comportamento geral do modelo e verificar se é uma representação válida do sistema real. Resultados ótimos foram obtidos em tempos computacionais razoáveis para a Empresa (menos de 5 minutos) e também demonstraram um comportamento correto do modelo. A seguir serão apresentados vários cenários, sendo alguns solicitados pelos decisores da Empresa e outros gerados a partir de prévias análises da equipe de desenvolvimento. Os dados nas tabelas são apresentados como porcentagem ou proporções dos dados reais devido ao termo de confidencialidade.

Devido à dificuldade de acesso às grandes cidades, cenários foram criados para comparar os elementos da função objetivo quando os grandes veículos não são levados em conta no planejamento. A Tabela 1 apresenta as porcentagens dos elementos do custo em relação ao custo total para as diferentes restrições de frota propostas. Observa-se que os custos relacionados a estoque são muito maiores aos custos relacionados ao transporte (CT), sendo a manutenção de estoque mais de 50% para os cinco cenários analisados.

Tabela 1. Custos em porcentagem do custo total vs. uso de veículos grandes

Rest	Frete FTL (C-FTL)	Frete LTL (C-LTL)	Estoque de segurança (C-SS)	Estoque em trânsito (C-IT)	Manutenção de estoque (C-I)
1	3,80%	2,25%	26,94%	11,84%	55,16%
2	3,76%	2,25%	26,92%	11,86%	55,21%
3	4,64%	2,23%	26,55%	11,78%	54,80%
4	6,19%	2,53%	26,64%	11,72%	52,90%
5	1,13%	3,69%	29,86%	14,36%	50,96%

1. Sem restrições de veículos; 2. Com restrição de carreta; 3. Com restrição de carreta e Truck 4. Com restrição de carreta/Truck/Toco; 5. Com restrição de carreta/Truck/Toco/caminhão médio.

A Tabela 2 evidencia a porcentagem de carga utilizada por cada tipo de embarque, bem como uma proporção do estoque de segurança meio por cluster. Observa-se que na medida em que os veículos grandes são restritos a carga transportada por embarque FTL diminui e o estoque de segurança aumenta. O primeiro devido ao fato de que os veículos pequenos não fornecem a economia de escala quando comparados aos de grande capacidade e o segundo porque o embarque LTL tem um maior *lead time* que do que FTL, assim o modelo aumenta a quantidade de estoque de segurança para manter o nível de serviço estabelecido. Veículos de capacidade inferior ao caminhão médio são raramente utilizados (4,22%) quando comparados com embarque LTL. Note que as somas não são necessariamente 100% porque os embarques FTL de grande capacidade geralmente implicam capacidade ociosa.

Tabela 2. Porcentagem de carga e quantidades de estoque vs uso de veículos grandes

Restrições	% Carga FTL	% Carga LTL	Estoque de segurança/CL (SS)
1	37,02%	63,85%	110,22
2	37,02%	63,85%	110,22
3	36,90%	64,19%	110,22
4	31,08%	69,65%	114,70
5	4,22%	95,84%	128,10

1. Sem restrições de veículos; 2. Com restrição de carreta; 3. Restrição de carreta e Truck 4. Restrição de carreta, Truck e Toco; 5. Restrição de carreta, Truck, Toco e caminhão médio.

A Tabela 3 apresenta como o tipo de carga utilizada, os elementos do custo e os estoques de segurança variam em relação à nível de serviço estabelecido. Nota-se que na medida em que o

nível de serviço aumenta, o frete FTL é mais usado, pois implica maior rapidez na entrega e uma menor variação desses valores ($\pm 5\%$ da média) em comparação ao embarque FTL com maiores tempos de transporte e uma alta variação ($\pm 30\%$ da média). Por outra parte os estoques de segurança aumentam para garantir em maior nível que não existirão quantidades faltantes. Em relação aos elementos da função objetivo, os custos de transporte, estoque de segurança e manutenção de estoque normal aumentam devido ao movimento de maiores quantidades, ao invés do custo de estoque em trânsito que diminui a causa de transportes mais rápidos. Finalmente note como a melhora do nível de serviço tem um impacto considerável nos custos totais do sistema.

