

OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS HIERÁRQUICOS DE ESTOQUES

José Carlos Fiorioli, M.Eng.

Departamento de Eng^a de Produção e Transportes – UFRGS
fiorioli@hotmail.com

Flávio S. Fogliatto, Ph.D.

Departamento de Eng^a de Produção e Transportes – UFRGS
ffogliatto@ppgep.ufrgs.br

ABSTRACT: This paper presents Multiechelon Inventory System (MIS) Modelling as a managerial tool aiming at the maximization of Service Levels and minimization of Inventories in a Supply Chain. In general, the optimization process requires dealing with non-linear systems of equations involving indefinite integration. Due to difficulties in finding an analytical solution for that kind of problem, it is usual to solve it through simulation. In this paper a non-linear optimization model is developed and applied to determine optimum Target Inventory Levels, Optimal Reorder Points, Service Levels and Total System Inventory levels. Optimization is accomplished using a software specifically designed for that purpose.

Key-words: Optimization, Multiechelon inventory systems, inventory control.

1. Introdução

Sistemas Hierárquicos de Estoques (SHEs) caracterizam-se pela estocagem de produtos em mais de um local do sistema e pela existência de relações hierárquicas entre esses locais, conforme apresentado na Figura 1. O nível superior do sistema é abastecido por fontes externas e funciona como fonte de abastecimento para o nível imediatamente abaixo o qual, por sua vez, pode ser demandado por fontes internas, em um nível inferior, ou por fontes externas ao sistema. Em razão das relações de dependência existentes entre as demandas observadas nos diferentes níveis da estrutura, torna-se clara a necessidade de adoção de políticas de estoques coordenadas, envolvendo todos os níveis do sistema (Fiorioli e Fogliatto, 2001).

O nível hierárquico mais alto do SHE na Figura 1, contendo o Centro de Distribuição (CD), é abastecido diretamente por fontes externas que constituem o Abastecimento do Sistema. Os vários Centros de Distribuição Regional (CDRs) são abastecidos pelo CD através de pedidos de ressuprimento, e atendem a demanda dos Consumidores, posicionados externamente ao sistema. Embora não seja comum, há situações em que o CD também atende diretamente a demanda dos Consumidores. Sistemas mais flexíveis podem permitir transferências laterais de estoques (abastecimento direto a partir de locais que estão em um mesmo nível hierárquico) e redistribuição de estoques do CD para os CDRs (ver Jonsson e Silver, 1987).

A representação de sistemas reais, tais como os SHEs, pode ser obtida através de modelos (mentais, descritivos, gráficos ou matemáticos) que permitam seu estudo em condições controladas. A qualidade do modelo obtido para um sistema depende das ferramentas utilizadas na sua construção. Estudos sobre otimização de SHEs têm ocupado espaço crescente nas publicações especializadas. Clark & Scarf (1960), por exemplo, trabalharam com o conceito de balanceamento de estoques. Bookbinder e Heath (1988) simularam o desempenho de 5 métodos para dimensionamento de lotes em ambientes de demanda determinística e estocástica. Cachon e Zipkin (1999) utilizaram a Teoria dos Jogos para verificar, através de simulações, a solução ótima para a minimização dos custos totais de um sistema hierárquico em função do tipo de estratégia adotada nos seus diferentes níveis (competitiva ou cooperativa).

A análise conjunta das principais abordagens adotadas na modelagem de SHEs, conforme apresentado no Quadro 1, mostra que a maior parte dos pesquisadores trabalhou com estruturas compostas por 2 níveis hierárquicos. Em quase todos os casos, o tratamento da demanda foi estocástico. Os custos são considerados, quase sem exceção, como lineares (ou seja, ganhos de escala não são considerados).

