



UM MODELO DE DECISÃO PARA O USO DE ENTREPOSTO ADUANEIRO

A DECISION MODEL FOR THE USE OF BONDED WAREHOUSE

Christian Gut

London School of Economics and Political Science

Operational Research Department

Houghton Street, London WC2A 2AE, UK

Tel: +44 (0)20 7405 7686 e-mail: C.M.Gut@lse.ac.uk

Patrícia Belfiore

Centro Universitário da FEI

Departamento de Engenharia de Produção

Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972, São Bernardo do Campo

Telefone: (11) 4353-2900 e-mail: patricia.belfiore@labfin.com.br

RESUMO

Esse artigo propõe um modelo de decisão para o uso de portos secos. Primeiramente, desenvolve-se um modelo estocástico para a estocagem de um item em dois lugares distintos, um inventário nacional e um entreposto aduaneiro. A partir desse modelo será apresentada uma heurística para vários itens que otimiza o tempo de espera de clientes. A heurística considera tanto as restrições de nível máximo de inventário quanto às probabilidades de falta de estoque. O algoritmo desenvolvido foi aplicado para resolução de um caso real de um importador de componentes eletrônicos. A solução foi verificada através de uma simulação determinística. Desta forma, foi possível determinar as vantagens e limitações do regime de entreposto alfandegário.

Palavras-chave: entreposto alfandegário, distribuição de Poisson, modelos estocásticos.



ABSTRACT

This article suggests a decision model for bonded warehousing. First, we develop a stochastic inventory model for one item in two different locations, a national inventory and a bonded warehouse. Based on this model, a multi-item heuristic will be presented, trying to optimize the customers waiting time. It considers a maximum inventory level constraint as well as permitted stockout probabilities. The algorithm proposed has been applied to the case of an importer of electronic components. The retrieved solution has been verified by a deterministic simulation. So, it was possible to gain some insights of the advantages and limits of bonded warehousing.

Key-words: bonded warehousing, Poisson distribution, stochastic models.

1. INTRODUÇÃO

Os estudos do Banco Mundial evidenciaram que o sistema de importação e exportação do Brasil sofre deficiências estruturais que dificultam o crescimento do setor. Um bom exemplo que retrata este problema é a diferença do tempo médio de importação do Brasil em relação a países como Alemanha, Dinamarca, Espanha e Estados Unidos. Para importar um *container* é preciso esperar, em média, 43 dias, enquanto que nas nações citadas os prazos médios variam de 5 a 10 dias (THE WORLDBANK GROUP, 2006). A consequência imediata deste gargalo é o encarecimento das operações nas cadeias de suprimentos internacionais. Devido a este cenário, criou-se a necessidade de encontrar meios para reduzir o tempo de suprimento, sem gerar grandes impactos nos custos ou níveis de inventário.

Um desses meios é o regime de entreposto alfandegário em portos secos, onde a mercadoria pode ser armazenada sem a necessidade de pagamento de impostos incidentes na importação. Outra vantagem desse sistema é a redução dos custos de armazenamento comparados aos da zona primária. Esses fatos são tão relevantes para as cadeias de suprimentos internacionais que, aproximadamente, 20% das importações brasileiras passam por portos secos (MORINI & PIRES, 2005).

Apesar da importância do tema para as importações brasileiras, não foram encontradas publicações que apresentam um modelo de decisão para o uso de portos secos, com exceção do trabalho de Morini & Pires (2005) que apresenta um modelo de decisão baseado em fatores qualitativos.



Este trabalho propõe uma heurística para otimizar o tempo de espera de clientes. A heurística foi desenvolvida para vários itens estocados com demandas estocásticas. O algoritmo considera tanto o valor contábil reduzido da mercadoria estocada nos entrepostos quanto às restrições do valor máximo do inventário e de faltas de estoques permitidas. A heurística original foi adaptada e aplicada em um caso real de distribuição de componentes eletrônicos para máquinas e instalações industriais.

A partir dessas adaptações será desenvolvida a curva de tempo de espera de clientes em função do valor de estoque permitido, tanto para os casos em que é possível a aplicação do regime de entreposto alfandegário quanto os casos em que não é possível.

A seqüência do artigo está detalhada a seguir. O item 2 faz uma revisão bibliográfica sobre o tema estudado neste trabalho. O item 3 apresenta o modelo de inventário desenvolvido para um único item. O item 4 descreve a heurística adaptada para problemas com vários itens. No item 5, o modelo de otimização proposto é aplicado em uma importadora de componentes eletrônicos. Finalmente, no item 6, estão as considerações finais e futuras pesquisas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo de caso apresentado neste trabalho trata do suprimento de vários itens através de uma política de suprimentos (T, S) e de uma demanda com distribuição de Poisson composta (*compound Poisson*) para um regime de entreposto aduaneiro. A seguir são apresentados os principais artigos encontrados na literatura sobre o tema.

Goyal & Satir (1989) apresentam um resumo sobre a otimização do suprimento de vários itens ao mesmo tempo, chamado problema de reabastecimento conjunto (*joint replenishment problem*). Os autores discutem esse problema tanto para os casos determinísticos quanto estocásticos.

Outro trabalho que trata do problema de reabastecimento conjunto com demanda estocástica pode ser encontrado em Eyan & Kropp (1998). Os autores apresentaram modelos que adotam a política de suprimentos (T, S) usando um nível máximo (*order up to level*) ao invés de um lote econômico, e intervalos regulares de compra ao invés de um ponto de pedido para definir o momento da compra.



Essa política também é ponto central do artigo de Rao (2003) que abrange o caso de demandas de Poisson compostas. Porém, Rao desenvolveu modelos para o suprimento de um único produto, não abordando o problema de reabastecimento conjunto.