Tabela 3. Porcentagem de carga e custos vs variação do nível de serviço

NS	% Carga FTL	% Carga LTL	\bar{SS}	CT	C-SS	C-IT	C-I	Custo total
80%	29,61%	70,76%	47,8	236	531	561	2522	3851
85%	33,83%	66,71%	57,9	262	640	545	2528	3975
90%	33,83%	66,71%	71,2	262	788	545	2528	4123
95%	34,11%	66,54%	90,6	269	1001	545	2531	4347
99,9%	44,09%	57,49%	182,8	376	2011	509	2554	5450

A Tabela 4 apresenta os resultados do cenário no qual os custos relacionados ao estoque (de segurança, de manutenção e em trânsito) não foram levados em conta. Observa-se que, para os embarques de atendimento da demanda, o carregamento FTL é superior ao embarque LTL só se houver um elevado desconto no preço de seu frete (cerca de 80%). Nota-se que as somas das porcentagens de carga não são necessariamente 100% porque os embarques FTL de grande capacidade geralmente implicam capacidade ociosa.

Tabela 4. Porcentagem de carga e custo de transporte versus desconto no frete dedicado

Desconto de frete FTL	% Carga FTL	% Carga LTL	C-FTL	C-LTL	Custo total
0%	9,24%	90,77%	689	4.191	4.880
20%	26,70%	76,19%	1.443	3.149	4.592
40%	35,43%	70,41%	1.307	2.901	4.208
60%	43,14%	66,59%	1.028	2.704	3.732
80%	64,25%	45,65%	882	2.574	3.455
90%	105,38%	4,57%	997	2.056	3.053

A Figura 1 apresenta o ponto de equilíbrio para o qual custos de frete dedicado e fracionado são equivalentes. Observa-se para um 85% de desconto aproximadamente os custos para de frete dedicado e fracionado são iguais.

A Tabela 5 apresenta os resultados do cenário no qual os custos relacionados ao estoque (de segurança, de manutenção e em trânsito) foram juntamente levados em conta com os custos de transporte (frete FTL e LTL). Observa-se que neste caso, o embarque FTL é mais preferido ao primeiro caso, onde o modelo só otimizava transporte. Para um desconto de 50%, o embarque FTL é usado para transportar mais de 50% da carga. A comparação entre estes dois cenários evidencia de como a solução é altamente afetada ao considerar as decisões de estoque e transporte de forma isolada. Por tanto uma melhor solução é então obtida gerindo de forma conjunta estas duas decisões.

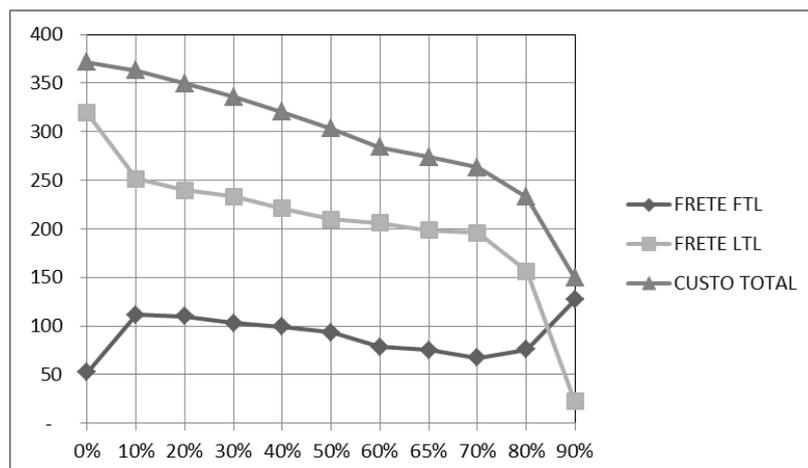


Figura 1. Custos de transporte vs desconto no frete dedicado

Tabela 5. Porcentagem de carga e custos de transporte e estoque vs desconto no frete dedicado

