UM ESTUDO SOBRE A UTILIZAÇÃO DE MODELOS MULTI-ELOS PARA GESTÃO DE PEÇAS DE REPOSIÇÃO

João Paulo de Moraes Paludo
EMBRAER S. A.
Av. Brigadeiro Faria Lima, 2170, São José dos Campos, SP, Brasil, 12227-901
joao.paludo@embraer.com.br

Takashi Yoneyama
Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP, Brasil, 12228-900
takashi@ita.br

Leonardo Ramos Rodrigues
Instituto de Aeronáutica e Espaço - IAE
Praça Marechal Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP, Brasil, 12228-904
leonardolrr@iae.cta.br

RESUMO

Na indústria aeronáutica, o investimento em peças de reposição possui valores altos em função dos elevados custos das peças e dos altos níveis de disponibilidade exigidos. Portanto, a implementação de uma estratégia eficiente de controle de estoques torna-se crucial. O uso de modelos multi-elos pode proporcionar uma redução considerada nos custos de estoques para uma determinada disponibilidade. Este artigo apresenta um estudo sobre o uso de um modelo multi-elos para gestão de estoques de peças de reposição. Simulações foram realizadas e os resultados obtidos com o modelo multi-elos foram comparados com os resultados obtidos com um modelo *Single Site*. Os resultados mostram que o uso de modelo multi-elos pode proporcionar reduções significativas de custos.

PALAVRAS CHAVE. Gestão de Estoques. Modelos Multi-Elos. Compartilhamento de Peças de Reposição.

Tópico: L&T - Logística e Transportes

ABSTRACT

In the aviation industry, investments in spare parts are expensive due to the high cost of parts and the high availability level requirements. Therefore, the implementation of an efficient inventory control strategy becomes crucial. The use of multi-echelon models may yield considerable savings in inventory costs for a given availability level. This paper presents a study on the use of a multi-echelon model for spare parts inventory management. A set of simulations was carried out and the results obtained with the multi-echelon model were compared with the results obtained with a Single Site model. Results show that the use of a multi-echelon model may provide significant cost reductions.

KEYWORDS. Inventory Management. Multi-Echelon Models. Spare Parts Sharing.

Paper topic: L&T - Logistics and Transportation

1. Introdução

Considerando a operação das companhias aéreas, em que é crucial manter uma elevada taxa de utilização das aeronaves, o modo de gerenciar as peças de reposição pode afetar de forma significativa os diversos custos envolvidos, bem como a disponibilidade da frota [Kilpi et al., 2009]. Um nível elevado de peças de reposição pode trazer uma alta disponibilidade. Contudo, implicará em grandes custos em função do alto capital paralisado e das despesas gerais de armazenamento. Por outro lado, um estoque subdimensionado pode levar a uma baixa disponibilidade da frota, o que também incorre em custos [Kennedy et al., 2002].

Nesse contexto, a utilização de estoques compartilhados de peças de reposição tem se mostrado uma forma de aumentar a disponibilidade das aeronaves, sem incorrer em custos muito elevados de estoques [Wong et al., 2005; Kutanoglu, 2008].

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo sobre o uso de um modelo multi-elos para gestão de estoques de peças de reposição. Simulações são realizadas e os resultados obtidos com o modelo multi-elos são comparados com os resultados obtidos com um modelo *Single Site*.

As demais seções deste trabalho estão organizadas como segue. A seção 2 descreve o problema de compartilhamento de peças de reposição. A seção 3 apresenta uma breve revisão da literatura. Na seção 4 são apresentados os modelos usados neste trabalho. A seção 5 apresenta os cenários e os dados usados nas simulações. Os resultados das simulações são apresentados na seção 6. As conclusões do trabalho são apresentadas na seção 7.

2. O Problema de Compartilhamento de Peças de Reposição

Um importante fator de desempenho para operadores de aeronaves é a alta utilização das mesmas. Mesmo com a utilização de componentes modulares e de alta confiabilidade, um serviço de substituição rápida é fundamental em caso de falhas. Manter unidades funcionais de substituição em mãos diminui o tempo de reparo das peças falhadas. Os custos deste serviço dependem da disponibilidade desejada e são causados, principalmente, pelo capital investido na reposição de componentes [Kilpi e Vepsalainen, 2004].