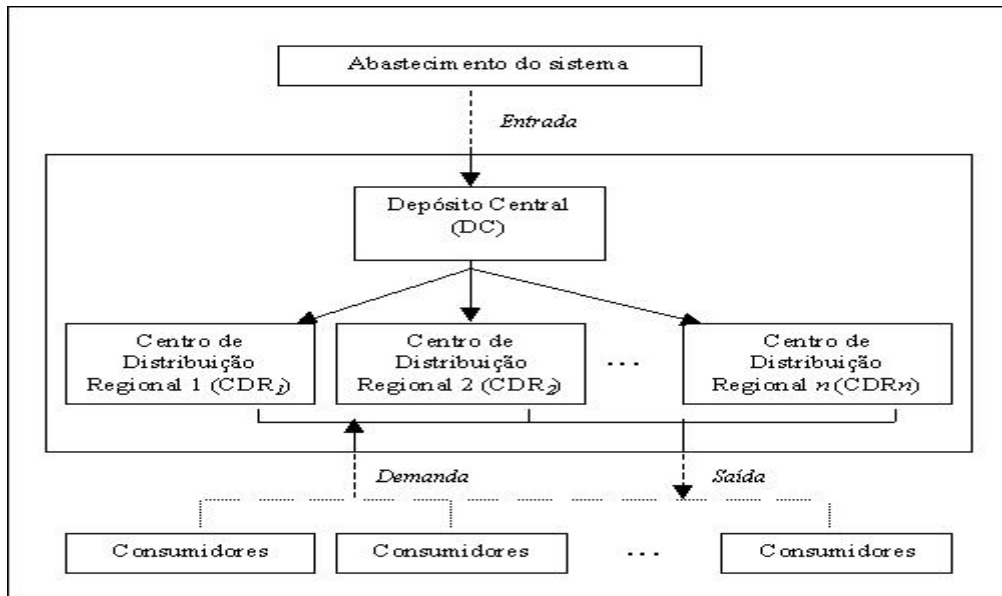


Figura 1. Exemplo de Sistema Hierárquico de Estoques.

Svoronos e Zipkin (1988), e Rogers e Tsubakitani (1991) desenvolveram modelos com uma abordagem centrada na minimização do custo total, considerando *lead time* e demanda estocásticos. Esta abordagem geralmente leva a modelos complexos, cuja validação exige o uso intensivo de recursos computacionais, como ocorreu em ambos os trabalhos.

Modelos semelhantes, visando a minimização do custo total, foram desenvolvidos por Jonsson e Silver (1987), Axsater (1990), Cohen *et al.* (1990), e Sinha e Matta (1991); estes autores consideraram demanda estocástica e *lead time* determinístico. Jonsson e Silver (1987) trabalharam com um modelo de revisão periódica em um ambiente de demanda normalmente distribuída, comparando o desempenho de sistemas com e sem redistribuição de estoques entre os CDRs. Para um mesmo Nível de Serviço, esses autores identificaram os diferentes custos associados a cada situação (com e sem redistribuição). Axsater (1990) apresenta um modelo com dois níveis hierárquicos, em um ambiente de demanda estocástica (a demanda segue uma distribuição de Poisson), independente e estacionária. A aplicação do modelo apresenta restrições quando os custos são expressos como funções não-lineares.

A identificação de políticas de ressuprimento ótimas ou sub-ótimas aparece na literatura com bastante frequência. Os trabalhos de Axsater (1990), Masters (1993), Hausman e Erkip (1994), Nahmias e Smith (1994) e Graves (1996) constituem importantes exemplos desta abordagem. A demanda, em praticamente todos estes trabalhos, é estocástica e, na maioria deles, segue uma distribuição de Poisson. O único artigo neste grupo que considera demanda normalmente distribuída é o de Nahmias e Smith (1994), ainda assim em apenas em um dos níveis hierárquicos do sistema analisado.

Svoronos e Zipkin (1991) e Caron e Marchet (1996) tratam de questões mais específicas. Os primeiros calculam o estoque médio e a média de pedidos pendentes, em função do nível de estoque-base, em cada um dos pontos de um sistema com 3 níveis hierárquicos. Caron e Marchet (1996), por sua vez, analisam o nível do estoque de segurança em função do *lead time* e da correlação das demandas, para sistemas independentes e vinculados.