A dificuldade no desenvolvimento de soluções estocásticas deve-se à incorporação do fator de incerteza. Tanto Goyal & Satir (1989) quanto Rao (2003) resolveram a questão com o uso de custos de oportunidade para os pedidos atrasados (*backorders*).

Eyan & Kropp (1998) têm uma outra ótica. Os autores impõem restrições de probabilidades máximas das faltas de estoque para o modelo proposto. Uma nova abordagem foi dada por Chen & Zheng (1992). Eles desconsideram toda discussão de restrições ou custos totais e, simplesmente, estudam a distribuição do tempo de espera de clientes com foco em modelos que usam a política (T,S). Um medidor de desempenho também foi usado nesse trabalho.

Zipkin (2000) também apresenta modelos matemáticos para a otimização de inventários. O autor englobou uma gama de modelos complexos, com diversos tipos de demandas estocásticas, como, por exemplo, o processo de Poisson. Já os modelos estocásticos de Silver *et al.* abrangem, primeiramente, a distribuição normal.

Um modelo de decisão para o regime de entreposto alfandegário é apresentado por Morini & Pires (2005). Os autores desenvolveram um questionário que analisa as características e importâncias da operação logística em um empreendimento. Com esse questionário foram levantadas as características da operação logística de 12 empresas da região de Campinas, SP, que já usam portos secos para a armazenagem de mercadorias sob controle aduaneiro. Através desse levantamento, criou-se um modelo de decisão que sugere o uso do regime de entreposto alfandegário caso as respostas do questionário alcancem uma média ponderada. Mas essa sistemática indica apenas o uso do porto seco, não informando o tipo de produto e os níveis de estoque que deveriam ser armazenados no mesmo.

Soluções para esse tipo de problema podem ser encontradas em Silver *et al.* (1998). Os autores apresentam uma variedade de modelos de inventários e indicadores de níveis de serviço. O ponto forte do livro é o foco em questões gerenciais do uso de inventários, sem perder a profundidade na discussão sobre os modelos matemáticos. Por exemplo, os autores sugerem o uso de curvas de *trade-off* (*exchange-curves*) quando um indicador de nível de serviço é dificilmente transformável em custos de oportunidades, inibindo assim a criação de um modelo que reduz os custos totais da logística.



Gutiérrez (2005) discute os aspectos logísticos, além de fatores macro-econômicos e jurídicos para o regime de entreposto aduaneiro no México.

Kiesmüller e Kok (2006) apontam o nível de serviço como um fator importante no processo de demanda, juntamente com a redução de custos. Os autores analisam o tempo de espera em um modelo de estoque (R, s, Q). O objetivo é achar o nível mínimo de reabastecimento de estoque (s) considerando a restrição de tempo de entrega máximo (W), o ponto de suprimento (R) e o lote econômico (Q).

Wong et al. (2007) propõem uma heurística gulosa e o uso de um reabastecimento um-a-um para um problema de estoque com múltiplos itens em que a demanda segue uma distribuição de Poisson e é abastecida a partir de um armazém central e vários armazéns locais. O objetivo é minimizar o valor em estoque com a restrição de prazo médio de entrega. No presente trabalho, o objetivo é minimizar o prazo de entrega considerando a restrição de valor em estoque.

Epstein (2007) discute a importância do prazo de entrega como alternativa para o ajuste de preço com o objetivo de analisar as relações entre tempo de espera, demanda, lucros e estoques.

3. MODELO DE INVENTÁRIO

O primeiro passo, antes do desenvolvimento da heurística, é criar um modelo estocástico para estocagem de um item em dois lugares distintos, um inventário nacional e um entreposto aduaneiro. Para esse modelo serão utilizadas as seguintes nomenclaturas:

- s = Posição de estoque
- λ = Taxa de demanda
- L = Tempo de suprimento
- v = Valor contábil de uma unidade estocada
- A = Probabilidade de falta de estoque
- B = Nível esperado de pedidos atrasados (*backorders*)
- BW = Valor esperado do tempo de espera de clientes
- I = Nível de estoque médio
- V = Valor médio do estoque ($V = I \cdot v$)



$g(x)$ = Probabilidade de obter a demanda x durante o tempo de suprimento L

$$g(x) = \frac{(\lambda L)^x e^{-\lambda L}}{x!}$$

$G(x)$ = Função de probabilidade acumulada ($G(x) = \sum_{j=0}^x g(j)$)

$G^0(x)$ = Função de probabilidade acumulada complementar ($G^0(x) = 1 - G(x)$)

$G^1(x)$ = Função de perda de primeiro grão ($G^1(x) = \sum_{j=x}^{\infty} G^0(j) = \lambda L - \sum_{j=0}^{x-1} G^0(j)$)

Um modelo de estoque simplificado é ilustrado pela Figura 1.

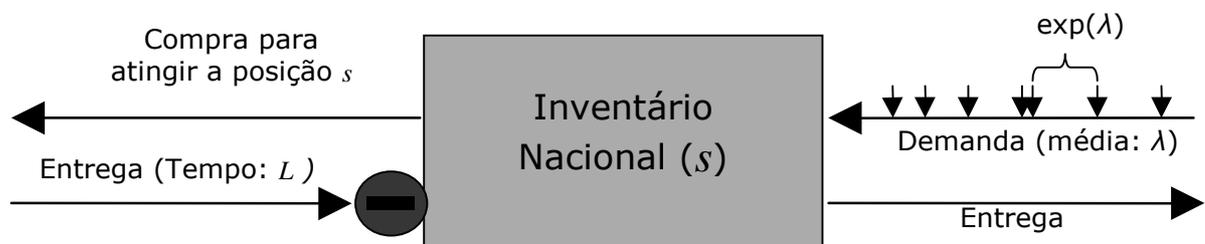


Figura 1: Ilustração do processo de reposição simples

O modelo utiliza uma política de reposição onde a posição do estoque (estoque atual, mais os pedidos de compras abertas, menos os pedidos de vendas ainda não entregues) será mantida continuamente no nível s , ou seja, caso a demanda atinja uma determinada posição abaixo do nível s , uma reposição imediata é feita. O tempo de reposição L é fixo e constante. Zipkin (2000) mostrou que essa política de estoque terá os seguintes atributos, caso a demanda seja um processo de Poisson:

$$A = G^0(s-1) \quad (1)$$

$$B = G^1(s) \quad (2)$$

$$BW = \frac{B}{\lambda} = \frac{G^1(s)}{\lambda} \quad (3)$$

$$I = s - \lambda L + B \quad (4)$$



É necessário, ainda, acrescentar ao modelo a possibilidade de manter uma parte do estoque em um porto seco. Assim, têm-se duas posições de estoques: s_n para o inventário nacional e s_a para o inventário alfandegário.

O fluxo entre esses dois estoques é ilustrado pela Figura 2. Nesse caso a demanda será, primeiramente, satisfeita pelo inventário nacional. Só quando o inventário nacional estiver zerado, a demanda seria retirada do porto seco, o que necessitaria um tempo fixo t_{tr} .

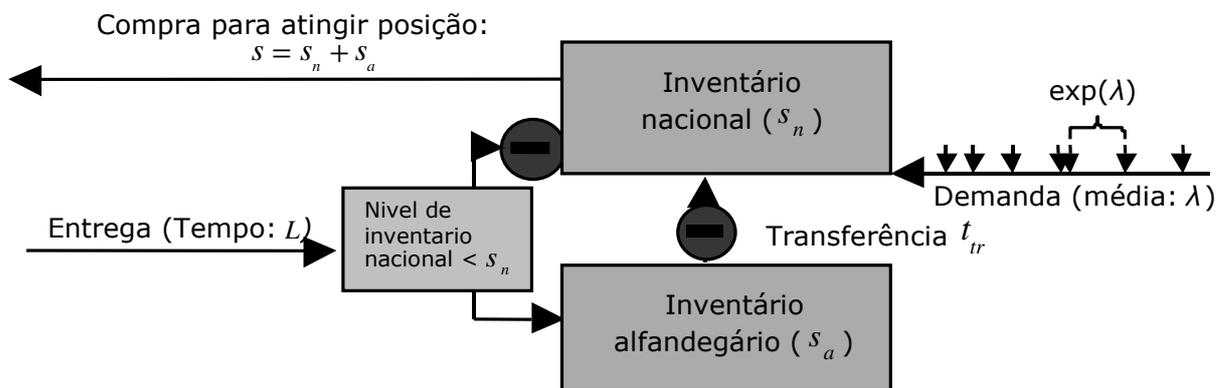


Figura 2: Ilustração do processo de reposição com entreposto alfandegário

Cabe ressaltar que a transferência será solicitada independentemente das previsões de entrada no inventário nacional. Assim, uma demanda que causou uma retirada, sempre será satisfeita pelo saldo transferido. Essa restrição pode causar alguns efeitos indesejáveis, que serão discutidos no final dessa seção.

Assumindo a política de transferência discutida, o valor esperado do tempo de espera de clientes BW pode ser expresso da seguinte forma:

- BW onde os dois inventários passam a ser um único inventário ($s = s_n + s_a$) somado com
- o t_{tr} multiplicado pela probabilidade de que a demanda ultrapasse o nível de inventário nacional, mas não exceda a capacidade do entreposto aduaneiro.



Uma outra forma de expressar essa relação seria:

$$BW = BW(s_n + s_a) + [A(s_n + 1) - A(s_n + s_a + 1)] \cdot t_{tr} = \frac{G^1(s)}{\lambda} + [G(s) - G(s_n)] \cdot t_{tr} \quad (5)$$

Para o cálculo do nível de estoque médio I , assume-se que, para cada demanda atendida, subtrai-se o valor do estoque imediatamente, apesar do tempo t_{tr} necessário para fazer uma retirada do entreposto. Usando essa preposição, consideram-se os dois estoques como um só, obtendo:

$$I = I(s_n + s_a) \quad (6)$$

Porém, nosso interesse final é obter o valor médio do estoque V , e o modelo somente foi desenvolvido porque o valor contábil da mercadoria alfandegária v_a é menor do que o valor da mercadoria nacionalizada v_n . Assim, é necessário obter tanto o nível de estoque médio do inventário nacional I_n quanto o do porto seco I_a ($I = I_n + I_a$).

Como, primeiramente, a demanda é sempre satisfeita pelo inventário nacional, o nível médio de estoque pode ser calculado como se o entreposto aduaneiro não estivesse existindo, sendo:

$$I_n = I(s_n) \quad (7)$$

Em conseqüência, o nível de estoque médio do porto seco pode ser calculado pela diferença entre as equações (6) e (7):

$$I_a = I(s_n + s_a) - I(s_n) \quad (8)$$

Para chegar no valor médio do estoque V precisa-se multiplicar (7) e (8) pelos respectivos valores contábeis. Tem-se, portanto:

$$V = I_a \cdot v_a + I_n \cdot v_n = I(s) \cdot v_a + I(s_n) \cdot (v_n - v_a) \quad (9)$$



BW (tempo de espera)