A Figura 1 mostra um exemplo de como podem ser criadas redes de compartilhamento de peças. Nela pode-se observar um sistema de compartilhamento por região, no qual alguns países possuem um estoque que é responsável por atender as demandas de uma determinada região. O dimensionamento de cada estoque é feito em função da disponibilidade desejada para a região correspondente. No exemplo, todos os operadores de aeronaves localizados na América do Sul seriam atendidos por um estoque de peças localizado no Brasil.

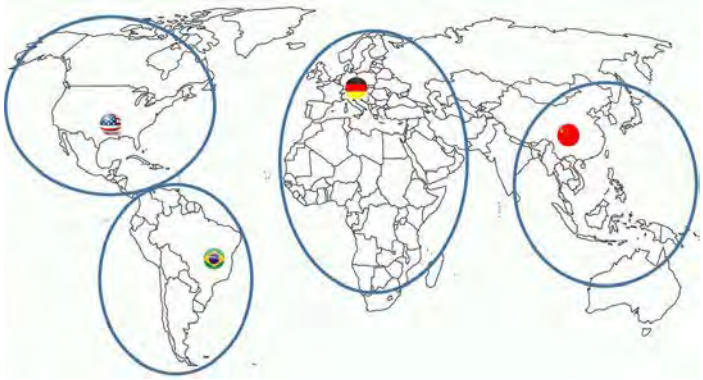

Figura 1: Exemplo de um sistema de compartilhamento de peças

O principal objetivo da utilização desta abordagem de compartilhamento de peças de reposição é a redução dos custos com estoques. Se considerarmos um sistema em que cada operador seja responsável por gerir seus próprios estoques, cada um teria de escalonar seus estoques conforme a tamanho de sua frota e a disponibilidade requerida. Como pode ser visto na

Figura 2, um operador com poucas aeronaves necessitaria de um maior número de peças por aeronave para manter a mesma disponibilidade. A partir do momento em que diversos operadores passam a compartilhar suas peças de reposição, o número de aeronaves atendidas por este estoque aumenta e, conforme demonstra a Figura 2, tem-se um número menor de peças por aeronave, ou seja, um menor custo com estoques por aeronave para um mesmo nível de serviço [Kilpi e Vepsalainen, 2004].

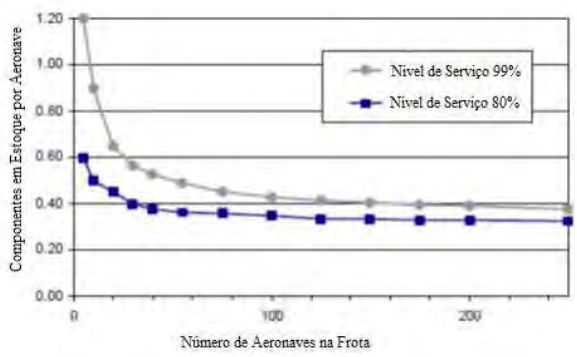

Figura 2: Economia de escala nos custos de estoque

A ideia da utilização do compartilhamento de estoques entre operadores não é uma prática nova no meio aeronáutico. De acordo com Lombardo [2000], nos anos 60 vários operadores com aeronaves similares fundaram consórcios de manutenção com o objetivo de reduzir custos. Alguns dos consórcios formados foram a KSSU e a Atlas. A KSSU era formada pela KLM, SAS, Swissair e UTA. A Atlas era formada pela Air France, Alitalia, Ibeira e Lufthansa.

3. Referencial Teórico

Nos tempos atuais, é de conhecimento geral que a maior parte das organizações possui um local destinado a estocar as peças de reposição, além de um sistema de gerenciamento dessas peças. Desse modo, a forma com que o gerenciamento do estoque é realizado pode se caracterizar como um dos potenciais diferenciais competitivos de uma organização.

No setor aeronáutico, o gerenciamento de estoques se torna ainda mais crítico pois, em geral, as peças de reposição são caras, aumentando os custos com estoques. De acordo com Kinnison [2004], a gestão de estoques é a atividade onde as companhias aéreas gastam a maior parte de seus recursos, sendo esta área objeto de grande interesse da alta administração.