Desc. FTL	% FTL	% LTL	C- FTL	C- LTL	C-SS	C-IT	C-I	Custo total
0%	34,79%	66,01%	171	103	1.237	544	2.535	4.591
20%	37,97%	62,86%	171	97	1.220	529	2.536	4.553
40%	44,39%	56,56%	187	84	1.185	505	2.538	4.499
60%	65,10%	35,98%	273	42	1.111	452	2.540	4.417
80%	83,03%	17,99%	297	18	1.076	414	2.536	4.340
90%	100,32%	0,77%	220	2	1.064	412	2.540	4.237

Esses resultados são importantes para a Empresa no tocante ao estabelecimento de contratos com seus fornecedores de serviços logísticos. A flexibilidade na edição dos parâmetros permite negociar preços de frete e analisar diversos *trade-offs*, além da quantidade a ser entregue em carga FLT e LTL. Embora o modelo não seja dinâmico, ele permite que a empresa analise cenários diante da necessidade de verificar a entrega, particularmente os custos, diante de uma variação no comportamento da demanda, nos preços de frete, etc.

A proposta gera, explicitamente, os custos mínimos de frete (ao considerar diferentes alternativas de embarque) quando combinados com os custos mínimos de estoques (de segurança, de manutenção e em trânsito). Logo, as saídas do modelo são custos mínimos que a empresa deve ter para investimento em sua logística de distribuição.

6. Conclusões

Esta pesquisa aplicada apresentou uma proposta de resolução para o problema de logística de distribuição de equipamentos em uma empresa de telecomunicação, a partir de centros de distribuição para diversos pontos de destino e diversos tipos de carregamento.

Para a resolução desse problema foi utilizado o software Gams, como ferramenta de modelagem matemática, como meio de otimizar os custos do sistema logísticos de distribuição. Diversos cenários foram propostos e analisados para verificar o comportamento do modelo. Os resultados mostram que o modelo matemático representa o problema real e fornece soluções ótimas em tempos computacionais razoáveis para a empresa (questão de minutos).

O modelo matemático demonstrou ser uma ferramenta flexível, permitindo à Empresa, objeto do estudo de caso, realizar variações nas tabelas negociáveis de custos e diferentes combinações entre os elementos do custo (frete FTL, frete LTL, estoque segurança, manutenção de estoque e estoque em trânsito) para análises de diferentes *trade-offs*.

Do ponto de vista da academia, além do modelo apresentar uma aplicação prática, portanto

existe uma troca de conhecimento científico, mesmo que seja tangencial, gera ideias para o desenvolvimento de pesquisas futuras envolvendo incerteza e complexidade à medida que variáveis qualitativas para transportar (fiscalização, emissão de CO₂, segurança, facilidade de entrega, controle, flexibilidade para fazer mudanças no planejamento, etc) e parâmetros de incerteza da demanda e da reposição dos estoques forem considerados na tomada de decisão.

Portanto, como trabalhos futuros, modelos de tomada de decisão multi-atributos conjugados com modelagem matemática serão propostos.