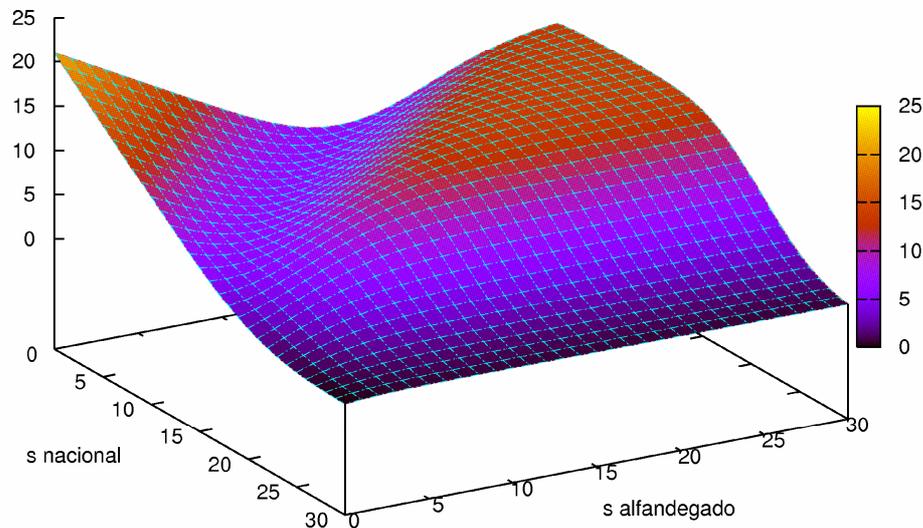


Figura 3: BW com $L = 21$, $\lambda = 1$ e $t_{tr} = 14$

onde v_a é o valor contábil da mercadoria no porto seco, v_n é o valor contábil no inventário nacional e s é a soma das posições de estoque ($s = s_n + s_a$).

Desta forma, nosso modelo de entreposto alfandegário está completamente desenvolvido, o que permite uma pré-análise qualitativa. Como já mencionado acima, o modelo mostra os efeitos indesejáveis em relação ao BW , que aparecem quando o t_{tr} estiver elevado. Um exemplo é ilustrado na FIGURA 3 que mostra o BW em função de s_n e s_a , usando um $L = 21$, $\lambda = 1$ e $t_{tr} = 14$. Esse gráfico possui um mínimo local. Isto significa que o tempo de espera cresce com o aumento da posição de estoque total, o que é um paradoxo.

O que explica esse fenômeno é o fato de que um s_n e s_a pequeno causa um alto nível de faltas de estoque. Isso aumenta o nível de pedidos atrasados (*backorders*) que serão satisfeitos pelas importações. As importações chegam diretamente ao inventário nacional e são imediatamente entregues aos clientes. Uma elevação do s_a , sem mexer no s_n , diminuiria as faltas de estoque e elevaria as transferências do entreposto. Porém, as transferências demorariam mais do que a chegada da próxima importação e assim causariam tempos de esperas mais longos. Isso explica o paradoxo que um BW para um $s = s_n + s_a$ maior pode ser menor do que um BW para um s maior.



A próxima seção mostra que esse efeito não aparece caso $\lambda \cdot t_{tr}$ seja menor ou igual a 1.

4. OTIMIZAÇÃO DO MODELO

O modelo de inventário foi desenvolvido para um item, porém, o objetivo é resolver o seguinte problema para k itens: minimizar o tempo médio de espera BW_{ϕ} , sujeito a um limite máximo do valor de estoque V_{Max} e às probabilidades de faltas máximas de estoque A_{Max} para cada item i . O problema pode ser formulado como:

$$\begin{aligned} \text{Minimiza:} \quad & \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \lambda_i BW_i = BW_{\phi} \\ \text{Sujeito:} \quad & \sum_{i=1}^k V_i \leq V_{Max} \\ & A_i \leq A_{Max_i} \end{aligned}$$

Esse modelo de otimização difere da maioria dos modelos de inventário da pesquisa operacional que se focam na otimização dos custos totais da logística. Porém, a solução da questão apresentada pode ser bastante útil para empresas que utilizam uma estratégia de enfoque, baseada na velocidade de entrega. Essa opção estratégica é baseada nos modelos de Porter e Slack, que foram resumidos e aplicados à realidade brasileira por Laurindo & Carvalho (2003).

A otimização em questão refere-se a um problema de programação inteira não-linear (*nonlinear integer programming problem*) ou problema da mochila não-linear (*nonlinear knapsack problem*). Bretthauer & Shetty (1995) sugeriram um caminho que leva a uma aproximação do resultado ótimo desse problema. Os escritores partiram da condição de *Kuhn-Tucker* para obter uma solução não-inteira para chegar a uma solução em números inteiras. Em seguida, os autores aplicam um algoritmo *Branch-and-Bound* ou uma heurística. Porém, esse caminho é bastante complexo, especialmente no caso de funções não fechadas como, por exemplo, a função cumulativa da distribuição de Poisson.



Em função disso, apresenta-se um caminho diferente e mais intuitivo. Primeiramente, é desenvolvido um algoritmo para otimizar o inventário de um único item. Em seguida, esse algoritmo é incorporado a uma heurística que resolve o problema mencionado acima.