Sabendo da importância do gerenciamento de estoques, diversos modelos foram criados para auxiliar no controle e dar maior previsibilidade na gestão dos mesmos.

3.1. Sistemas Multi-Elos

Sistemas multi-elos podem ser estruturados de diversas formas, e a determinação da topologia de cada sistema é determinante para otimização e análise do mesmo. A Figura 3 apresenta as diferentes topologias de sistemas multi-elos [Snyder e Shen, 2011]. Cada estágio de um sistema multi-elo pode representar uma localidade, um item ou até mesmo uma atividade.

O sistema serial é a topologia mais simplificada dos sistemas multi-elos pois cada estágio possui no máximo um predecessor e um sucessor.

No sistema de montagem cada estágio contém no máximo um sucessor, enquanto no sistema de distribuição cada estágio tem no máximo um predecessor. Sistemas de montagem são geralmente utilizados para representar como um produto final é concebido a partir de uma lista de materiais intermediários. Sistemas de distribuição buscam representar como é feito fluxo de abastecimento de estoque intermediários até a entrega do produto ao consumidor final.

Sistemas arborescentes são sistemas híbridos de montagem e distribuição. Os mesmos não possuem limitações quanto ao número de predecessores e sucessores. Contudo, o grafo de um sistema arborescente não permite a criação de ciclos. Na teoria dos grafos, um ciclo é uma parte do grafo cujas ligações permitem que a partir de um nó de partida seja feita uma movimentação através de uma sequência de outros nós, voltando ao nó de partida sem repetir quaisquer as ligações de nós já utilizadas.

Por fim existem os sistemas gerais onde não existem restrições quanto ao número de sucessores e predecessores, sendo permitida a existência de ciclos no grafo, permitindo maior flexibilidade ao mesmo tempo que aumenta a complexidade da análise.

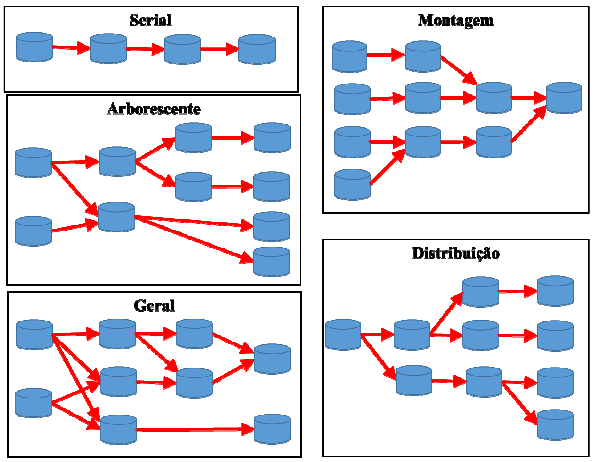

Figura 3: Topologias de sistemas multi-elos

A literatura relacionada à gestão de estoques em sistemas multi-elos teve início nos anos 60. Um método analítico para solução de problemas de gerenciamento de estoques em um sistema multi-elos serial foi apresentado por Clark e Scarf [1960]. Esse modelo considera uma demanda estocástica e não estacionária, os tempos de ressuprimento são determinísticos e o custo é composto pelos custos de armazenagem, pedido e entrega.

Outro modelo foi desenvolvido por Ehrhardt et al. [1981], onde foi proposta uma política estacionária de revisão contínua do tipo (s, S). Nessa política, assim que o estoque atingir um nível igual ou inferior a s, um novo pedido é feito para elevar o nível do estoque para S. Nesse trabalho, os autores consideram apenas o estoque principal, cujas demandas vêm de estoques avançados que utilizam a mesma política de revisão contínua com demandas independentes e identicamente distribuídas. Como custos atribuídos a este modelo, foram considerados os custos relativos a armazenagem, entrega e pedido.