Rosenbaum (1981) realiza uma série de simulações para identificar o comportamento de um SHE de dois níveis hierárquicos, com demanda e *lead time* estocásticos; para tanto, a autora desenvolveu um procedimento heurístico para determinar o nível de serviço recebido pelos Consumidores a partir de uma determinada combinação de níveis de serviço no CD e nos CDRs. Neste artigo, são confrontados, do ponto de vista qualitativo, os resultados obtidos por Rosenbaum (1981) e a proposta dos autores, descrita adiante, na seção 3.

ABORDAGEM	AUTOR(ES)
Modelos com uma abordagem centrada na minimização do custo total, considerando <i>lead time</i> e demanda estocásticos. Esta abordagem geralmente leva a modelos complexos, cuja validação exige o uso intensivo de recursos computacionais, como ocorreu em ambos os trabalhos.	Svoronos e Zipkin (1988); Rogers e Tsubakitani (1991).
Modelos orientados para a minimização do custo total.	Jonsson e Silver (1987); Axsater (1990); Cohen <i>et al.</i> (1990); Sinha e Matta (1991).
Modelo com demanda estocástica, normalmente distribuída, orientado para a identificação de políticas de ressuprimento ótimas ou sub-ótimas.	Nahmias e Smith (1994).
Modelos com demanda estocástica, seguindo uma distribuição de Poisson, orientados para a identificação de políticas de ressuprimento ótimas ou sub-ótimas.	Axsater (1990); Masters (1993); Hausman e Erkip (1994); Graves (1996).
Modelo de revisão periódica em um ambiente de demanda normalmente distribuída, comparando o desempenho de sistemas com e sem redistribuição de estoques entre os CDRs. Para um mesmo nível de serviço, esses autores identificaram os diferentes custos associados a cada situação (com e sem redistribuição).	Jonsson e Silver (1987).
Modelo que calcula o estoque médio e a média de pedidos pendentes, em função do nível de estoque-base, em cada um dos pontos de um sistema com 3 níveis hierárquicos.	Svoronos e Zipkin (1991).
Modelo que calcula o nível do estoque de segurança em função do <i>lead time</i> e da correlação das demandas, para sistemas independentes e vinculados.	Caron e Marchet (1996).
Modelo com dois níveis hierárquicos, em um ambiente de demanda estocástica (a demanda segue uma distribuição de Poisson), independente e estacionária. A aplicação do modelo apresenta restrições quando os custos são expressos como funções não-lineares.	Axsater (1990)
Modelo com dois níveis hierárquicos, em um ambiente de demanda estocástica, seguindo uma distribuição normal, otimizada através de simulações sucessivas.	Rosenbaum(1981)

Quadro 1. Principais abordagens utilizadas na modelagem de SHE.

O desafio no processo decisório relativo a SHEs, considerados todos os níveis do sistema, está na escolha da política de pedidos mais adequada, indicando quanto pedir e quando devem ser feitos os pedidos. O objetivo é alcançar, simultaneamente, os mais altos níveis de serviço e os melhores resultados econômico-financeiros para a empresa. A maximização dos níveis de serviço e a minimização dos custos totais de manutenção de estoques compõem as principais políticas na gestão de estoques hierárquicos (Clark, 1994).

2. Otimização de Sistemas de Estoques

A otimização de um sistema consiste na identificação de sua solução ótima, que otimiza uma função de interesse respeitando as restrições do sistema. No caso dos sistemas de estoques, as principais decisões tendem a produzir *trade-offs* envolvendo nível de serviço, nível de estoques e custos. Encontrar a melhor relação entre essas variáveis considerando as restrições existentes é a principal meta dos processos de otimização (identificação dos valores máximos ou mínimos, dependendo do problema).