O algoritmo para um item nada mais é do que uma busca para o par s_n, s_a que calcula o BW mínimo, dado um V_{Max} . A rotina que resolve esse problema é baseada na idéia de que um maior investimento em estoque resultará em um BW menor, porém, precisa-se definir o valor do investimento que será aplicado em um armazém alfandegário. Assim, a busca se restringe às combinações s_n, s_a que andam na fronteira $V(s_n, s_a) \leq V_{Max}$. O algoritmo pode ser descrito da seguinte forma:

```
s_n_ótimo = s_n = 0;
WHILE (V(s_n, s_a+1) < V_Max);
    s_a++;
ENDWHILE;
s_a_ótimo = s_a;
BW_ótimo = BW(s_n, s_a);

WHILE (s_a-1 >= 0)
    s_a--;
    WHILE (V(s_n+1, s_a) <= V);
        s_n++;
    ENDWHILE;
    IF (BW(s_n, s_a) < BW_ótimo)
        BW_ótimo = BW(s_n, s_a);
        s_a_ótimo = s_a;
        s_n_ótimo = s_n;
    ENDIF
ENDWHILE
```

Dado esse algoritmo¹, falta somente a definição dos V_{Max} , ótimos para chegar à heurística de otimização de k itens. O ponto de partida para resolver essa questão é a aplicação da heurística gulosa (*greedy heuristic*) para o problema da mochila binária (*binary knapsack problem*). Essa heurística foi apresentada por Martello & Toth (1990) que discutem o problema da mochila com profundidade. O objetivo desse problema é a seleção de itens a serem incluídos na mochila que possui uma capacidade limitada, a fim de maximizar sua utilidade. Uma maneira de se resolver esse problema parte de uma ordenação dos itens por custo-benefício. Em seguida, inclui-se, primeiramente, aqueles itens com o maior custo-benefício, desde que a capacidade da mochila não seja excedida. Para o nosso problema, isso

¹ No algoritmo, o valor $s = s_n + s_a$ não pode ser menor do que um s_{min} para não violar a restrição A_{Max} .
Uma substituição do WHILE ($s_a - 1 \geq 0$) pelo WHILE ($s_a - 1 \geq 0$ AND $s_a + s_n -$



pode ser traduzido da seguinte forma: acrescenta-se ao V_{Max_i} o item que tem o maior $-\frac{\Delta BW}{\Delta V}$, desde que o valor atual do estoque mais o valor de ΔV seja menor ou igual a V_{Max} .

Para que esse princípio possa, realmente, ser utilizado é importante provar que cada aumento de s_n ou s_a trará um valor de $-\frac{\Delta BW}{\Delta V}$ menor do que o aumento anterior. Se essa relação não é válida, não se pode ordenar os itens em função de $-\frac{\Delta BW}{\Delta V}$, que é um pré-requisito da heurística de Martello & Toth.

A prova dessa relação nos obriga a calcular os valores de $-\frac{\Delta BW}{\Delta s_a}$, $-\frac{\Delta BW}{\Delta s_n}$, $\frac{\Delta V}{\Delta s_a}$ e

$\frac{\Delta V}{\Delta s_n}$, usando as formulas (5) e (9):

$$-\frac{\Delta BW}{\Delta s_a} = -\frac{1}{\lambda} \cdot \left[\lambda L - \sum_{i=0}^s G^0(i) - \lambda L + \sum_{i=0}^{s-1} G^0(i) \right] - [G(s+1) - G(s)] \cdot t_{tr} = \frac{1 - G(s)}{\lambda} - g(s+1) \cdot t_{tr} \quad (10)$$

$$-\frac{\Delta BW}{\Delta s_n} = \frac{1 - G(s)}{\lambda} - [G(s+1) - G(s) - G(s_n+1) + G(s_n)] \cdot t_{tr} = \frac{1 - G(s)}{\lambda} - [g(s+1) - g(s_n+1)] \cdot t_{tr} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta s_a} = [I(s+1) - I(s)] \cdot v_a = \left[1 - \sum_{i=0}^s G^0(i) + \sum_{i=0}^{s-1} G^0(i) \right] \cdot v_a = G(s) \cdot v_a \quad (12)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta s_n} = [I(s+1) - I(s)] \cdot v_a + [I(s_n+1) - I(s_n)] \cdot [v_n - v_a] = G(s) \cdot v_a + G(s_n) \cdot [v_n - v_a] \quad (13)$$

Assim, é possível mostrar que o valor de $-\frac{\Delta BW}{\Delta V}$ cai continuamente quando s_n cresce e s_a fica fixo:

$$\left. -\frac{\Delta BW}{\Delta V} \right|_{s_n; s_a \text{ fixo}} \geq \left. -\frac{\Delta BW}{\Delta V} \right|_{s_n+1; s_a \text{ fixo}} \quad (14)$$

$$\Leftrightarrow \frac{1 - G(s) - [g(s+1) - g(s_n+1)] \lambda t_{tr}}{G(s) \cdot v_a + G(s_n) \cdot [v_n - v_a]} \geq \frac{1 - G(s+1) - [g(s+2) - g(s_n+2)] \lambda t_{tr}}{G(s+1) \cdot v_a + G(s_n+1) \cdot [v_n - v_a]}$$



$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow \frac{1-G(s)-[g(s+1)-g(s_n+1)]\lambda t_{tr}}{G(s) \cdot v_a} \geq \frac{1-G(s+1)-[g(s+2)-g(s_n+2)]\lambda t_{tr}}{G(s+1) \cdot v_a} \\ &\Leftrightarrow \frac{1-G(s)}{G(s)} \geq \frac{1-G(s+1)}{G(s+1)} \quad \wedge \quad \frac{g(s_n+1)-g(s+1)}{G(s)} \geq \frac{g(s_n+2)-g(s+2)}{G(s+1)} \\ &\Leftrightarrow g(s_n+1)-g(s+1) \geq g(s_n+2)-g(s+2) \quad ; \quad g(s+2) = \frac{\lambda L}{s+2} \cdot g(s+1) \\ &\Leftrightarrow g(s_n+1)-g(s+1) \geq \frac{\lambda L}{s_n+2} \left[\frac{s_n+2}{s+2} g(s_n+1)-g(s+1) \right] \quad ; \quad \frac{s_n+2}{s+2} \leq 1 \\ &\Leftrightarrow s_n \geq \lambda L - 2 \quad (15) \end{aligned}$$

O raciocínio acima revela que a heurística sugerida pode ser aplicada no caso em que s_n é maior ou igual a $L - 2$. Mas pode-se usar a heurística para $s_n < L - 2$ também?