Um modelo de revisão contínua com política do tipo (s, Q) foi proposto por Ganeshan [1999]. Nessa política, um pedido de compra é disparado sempre que o nível do estoque for igual ou inferior a s, e o tamanho do pedido é fixo e igual a Q. O modelo proposto é composto por um estoque principal e controla apenas um tipo de item que é fornecido para diversos estoques avançados. As demandas provenientes dos estoques avançados comportam-se segundo uma distribuição de Poisson e os tempos de ressuprimento são estocásticos.

3.2. Nível de Estoque Virtual

O nível de estoque é um dos principais parâmetros a serem otimizados na teoria de estoques. Sendo assim, pode-se definir dois tipos de nível de estoque, o nível de estoque em mãos e o nível de estoque virtual. O nível de estoque em mãos é a quantidade de peças que estão fisicamente armazenadas no estoque. O nível de estoque virtual mostra qual a real quantidade de peças no sistema, incluindo pedidos que ainda não foram recebidos e pedidos em aberto. O cálculo do estoque virtual é feito pela Equação (1).

$$S = OH + DI - BO \quad (1)$$

onde S é o nível de estoque virtual, *OH* é o número de peças em mãos, *DI* é o número de pedidos enviados que ainda não foram recebidos e *BO* é o número de pedidos em aberto.

O estoque virtual é muito útil pois mostra quantas peças prontas para uso estão disponíveis. Se o estoque virtual é superior ao estoque em mãos, isso significa que existem pedidos a receber. Se o estoque virtual é menor do que no estoque em mãos, isso significa que existem pedidos em aberto.

3.3. Estimativa de Pedidos em Aberto

Uma etapa importante na modelagem de um sistema de gerenciamento de estoques é prever a demanda de cada um dos itens pelo qual o estoque é composto. Desta maneira, pode-se estimar o número de peças necessário para atingir o patamar de disponibilidade ou custo desejado, considerando a diversificação de cada estoque.

No presente trabalho, adotou-se a premissa de que as demandas seguem uma distribuição de Poisson. Segundo o teorema de Palm, se a demanda por um item é um processo de Poisson com média anual *m* e os tempos de reparo das unidades falhadas são independentes e identicamente distribuídos de acordo com qualquer distribuição com média *T* anos, então a distribuição de probabilidade do estado estacionário para o número de unidades de reparo tem uma distribuição de Poisson com média *mT* [Sherbrooke, 2004].

O valor de *mT* corresponde ao valor médio de peças em reparo. Portanto, o número estimado de pedidos em abertos ou EBO (*expected backorders*) pode ser calculado a partir de parâmetros de demanda de cada item em cada local de operação da aeronave, dos tempos de reparo nas oficinas, da probabilidade do item ser reparado no próprio local de operação e do tempo de remessa entre o armazém central e o armazém local (*lead-time*) [Sherbrooke, 2004].

3.4. Análise Marginal

Uma vez que a adição de uma nova peça de reposição ao estoque resulta em uma redução do número de pedidos em aberto, em sistemas de múltiplos componentes é necessário utilizar alguma técnica para decidir qual dos componentes deve ser comprado para se atingir a maior redução de *expected backorders* (EBO) com relação ao custo desta compra.

A Análise Marginal [Sherbrooke, 2004] recebe este nome porque em cada passo do algoritmo necessita-se avaliar apenas o impacto no custo e na disponibilidade causado pelo próximo item a ser adquirido. Ou seja, o valor marginal ou incremental fornece todas as informações necessárias sobre cada item. O valor calculado pela Análise Marginal, ΔEBO , é obtido com base na Equação (2).

$$\Delta EBO = \big(EBO(s-1) - EBO(s)\big)/C \quad (2)$$

onde *EBO* (*s-1*) é o número esperado de pedidos em aberto com *s*-1 peças, *EBO* (*s*) é o número esperado de pedidos em aberto com *s* peças e *C* é o custo unitário da peça.

Considere, por exemplo, o item do tipo “A”, de custo 30, e o item do tipo “B”, de custo 65. O número de pedidos em abertos é fornecido pela Tabela 1. Se for utilizada a técnica de análise marginal, pode-se decidir se, a partir de um estoque vazio, (*s*=0), deve-se comprar uma peça do item “A” ou do item “B” para que com uma peça em estoque tenha-se a maior redução de pedidos em aberto por custo de compra.