A necessidade de oferecer níveis de serviço mais competitivos pode levar uma empresa a trabalhar com níveis de estoques mais altos. Quanto maiores os estoques, maiores os custos; quanto maiores os custos, menores as margens de lucro da empresa. Assim, a pressão por maiores níveis de serviço

pode gerar margens de lucro cada vez menores. Ao otimizar este sistema, espera-se encontrar a melhor relação entre nível de serviço e margem de lucro. O objetivo é maximizar simultaneamente ambas as variáveis. A solução ótima aponta para o maior nível de serviço a ser adotado, que corresponde à maior margem de lucro possível.

Segundo Taylor (1999), diversos benefícios podem ser obtidos através dos processos de otimização: (i) garantia de obtenção da melhor solução possível dentro de um conjunto definido de alternativas de solução; (ii) possibilidade de tratamento detalhado das estruturas complexas do modelo; (iii) análise de todas as alternativas; (iv) possibilidade de comparação entre resultados produzidos por diferentes processos de otimização; e (v) maior produtividade em relação às abordagens heurísticas. A grande desvantagem dos processos de otimização está na relação desfavorável observada entre tempo de processamento e complexidade: pequenos aumentos na complexidade do problema geram grandes aumentos do tempo de processamento da otimização.

O modelo proposto neste artigo opera baseado nos seguintes pressupostos: (i) a demanda dos consumidores é normalmente distribuída durante o *lead time* do CDR; (ii) a demanda no DC é normalmente distribuída durante o intervalo correspondente a *lead time* + tempo de revisão; (iii) quando ocorre o reabastecimento do DC, todos os pedidos pendentes são reunidos e encaminhados para os respectivos CDRs; e (iv) pedidos pendentes em todos os pontos do sistema ocorrem somente durante *lead times*.

3. Modelagem para a Otimização de um SHE

A abordagem desenvolvida neste artigo toma como ponto de partida a abordagem de Rosenbaum (1981), diferenciando-se desta em três aspectos essenciais, conforme apresentado no Quadro 2.

Aspecto/Abordagem	Abordagem proposta neste artigo	Abordagem em Rosenbaum (1981)
Obtenção de Níveis de Serviço, <i>order-up-to</i> e Pontos de Reposição	Valores Calculados	Valores Aproximados
Método de solução do problema	Otimização Não-Linear	Simulações sucessivas
Apresentação de Resultados	Solução Ótima	Intervalo de Soluções

Quadro 2. Comparativo entre abordagens ao problema de SHEs.

O modelo proposto trabalha com variáveis de entrada, variáveis de decisão, função-objetivo e restrições, conforme descrições a seguir.

- *Variáveis de entrada:*

$\mu_A; \sigma_A$ = média e desvio padrão da demanda no CD durante o período de revisão.

$\mu_L; \sigma_L$ = média e desvio padrão da demanda no CD durante o período de revisão.

$\mu_{LT_i}; \sigma_{LT_i}$ = média e desvio padrão da demanda no CDR_i ($i=1, \dots, k$) durante seu *lead time*.

μ_{AD_i} = demanda média anual no CDR_i ($i=1, \dots, k$).

DPY = dias trabalhados por ano no sistema.

L = período de revisão do CD em dias, fixo.

EOQ_i = lote de compra do CDR_i ($i=1, \dots, k$).

μ_{RD_i} = média da demanda diária no CDR_i ($i=1, \dots, k$).

μ_{DD} = média da demanda diária no CD.

- *Variáveis de decisão:*

CSL_i = nível de serviço oferecido ao consumidor (fração da demanda do consumidor que efetivamente será atendida com o estoque disponível no CDR_i onde o pedido é colocado).

w = estoque total no sistema.

RSL_i = nível de serviço de entrada do CDR_i .

DSL = nível de serviço no CD.

S = quantidade *order-up-to* calculada no CD.

R_i = ponto de pedido no CDR_i ($i=1, \dots, k$).