Nesse caso, sabe-se que vale a relação $g(s_n+1) < g(s_n+2)$, $\forall s_n < \lambda L - 2$. Assim, a inequação (14) pode ser reduzida para:

$$\frac{1-G(s)-g(s+1)\lambda t_{tr}}{G(s) \cdot v_a} \geq \frac{1-G(s+1)-g(s+2)\lambda t_{tr}}{G(s+1) \cdot v_a},$$

que é a mesma relação que indicaria uma queda contínua de $-\frac{\Delta BW}{\Delta V}$ quando s_n fica fixo:

$$\begin{aligned} &\frac{-\Delta BW}{\Delta V} \Big|_{s_a; s_n \text{ fixo}} \geq \frac{-\Delta BW}{\Delta V} \Big|_{s_a+1; s_n \text{ fixo}} \\ &\Leftrightarrow \frac{1-G(s)-g(s+1)\lambda t_{tr}}{G(s) \cdot v_a} \geq \frac{1-G(s+1)-g(s+2)\lambda t_{tr}}{G(s+1) \cdot v_a} \end{aligned}$$

E isso pode ser reduzido para:

$$\begin{aligned} &\Leftrightarrow \frac{1}{G(s)} - \frac{1}{G(s+1)} \geq \left[\frac{g(s+1)}{G(s)} - \frac{g(s+2)}{G(s+1)} \right] \cdot \lambda t_{tr} \\ &\Leftrightarrow \frac{G(s+1)-G(s)}{G(s+1)g(s+1)-G(s)g(s+2)} \geq \lambda t_{tr} \end{aligned}$$



$$\Leftrightarrow \frac{G(s+1) - G(s)}{G(s+1) - \frac{\lambda L}{s+2} G(s)} \geq \lambda t_r \quad ; \quad \frac{g(s+2)}{g(s+1)} = \frac{\lambda L}{s+2}$$

Caso $G(s+1) - \frac{\lambda L}{s+2} \cdot G(s) \geq 0, \forall s \geq 0$, pode-se simplificar a inequação para

$$\Leftrightarrow \frac{G(s+1) - G(s)}{G(s+1) - \frac{\lambda L}{s+2} G(s)} \geq \frac{1}{G(s+1)} \geq \lambda t_r \quad (16)$$

o que pode ser provado pelo indução:

$$\text{Dado } G(s+1) \geq \frac{\lambda L}{s+2} \cdot G(s)$$

$$\text{conclui-se que } G(s+2) \geq \frac{\lambda L}{s+3} \cdot G(s+1)$$

$$\Leftrightarrow G(s+1) + g(s+2) \geq \frac{\lambda L}{s+3} \cdot G(s) + \frac{\lambda L}{s+3} \cdot g(s+1)$$

$$\Leftrightarrow g(s+2) \geq \frac{\lambda L}{s+3} \cdot g(s+1) \quad ; \quad G(s+1) \geq \frac{\lambda L}{s+2} G(s) \geq \frac{\lambda L}{s+3} G(s)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\lambda L}{s+2} \geq \frac{\lambda L}{s+3}$$

$$\text{começando com } s = 0: \quad G(0+1) \geq \frac{\lambda L}{0+2} \cdot G(0) \Leftrightarrow (1 + \lambda L) \geq \frac{\lambda L}{2}$$

Assim, a relação (16) terá o limite:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \frac{1}{G(s+1)} = 1 \geq \lambda t_r \quad (17)$$

Isso quer dizer que, somente quando a demanda média durante o tempo t_r ficar abaixo de 1, o BW cairá continuamente com o crescimento de s_n ou s_a . Assim, o paradoxo



mostrado na seção anterior não aconteceria. Desta forma, pode-se aplicar a seguinte heurística:

```
FOR (CADA ITEM i)
  calcula S_MIN[i] para atingir o A[i];
  IF ( V_N[i] > V_A[i] ) THEN S_A[i] := S_MIN[i]
    ELSE S_N[i] := S_MIN[i];
  calcula V[i];
  decide se um aumento de S_A[i] ou de S_N[i] traz o menor DELTA_V[i]
    e calcula o -DELTA_BW[i]/DELTA_V[i];
ENDFOR

IF (A SOMA DE V[..] > V_MAX ) THEN
  saia do programa dando um erro;

WHILE (A SOMA DE V[..] <= V_MAX)
  BEST_DELTA_BW_V := 0;
  FOR (CADA ITEM i)
    IF (A SOMA DE V[..] + DELTA_V[i] >= V_MAX) THEN
      marca o item i como inválido;
    IF (i = válido AND -DELTA_BW[i]/DELTA_V[i] > BEST_DELTA_BW_V) THEN
      marca i como melhor item e anota BEST_DELTA_BW_V;
    ENDFOR;
  IF (UM ITEM i VÁLIDO FOI ENCONTRADO) THEN
    i := o melhor item encontrado;
    V[i] += DELTA_V[i];
    calcula o melhor par S_N, S_A para i, dado V_MAX[i] e S_MIN[i];
    decide se um aumento de S_A[i] ou de S_N[i] traz o menor DELTA_V[i]
      e calcula o DELTA_BW[i]/DELTA_V[i];
  ENDIF;
ENDWHILE;
```

5. ESTUDO DE CASO

A heurística desenvolvida no item 4 foi aplicada na filial brasileira de uma empresa multinacional que importa e distribui componentes eletrônicos e plásticos para máquinas e instalações industriais. Como a maioria desses componentes são peças específicas, a demanda costuma ter uma alta variabilidade. Os números de SKU cadastrados e vendidos ilustram esse fato. A empresa oferece ca. 30.000 SKU e vendeu no Brasil 2255 SKU diferentes no ano de 2005, mas somente 489 SKU dos 2255 SKU tinham mais do que uma demanda por mês. Por outro lado, os clientes necessitam muitas vezes *lead-times* de 0-4 dias. Isso é causado, principalmente, em função do reparo de máquinas ou, no caso de fabricantes de máquinas, pelos problemas no planejamento e controle da produção. Um outro fator que dificulta a logística é o tempo de reposição relativamente longo. Mesmo considerando o uso de transportes aéreos, os tempos de suprimentos chegam a ser de 1 a 6 semanas.