Tabela 1: Exemplo de aplicação da Análise Marginal

s	Item A		Item B	
	EBO(s)	ΔEBO	EBO(s)	ΔEBO
0	3,780	-	6,220	-
1	2,800	0,033	5,220	0,015
2	1,910	0,030	4,230	0,015
3	1,180	0,024	3,290	0,015

Tendo como base as colunas de EBO de cada item, observa-se que com um estoque zero ter-se-ia EBO(0) =3,78 + 6,22 = 10 pedidos em aberto. As colunas de ΔEBO permitem comparar o quanto os pedidos em abertos iriam ser reduzidos por cada unidade monetária gasta. Desta maneira, o item "A" é o escolhido, uma vez que seu ΔEBO = (3,78-2,80)/30 = 0,033 e o item "B" ΔEBO = (6,22-5,22)/65 =0,015. Portanto, com um estoque de uma peça, chega-se ao número de pedidos em aberto de 2,80 + 6,22 = 9,02. A análise marginal é usada nos dois modelos estudados neste trabalho: o modelo *Single Site* e o modelo *METRIC*, que serão descritos na próxima seção.

4. Modelos Propostos

4.1. Modelo *Single Site*

O modelo *Single Site* tem como objetivo modelar a dinâmica presente no sistema de gerenciamento de peças com apenas um estoque e diversos tipos de peças a serem administrados. O cenário modelado para o caso *Single Site* buscou modelar diversas bases em diferentes localizações, sendo que em cada base é possível estocar diferentes itens. A Figura 4 mostra os ciclos percorridos pelas peças. Uma vez que a falha ocorre em alguma das aeronaves da frota do cliente, a mesma é retirada da aeronave e enviada para a oficina de reparo. Considerando que o estoque é capaz de atender a demanda deste tipo de peça, outra peça em condições operacionais é enviada para o cliente. Na oficina de reparo a peça falhada é reparada. Após o reparo, a peça é enviada para o estoque do qual o cliente em questão demandou a peça para substituição. Desta maneira, o ciclo é fechado e a peça reparada volta a ficar disponível para consumo dos clientes.

Conforme apresentado neste modelo, as peças que falham no ciclo de clientes da base 1 serão consertadas e repostas novamente na base 1. Neste cenário, não é possível mandar uma peça para reparo em uma região diferente da região de origem da peça.

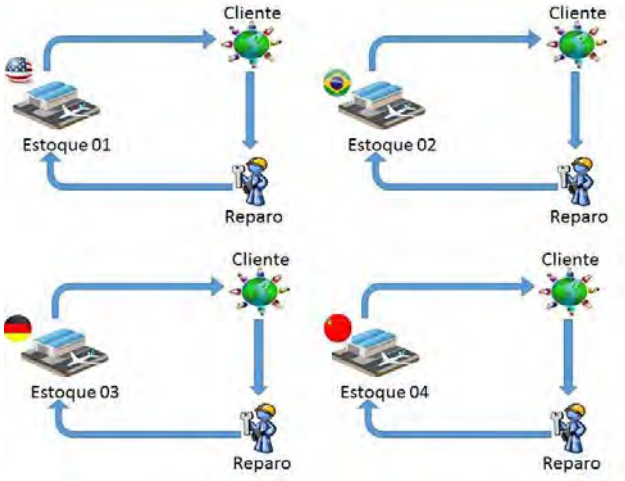

Figura 4: Cenário de simulação para o modelo *Single Site*

Para um sistema de estoques de múltiplos tipos de componentes, o cálculo da disponibilidade da frota no modelo *Single Site* é feito usando a Equação (3).

$$A = 100\prod_{i=1}^{I}\left\{\left(1 - EBO_i(s_i)/NZ_i\right)\right\}^{Z_i} \quad (3)$$

onde A é a disponibilidade da frota, I é o número de tipos de componentes, s_i é a quantidade de peças do componente i, $EBO(s_i)$ é o número estimado de pedidos em aberto do componente i se s_i peças forem compradas, N é o tamanho da frota e Z_i é o número de peças do componente i instalados em cada aeronave.