Referências

- Anily, S., e Federgruen, A.** (1990). One warehouse multiple retailer systems with vehicle routing costs. *Management Science*, 36, 92–144.
- Aryanezhad, M.B., e Jabbarzadeh, A.** (2009). An integrated model for location-inventory problem with random disruptions. *International Conference on Computers & Industrial Engineering* (pp. 791–796).
- Aydinel, M., Sowlati, T., Cerda, X., Cope, E., e Gerschman, M.** (2008). Optimization of production allocation and transportation of customer orders for a leading forest products company. *Mathematical and Computer Modelling*, 48(7-8).
- Baita, F., Ukovich, W., Pesenti, R., e Favaretto, D.** (1998). Dynamic routing-and-inventory problems: a review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 32(8), 585–598.
- Burns, L. D. e Hall, R. W.** (1985). Distribution strategies that minimize transportation and inventory costs. *Operation Research*, 33, 469–490.
- Ernst, R., e Pyke, D. F.** (1993). Optimal base stock Policies and truck capacity in a two-echelon system. *Naval Research Logistics*, 40, 879–903.
- Gebennini, E., Gamberini, R., e Manzini, R.** (2009). An integrated production–distribution model for the dynamic location and allocation problem with safety stock optimization. *International Journal of Production Economics*, 122(1), 286–304.
- Harris, F. W.** (1990). How many parts to make at once. *Operations Research*, 38, 947–950.
- Ho, W., Ho, G., Ji, P., e Lau, H. C. W.** (2008). A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(4), 548–557.
- Kang, J.H. e Kim, Y.** (2010). Coordination of inventory and transportation managements in a two-level supply chain. *International Journal of Production Economics*, 123(1), 137–145.
- Kutanoglu, E. e Lohiya, D.** (2008). Integrated inventory and transportation mode selection: A service parts logistics system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(5), 665–683.
- Li, Y., Su, Q. e Li, T.** (2010). Transportation and Inventory Cost Based on Time in Supply Chain Logistics System, 3–6.
- Liang, T.F.** (2008). Integrating production-transportation planning decision with fuzzy multiple goals in supply chains. *International Journal of Production Research*, 46(6), 1477–1494.
- Liu, L., e Ye, C.** (2009). An improved heuristic algorithm for the problem of inventory — transportation integrated optimization. *2009 International Conference on Management Science and Engineering* (pp. 1957–1962).
- Madadi, A., Kurz, M. E., e Ashayeri, J.** (2010). Multi-level inventory management decisions with transportation cost consideration. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(5), 719–734.
- Mason, S. J.** (2003). Integrating the warehousing and transportation functions of the supply chain. *Transportation Research*, 39E, 141–159.
- Max Shen, Z.J., e Qi, L.** (2007). Incorporating inventory and routing costs in strategic location models. *European Journal of Operational Research*, 179(2), 372–389.
- Miranda, P. e Garrido, R.** (2009). Inventory service-level optimization within distribution network design problem. *International Journal of Production Economics*, 122(1), 276–285.
- Nunkaew, W., e Phruksaphanrat, B.** (2010). A Fuzzy Multiple Objective Decision Making Model for Solving a Multi-Depot Distribution Problem. *International MultiConference of*

Engineers and Computer Scientists IMECS (Vol. III). Hong Kong.

Rieksts, B. Q., e Ventura, J. a. (2010). Two-stage inventory models with a bi-modal transportation cost. *Computers & Operations Research*, 37(1), 20–31.

Seliaman, M., e Ahmad, A. R. (2008). Optimizing inventory decisions in a multi-stage supply chain under stochastic demands. *Applied Mathematics and Computation*, 206(2), 538–542.

Swenseth, S. R., e Godfrey, M. R. (2002). Incorporating transportation costs into inventory replenishment decisions. *International Journal of Production Economics*, 77, 113–130.

Tsao, Y.C., e Lu, J.C. (2012). A supply chain network design considering transportation cost discounts. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(2), 401–414.

Viau, M. A., Trepanier, M., e Baptiste, P. (2009). Integration of inventory and transportation decisions in decent supply chains. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 5, 3–4.

Wang, L. H. (2005). Minimize transportation and inventory costs of the two distribution strategy analysis. *Engineering Theory and Practice*, 10, 33–38.

Wang, X., Sun, X., e Yang, F. (2005). A two-level distribution network design based on inventory cost optimization. *Proceedings of ICSSSM '05. 2005 International Conference on Services Systems and Services Management* (pp. 291–296 Vol. 1).

Zhao, Q. H., Chen, S., Leung, S. C. H., e Lai, K. K. (2010). Integration of inventory and transportation decisions in a logistics system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), 913–925.

Zhao, Q.-H., Wang, S.-Y., Lai, K.-K., e Xia, G.-P. (2004). Model and algorithm of an inventory problem with the consideration of transportation cost. *Computers & Industrial Engineering*, 46(2), 389–397.