Essas restrições fizeram com que a empresa considerasse o uso do porto seco para melhorar o tempo de espera de clientes sem prejudicar o nível de estoque. Nesse contexto, a heurística tinha como objetivo verificar se o uso do entreposto aduaneiro realmente terá um impacto significativo nas operações logísticas.

Os parâmetros para a heurística foram obtidos da seguinte forma:

- λ_i se baseia na demanda do ano de 2005,
- os *lead-times* L_i foram assumidos fixos em função da classificação ABC da matriz,
- os limites de faltas de estoques A_{Max_i} foram determinados por uma classificação denominada 'Pronta Entrega', que define um limite A_{Max_i} de 1% para itens de 'Pronta Entrega' e um limite A_{Max_i} de 100% para os demais itens.
- Os valores contábeis v_{n_i} e v_{a_i} foram calculados em função do preço de compra multiplicado por um fator fixo que engloba os custos logísticos envolvidos.

A comparação entre a operação utilizando e não utilizando o porto seco foi feita com a mesma heurística. Somente para o caso em que não se utiliza o porto seco, os valores contábeis do entreposto v_{a_i} são iguais ao valor contábil da mercadoria nacionalizada v_{n_i} .

Assim, a heurística poderia ser aplicada se não existissem dois detalhes:

- A empresa faz importações semanais, usando a política (T,S), enquanto a heurística assume uma reposição imediata. Em função disso, os *lead-times* originais L_i serão acrescidos por $T / 2 = 3,5$ dias.

- A demanda não é um processo de Poisson, mas um processo de Poisson Composta (*compound Poisson*), onde a chegada de cada demanda segue um processo de Poisson, mas a quantidade demandada D é variável e, em nosso caso, terá uma distribuição desconhecida. Para que a heurística possa ser aplicada, assume-se que cada demanda terá uma quantidade fixa proporcional ao valor esperado ou valor médio da quantidade demandada $E[D]$. Assim, os valores contábeis para a heurística serão $v_{heurística} = v_{real} \cdot E[D]$, e os pontos de estoque obtidos pela heurística precisam ser transformados para $s_{real} = s_{heurística} \cdot E[D]$.



Com essas adaptações, a heurística foi aplicada para diversos valores de V_{Max} , com o objetivo de criar uma curva de *trade-off* (SILVER ET AL., 1998) de tempo médio de espera do cliente BW e valor do estoque V_{Max} .

Em paralelo, foram feitas simulações utilizando as posições de estoques calculadas pela heurística. O objetivo desse exercício é verificar se as adaptações feitas não distorceram grosseiramente a situação real. Essas simulações utilizaram as demandas do ano 2005 e recalcularam tanto os valores de estoque quanto os tempos médios de espera.

Além disso, as simulações também levaram em consideração o uso da política (T, S) aplicada pela empresa.

Os resultados da heurística e das simulações, com e sem o uso do porto seco, são ilustrados pela FIFURA 4. Essa figura mostra, claramente, que as adaptações geraram uma certa distorção. Mas ela também deixa claro que o regime de entreposto traz uma vantagem significativa quando V_{Max} fica abaixo de uma faixa de R\$ 1.100.000,00 a R\$ 1.500.000,00. Acima dessa faixa, a diferença do tempo de espera de clientes entre uma operação que utiliza e outra que não utiliza o regime de entreposto alfandegário é negativa. Essa conclusão geral vale tanto para os resultados da heurística quanto os da simulação.

A empresa estudada permite um V_{Max} entre R\$ 1.500.000,00 e R\$ 2.000.000,00. Em função disso, o uso do porto seco não seria recomendado. Por outro lado, ficou claro que o regime de entreposto alfandegário seria uma opção interessante caso o V_{Max} permitido fosse menor.

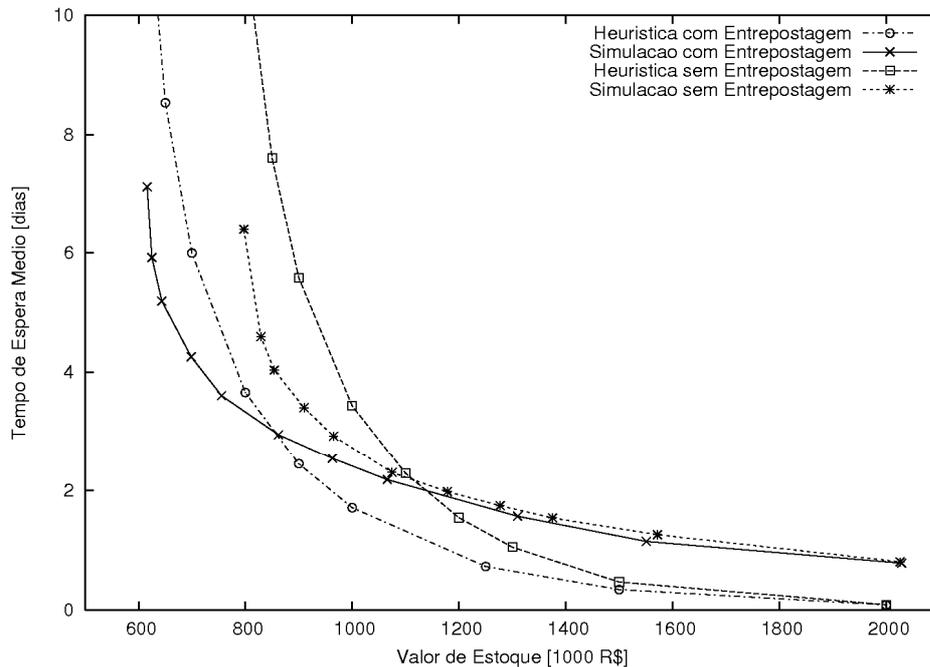


Figura 4 - Resultados da heurística e simulação (com e sem entrepostagem)