4.2. Modelo *METRIC*

O modelo *METRIC* (*Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control*) foi originalmente proposto por Sherbrooke [2004] e tem como objetivo representar a dinâmica do gerenciamento de estoques em uma rede de compartilhamento de peças em que as diversas bases compartilham peças entre si e também com um estoque principal, denominado *Hub*. Para a modelagem *METRIC*, também é considerado o cenário com diversos tipos de peças.

Em sua concepção original, o modelo *METRIC* envolve o emprego de um estoque principal (*Hub*) de onde os estoques avançados (bases) demandam itens. O principal objetivo da introdução de um *Hub* onde não existem demandas diretas de clientes é poder concentrar as peças em um só local e eliminar a necessidade de duplicar estoques de segurança.

O cenário modelado neste estudo trata-se de uma adaptação do modelo *METRIC*. O modelo trabalhado busca analisar um sistema de gerenciamento de estoques conforme apresentado na Figura 5, em que as demandas geradas pelos clientes são atendidas pelo estoque da base correspondente. As bases, por sua vez, são atendidas pelo *Hub*. As peças são sempre enviadas para um único reparador e, uma vez reparadas, são enviadas para o *Hub*.

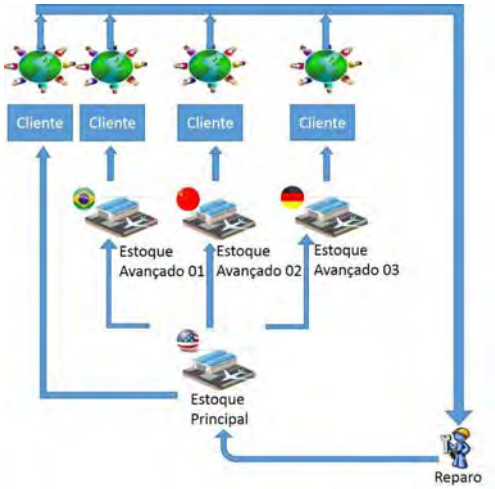

Figura 5: Cenário de estudo do modelo *METRIC*

Para o modelo *METRIC*, considerando que uma parcela das peças falhadas será reparada na própria base e as demais peças serão reparadas no *Hub*, deve-se atentar para o cálculo das demandas de cada base e principalmente do *Hub*. O cálculo da demanda média anual de peças no *Hub* para o modelo *METRIC* é feito usando a Equação (4).

$$m_{os} = \sum_{j=1}^{J} m_j\left(1 - r_j\right) \quad (4)$$

onde m_{os} é a demanda média anual no *Hub* proveniente das bases, m_j é a demanda média anual na base *j* e r_j é a probabilidade de reparo na base *j*.

Considerando a adaptação utilizada no modelo proposto, a demanda média anual total do *Hub*, m_0, é obtida pela Equação (5):

$$m_0 = m_{os} + m_{Hub} \tag{5}$$

onde m_{Hub} é a demanda média anual no *Hub* proveniente dos clientes diretos.

O valor médio de peças em reparo no *Hub* é calculado de acordo com o teorema de Palm [Sherbrooke, 2004]. O cálculo do valor médio de peças em reparo em cada base é feito usando a Equação (6).

$$\mu_j = m_j\left(r_j T_j + \left(1-r_j\right)\left\{O_j + EBO\left(S_0 \mid m_0 T_0\right)/m_0\right\}\right) \tag{6}$$

onde T_j é o tempo médio de reparo na base *j*, O_j é o *lead-time* entre o *Hub* e a base *j*, S_0 é o nível de estoque do *Hub* e T_0 é o tempo médio de reparo no *Hub*.

Para o item que é sempre reparado na base, o valor médio de peças em reparo será dado por m_jT_j, assim como apresentado para o modelo *Single Site*. Para os itens que em parte das vezes são reparados no *Hub*, nota-se que a parte correspondente aos reparos feitos na base são calculados por $m_jr_jT_j$, e o restante da equação envolve as peças que serão reparadas no *Hub*, onde são levados em consideração o *lead-time* do reparo no *Hub* mais o número de pedidos em aberto colocados pela base avançada que ainda não foram finalizados.