- *Função objetivo:*

Definindo o estoque total no sistema como w e o estoque máximo do sistema como

$S_{máx} + \sum_{i=1}^k (R_{máx_i} + EOQ_i)$, pode-se estabelecer a função objetivo a ser minimizada:

$$\text{Min } z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (1 - CSL_i) + w / S_{máx} + \sum_{i=1}^k (R_{máx_i} + EOQ_i),$$

onde k representa o número de CDRs no sistema.

- *Restrições:*

a) Restrição relativa ao valor esperado para o número de unidades pendentes por ano no CDR_i:

$$E[G] = (1 - CSL) \cdot \mu_{AD}$$

b) Restrições de Nível de Serviço:

$$(i) RSL_i \geq CSL_i, \forall i; (ii) DSL \geq RSL_i, \forall i; (iii) CSL_i, RSL_i, DSL \leq 1, \forall i.$$

c) Restrições relativas aos estoques:

$$w, S \geq 0.$$

d) Restrições relativas aos pedidos:

$$R_i, EOQ_i \geq 0, \forall i.$$

e) Restrição relativa ao estoque máximo:

$$\left(S_{máx} + \sum_{i=1}^k (R_{máx_i} + EOQ_i) \right) > 0, \forall i$$

O modelo faz o balanceamento entre os níveis de serviço e o nível de estoque total do sistema, indicando a combinação de DSL, RSL_1, \dots, RSL_k que gera o melhor Nível de Serviço ao Consumidor, CSL_i , com o mais baixo nível de estoque no sistema.

4. Aplicação do Modelo

O modelo proposto na seção 3 foi aplicado utilizando o conjunto de entradas apresentado no Quadro 3, considerando diferentes cenários, com diferentes valores de entrada, para o SHE. Para viabilizar a comparação de desempenho entre Sistemas Básicos de Estoques (SBEs), constituídos de um único nível hierárquico, e SHEs, deve-se utilizar as mesmas variáveis como entrada e os mesmos critérios de otimização descritos anteriormente (Nível de Serviço e Estoque Total no Sistema). A otimização foi realizada utilizando um aplicativo desenvolvido especificamente para esse fim, denominado *Otimizador*. As rotinas de otimização foram executadas com os dados do Quadro 3; conseqüentemente, os resultados estão diretamente vinculados a esses valores. A alteração de qualquer valor deve ser analisada previamente, de modo a manter em equilíbrio a estrutura do ambiente estudado.

O modelo estocástico proposto foi aplicado a um SHE e seus resultados são confrontados com os resultados ótimos estabelecidos para cada um dos SBEs pertencentes ao sistema. A operacionalização do modelo se dá em três fases: (i) entrada dos dados relativos ao ambiente analisado; (ii) execução da rotina de otimização, e (iii) análise dos resultados gerados. Para simplificar, consideram-se os ambientes dos CDRs como idênticos. Assim, é necessário otimizar

apenas um dos quatro sistemas e, conhecida esta condição, reproduzi-la para os demais SBEs. Essas otimizações parciais são simples, podendo ser resolvidas de modo direto, através da equação:

$$1 - RSL_i = \int_{R_i}^{\infty} (b - R_i) f_{B_i}(b) db / EOQ_i,$$

onde $f_{B_i}(b)$ é a função de densidade de probabilidade de B_i .

Resolvendo numericamente, obtêm-se as informações de Nível de Serviço, Ponto de Reposição e Estoque Médio para cada CDR, cujos valores são, respectivamente, 92%, 11.067 unidades e 13.567 unidades de produto. O SHE considerado nesta aplicação possui 4 CDRs e um DC; assim, seus estoques somados alcançam 54.268 unidades de produto. A esse número deve ser adicionado o estoque médio do CD, que atinge 13.600 unidades (Nível de Serviço de 92%). Desta forma, o estoque total no sistema corresponde a 67.868 unidades de produto.