6. CONCLUSÕES

Esse artigo destacou a importância dos portos secos para as importações brasileiras. Apesar dessa importância, há poucos modelos de decisão para o uso dos mesmos.

Em função disso, foi apresentado um modelo estocástico para a estocagem em entrepostos aduaneiros. A partir desse modelo, tem-se uma adaptação da heurística gulosa (*greedy heuristic*) para o problema da mochila (*knapsack problem*) que otimiza o tempo de espera de clientes.

O modelo de otimização foi aplicado em uma importadora de componentes eletrônicos e plásticos para máquinas. Como as características da demanda e da política de suprimentos dessa empresa diferem em relação ao modelo à heurística apresentada no item 4, a mesma foi adaptada. Conseqüentemente, foi necessário assegurar que essas adaptações não criaram distorções. Isso foi solucionado através da comparação dos resultados da heurística e de uma simulação que utilizava os níveis de estoque obtidos pela heurística.

Feitos os cálculos para vários cenários, chega-se à conclusão que as adaptações realmente criaram uma distorção que, todavia, não prejudicou o resultado final. O regime de entreposto alfandegário traz benefícios em relação ao tempo de espera de clientes, desde que a



possibilidade de investimento em estoque seja inferior a um certo limite. No caso em que esse limite é ultrapassado, o uso do porto seco não gera benefícios notáveis.

Pode-se concluir também que a heurística apresentada tem certas restrições que servem como sugestões para futuros trabalhos. Primeiramente, por ser uma heurística, não se pode garantir um resultado ótimo. A questão como calcular uma solução 100% ótima fica em aberto. A segunda deficiência é a desconsideração de situações mais complexas, como o uso da política (T,S) ou um processo de demanda com distribuição de Poisson composta (*compound Poisson*). Ambos os casos foram incluídos no trabalho através de adaptações, que geraram uma distorção em relação aos resultados da heurística. Esses desvios não poderiam ser aceitáveis, o que necessitaria a criação de novos modelos. Vale ressaltar também que os custos também fazem parte dessa discussão, o que abre um campo grande de pesquisa em relação à otimização dos custos totais das cadeias de suprimentos que utilizam o regime de entreposto alfandegário.

REFERENCIAS

BRETTAUER, K. M.; SHETTY, B. The nonlinear resource allocation problem. **Operations Research**, v. 43, n. 4, p. 670-683, 1995.

CHEN, F.; ZHENG, Y.-S. Waiting time distribution in (T,S) inventory systems. **Operations Research Letters**, v. 12, n. 3, p. 145-151, 1992.

EPSTEIN, G.S. Production, Inventory and Waiting Time. **Managerial and Decision Economics**, v. 28, p.579-589, 2007.

EYAN, A.; KROPP, D. E. Periodic review and joint replenishment in stochastic demand environments. **IIE Transactions**, v. 30, p. 1025-1033, 1998.

GOYAL, K.; SATIR, A. T. Joint replenishment inventory control: deterministic and stochastic models. **European Journal of Operational Research**, v. 38, p. 2-13, 1989.

GUTIÉRREZ, C.G. El recinto fiscalizado estratégico: nuevo paradigma de la logística. **Comercio exterior**, v. 55, n. 5, p.451-459, 2005.

KIESMÜLLER, G.P.; KOK, A.G. The customer waiting time in a (R, s, Q) inventory system. **International Journal of Production Economics**, v. 104, p. 354-364, 2006.

LAURINDO F. J. B.; de CARVALHO, M. M. **Estratégias para Competitividade**. São Paulo: Futura, 2003.

MARTELLO, S.; TOTH, P. **Knapsack problems: algorithms and computer implementations**. Chichester: John Wiley & Sons, 1990.



MORINI, C.; PIRES, S. R. I. Um modelo de decisão a consignação de material estrangeiro em cadeias de suprimentos. **Gestão & Produção**, v. 12, n. 1, p. 67-80, 2005.

RAO, U. S. Properties of Periodic Review (R,T) Inventory Control Policy for Stationary, Stochastic Demand. **Manufacturing & Service Operations Management**, v. 5, n. 1, p. 37-53, 2003.

SILVER, E.A., et al. **Inventory Management and Production Planning and Scheduling**. 3.ed. John Wiley & Sons, 1998.

THE WORLD BANK GROUP. Site: <http://www.doingbusiness.org/ExploreTopics/TradingAcrossBorders/> (Acessado no dia 10 de Junho 2006).

WONG, H.; KRANENBURG, B.; HOUTUM, G.; CATTRYSSSE, D. Efficient heuristics for two-echelon spare parts inventory systems with an aggregate mean waiting time constraint per local warehouse. **OR Spectrum**, v. 29, p. 699-722, 2007.

ZIPKIN P. H. **Foundations of inventory management**. Boston: McGraw-Hill, 2000.

Artigo recebido em 2007 e aceito para publicação em 2008