VARIÁVEL	VALOR
Período de revisão do CD, em dias (L)	10
Dias trabalhados por ano (DPY)	250
Lead time de produção (PLT)	32
Período de revisão do CD + PLT (I)	42
Média da demanda no CD, durante I	168000
Desvio-padrão da demanda no CD, durante I	33600
Média da demanda diária no CD	4000
Desvio-padrão da demanda diária no CD	2000
Lead time do CDR, que começa quando o CD tem estoque (LT)	10
Média da demanda sobre o CDR _{<i>i</i>} , durante o LT	10000
Desvio-padrão da demanda sobre o CDR _{<i>i</i>} , durante o LT	2000
Lead time do CDR _{<i>i</i>} , que começa quando o CD não tem estoque (LT')	5
Média da demanda sobre o CDR _{<i>i</i>} , durante o LT'	5000
Desvio-padrão da demanda sobre o CDR _{<i>i</i>} , durante o LT'	2500
Média da demanda sobre o CDR _{<i>i</i>}	1000
Desvio-padrão da demanda sobre o CDR _{<i>i</i>}	625
Media da demanda annual sobre o CDR _{<i>i</i>}	250000
Probabilidade de chegar um pedido ao CD em situação de estoque zero (%)	5%
Probabilidade de que o CD esvazie o estoque durante I (%)	4%
Valor esperado p/ n° unidades pendentes no CDR (situação de estoque zero no CD)	3000

Quadro 3. Variáveis e valores de entrada do **Otimizador**.

A abordagem proposta considera a otimização do CD e todos os CDRs de forma integrada, como um SHE. Na identificação da solução ótima, considerando inicialmente os 4 SBEs como estruturas independentes e, em seguida, tratando-os como um SHE, a diferença de abordagem leva a uma redução de 4,72 % nos estoques mantidos no sistema, para um Nível de Serviço de 90% junto aos consumidores finais.

A relação entre o Nível de Serviço identificado nas otimizações parciais dos SBEs (92%) e o correspondente Estoque Total (67.868 unidades de produto), além de não otimizar o sistema, produz uma queda de 4,94 % na sua eficiência (quociente obtido entre a diferença dos Estoques Totais calculados para as duas abordagens e o Estoque Total do SHE otimizado).

Foram realizados 18 testes, utilizando diferentes Níveis de Serviço, com o objetivo de verificar as diferenças entre as duas abordagens descritas acima. O Quadro 4 apresenta uma visão parcial dos resultados obtidos.

Em todos os testes houve redução de Nível de Serviço e Estoque Total. As reduções de estoque são proporcionalmente maiores em todos os casos. A variação média de Nível de Serviço é de $\square 2\%$ e a variação média de Estoque é de $\square 3,72\%$. Rigorosamente, inexistem as variações de Nível de Serviço, uma vez que o verdadeiro Nível de Serviço do sistema é aquele obtido através da Abordagem SHE. Assim, pode-se dizer que a mudança de abordagem, abandonando SBE e adotando SHE, gera uma redução média de 3,72% no Estoque Total do sistema.

Embora seja superior aos modelos não hierárquicos, a implementação do modelo aqui proposto pode ficar comprometida caso a coleta de dados básicos não seja feita com rigor e critério científicos. A presente modelagem estocástica de SHEs apresenta as seguintes vantagens sobre as abordagens tradicionais: (i) produz resultados que permitem otimizar um sistema de estoques como um todo, considerando todos os níveis hierárquicos da estrutura analisada; (ii) apresenta tempos de processamento menores, ao ser comparado com as abordagens que utilizam simulação (modelos estocásticos normalmente são solucionados em um processamento único, diferentemente das rotinas de simulação que necessitam vários processamentos, o que aumenta consideravelmente o tempo total da busca da solução ótima; ver, por exemplo, Rosenbaum, 1981); (iii) em razão da alta disponibilidade de recursos computacionais e da facilidade de implementação do algoritmo otimizador (*GRG – Generalized Reduced Gradient*), a operacionalização do modelo é rápida e simples; e (iv) reflete com maior fidelidade a interdependência dos estoques em uma cadeia de suprimentos, tornando-se adequada ao tratamento das questões de integração logística; nesses casos, a modelagem da interdependência confere maior precisão à representação do sistema e, por consequência, aos resultados obtidos na busca da solução ótima.

TESTE	Abordagem SBE		Abordagem SHE		Variação % do Estoque Total
	Nível de Serviço	Estoque Total	Nível de Serviço	Estoque Total	
1	80%	52.936	77%	51.868	-2,02%
4	83%	55.599	80%	52.936	-4,79%
8	87%	60.401	85%	57.199	-5,30%
13	92%	67.868	90%	64.668	-4,72%
18	97%	76.936	96%	74.801	-2,78%

Quadro 4. Comparativo entre as abordagens SBE e SHE.

4.1. Comparativo entre os resultados do modelo e os resultados obtidos por simulação

A solução do modelo proposto neste trabalho é obtida em processamento único, ao passo que o processo de simulação desenvolvido em Rosenbaum (1981), tomado como base para o presente desenvolvimento, subdivide-se em duas partes: Comparação entre valores calculados e simulados para os Níveis de Serviço ao Consumidor, e Minimização de Estoques do Sistema. Na 1ª parte, são realizadas 30 simulações para gerar os valores necessários à comparação pretendida. A 2ª parte apresenta 3 fases de processamento: (i) análise das variações nos estoques provocadas por alterações no *lead time*; (ii) análise do impacto de diferentes valores de EOQ sobre os estoques; e (iii) apresentação das variações dos estoques em função de mudanças nos Níveis de Serviço.

Neste trabalho, o aplicativo *Otimizador* foi utilizado para avaliar o impacto de um conjunto de variáveis sobre a condição que minimiza o estoque total do sistema. Os resultados obtidos com o modelo proposto, apresentados no Quadro 5, indicam que a medida que o Nível de Serviço do CD aumenta, a condição que minimiza o Estoque do Sistema ocorre em Níveis de Serviço ao Consumidor cada vez maiores, com *lead time* e EOQ cada vez menores. A mesma relação vale para o valor esperado para as pendências no CDR e a probabilidade de não haver estoque disponível no CD durante o período de revisão. Assim, é possível obter maior eficiência no sistema ao aumentar o Nível de Serviço ao Consumidor e reduzir não só o *lead time*, mas também o EOQ, o valor esperado para as pendências no CDR e a probabilidade de não haver estoque disponível no CD durante o período de revisão, desde que essas alterações possam ser suportadas por aumentos progressivos do Nível de Serviço do CD.

Os resultados apresentados por Rosenbaum (1981) indicam que à medida que o Nível de Serviço do CD e o Nível de Serviço ao Consumidor aumentam, os valores que expressam a condição de Estoque mínimo também aumentam e, quando o Nível de Serviço do CD aumenta e o *lead time* e o Lote Econômico diminuem, os valores que expressam a condição de Estoque mínimo diminuem. A comparação entre os resultados acima indica que há convergência entre os trabalhos, embora as grandes diferenças em termos de tempo de processamento observadas nos processos de obtenção

dos mesmos. A principal lacuna no trabalho de Rosenbaum (1981) é a não identificação da solução ótima: o trabalho limita-se a estabelecer as principais relações entre as variáveis do sistema.

Variáveis			Lead time		EOQ		E[C N=0]		P[N=0]	
			↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
DSL	↑	CSL	↑	MIN		MIN		MIN		MIN
			↓							
	↓	CSL	↑							
			↓	MIN		MIN		MIN		MIN

Quadro 5. Análise de Sensibilidade do nível mínimo do Estoque

5. Conclusão

Neste artigo, apresenta-se o desenvolvimento de um modelo estocástico orientado para a maximização dos Níveis de Serviço e a minimização dos Estoques de um SHE. Tais modelos normalmente envolvem processos de otimização de sistemas não-lineares, através de simulação. Este trabalho propõe uma solução alternativa, onde a otimização do sistema é feita a partir de uma modelagem que estabelece os Níveis de Estoque-Alvo, os Pontos de Reposição de Estoques, os Níveis de Serviço oferecidos aos Consumidores Finais e o Nível Ótimo Global de Estoques. Para operacionalizar esta solução, utiliza-se um aplicativo computacional, projetado especialmente para este fim. Os resultados obtidos confirmam a importância da modelagem estocástica nos processos que envolvem estruturas hierárquicas.

6. Referências Bibliográficas

- AXSATER, S. (1990). Simple Solution Procedures for a Class of Two-Echelon Inventory Problems. *Operations Research*, 38 (1), 64-69.
- BOOKBINDER, J. H.; HEATH, D. B. (1988). Replenishment Analysis in Distribution Requirements Planning. *Decision Sciences*, 19, 477-489.
- CACHON, G. P.; ZIPKIN, P. H. (1999). Competitive and Cooperative Inventory Policies in a Two-Stage Supply Chain. *Management Science*, 45 (7), 936-953.
- CARON, F.; MARCHET G. (1996). The Impact of Inventory Centralization/Decentralization on Safety Stock for Two-Echelon Systems. *J. of Business Logistics*, 17 (1), 233-257.
- CLARK, A. J. Multi-echelon inventory theory – A retrospective. *International Journal of Production Economics*, n. 35, p. 271-275, 1994.
- CLARK, A.; SCARF, H. (1960). Optimal Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem. *Management Science*, 6 (4), 475-490.
- COHEN, M.; KAMESAM, P.V.; KLEINDORFER, P.; LEE, H.; TEKERIAN, A. (1990). Optimizer: IBM's Multi-Echelon Inventory System for Managing Service Logistics. *Interfaces*, 20 (1), 65-82.
- FIORIOLO, J. C.; FOGLIATTO, F. S. (2001). *Tecnologia de Informação na Modelagem de Sistemas Hierárquicos de Estoques*. Anais do ENEGEP 2001, Salvador, em CD-ROM.
- GRAVES, S.C. (1996). A Multiechelon Inventory Model with Fixed Replenishment Intervals. *Management Science*, 42 (1), 1-18.
- HAUSMAN, W. H.; ERKIP, N. K. (1994). Multi-echelon vs. Single-echelon Inventory Control Policies for Low-demand Items. *Management Science*, 40 (5), 597-602.
- JONSSON, H.; SILVER, E. A. (1987). Analysis of a Two-Echelon Inventory Control System with Complete Redistribution. *Management Science*, 33 (2), 215-227.
- MASTERS, J. M. (1993). Determination of Near Optimal Stock Levels for Multi-Echelon Distribution Inventories. *Journal of Business Logistics*, 14 (2), 165-195.
- NAHMIA, S.; SMITH S. A. (1994). Optimizing Inventory Levels in a Two-echelon Retailer System with Partial Lost Sales. *Management Science*, 40 (5), 582-596.

- ROGERS, D. F.; TSUBAKITANI, S. (1991). Inventory Positioning/Partitioning for Backorders Optimization for a Class of Multi-Echelon Inventory Problems. *Dec. Sciences*, 22, 536-358.
- ROSENBAUM, B.A. (1981). Service Level Relationships in a Multi-Echelon Inventory System. *Management Science*, 27 (8), 926-945.
- SINHA, D.; MATTA, K. F. (1991). Multiechelon (R,S) Inventory Model. *Decision Sciences*, 22 (3), 484-499 .
- SVORONOS, A.; ZIPKIN, P. (1988). Estimating the Performance of Multi-Level Inventory Systems. *Operations Research*, 36 (1), 57-72. .
- . (1991). Evaluation of One-for-One Replenishment Policies for Multiechelon Inventory Systems. *Management Science*, 37 (1), 68-83.
- TAYLOR, B. W. (1999). *Introduction to Management Science*. 6^a ed. New Jersey: Prentice Hall.