Para realização do cálculo da disponibilidade do modelo *METRIC* é utilizada a Equação (7), que é uma média das disponibilidades de cada uma das bases avançadas ponderada pelo tamanho das respectivas frotas.

$$A = \frac{\sum_{j=1}^{J} A_j N_j}{\sum_{j=1}^{J} N_j} \tag{7}$$

onde A_j é a disponibilidade na base *j*, N_j é o tamanho da frota atendida pela base *j* e J é o número total de bases.

Com os valores das disponibilidades, dos pedidos em aberto e dos custos das diversas configurações de estoque para cada nível total de estoque *S*, pode-se fazer a construção da curva de pedidos em aberto por custo e de disponibilidade por custo.

5. Simulação

Considerando os modelos *Single Site* e *METRIC* apresentados, serão feitas simulações nas quais o objetivo é minimizar o custo total das peças adquiridas, sujeito a uma restrição de disponibilidade. Será feito um estudo comparativo dos modelos *Single Site* e *METRIC* em termos de custo de aquisição de peças. Para o modelo *Single Site*, uma simulação é feita para cada base e os custos são somados para compor o custo total. Para o modelo *METRIC*, é feita uma simulação para cada localização possível do *Hub*, e o menor valor é considerado.

Neste trabalho foram usados dados sintéticos. Quatro bases hipotéticas são consideradas. A quantidade de aeronaves atendidas por cada uma das bases é apresentada na Tabela 2. As características dos itens e dos estoques associados são apresentadas nas Tabelas 3 e 4. Nessas tabelas, são apresentados a demanda média anual m_j, o tempo médio de reparo T_j (em ano), a probabilidade de reparo do item na própria base r_j e o custo unitário de cada peça C_j. O *lead time* entre as bases é apresentado na Tabela 5. O *lead-time* representa o tempo de deslocamento (em ano) entre as bases e o *Hub*.

Tabela 2: Tamanho das frotas por base

Base 1	Base 2	Base 3	Base 4
80	10	60	25

Tabela 3: Dados dos itens 1 e 2

Dado	Item 1				Item 2			
	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4
m_j	45,2	6,1	23,4	12,5	36,7	8,3	17,7	15,5
T_j	0,077	0,144	0,114	0,069	0,103	0,135	0,142	0,070
r_j	0,40	0,10	0,30	0,20	0,30	0,15	0,25	0,20
C_j	30	30	30	30	150	150	150	150

Tabela 4: Dados dos itens 3 e 4

Dado	Item 3				Item 4			
	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4
m_j	80,8	13,6	72,1	10,7	28,3	11,3	53,2	10,2
T_j	0,077	0,123	0,130	0,075	0,113	0,101	0,085	0,086
r_j	0,20	0,20	0,20	0,20	0,60	0,10	0,40	0,20
C_j	85	85	85	85	65	65	65	65

Tabela 5: *Lead-time* entre as bases

Item	Bases 1 e 2	Bases 1 e 3	Bases 1 e 4	Bases 2 e 3	Bases 2 e 4	Bases 3 e 4
Item 1	0,060	0,057	0,042	0,059	0,073	0,058
Item 2	0,110	0,079	0,074	0,090	0,118	0,083
Item 3	0,071	0,050	0,047	0,056	0,071	0,074
Item 4	0,094	0,076	0,075	0,076	0,122	0,102

Para as simulações utilizando o modelo *METRIC*, uma das bases deve ser escolhida para ser o *Hub*. Portanto, quando se utiliza a base 1 como *Hub*, por exemplo, a probabilidade de reparo na base 1 (r_1) é alterada para 1, e o tempo médio de reparo no *Hub*, é alterado para T_1.

6. Resultados

Foram simulados os casos em que cada um dos itens é controlado separadamente, além de todas as combinações possíveis envolvendo dois, três e quatro itens. Em todas as simulações, buscou-se atender uma disponibilidade mínima de 99%. Primeiramente, é realizada uma análise para definir o melhor posicionamento do *Hub* no *METRIC*. Em seguida, é apresentado um comparativo entre os resultados dos modelos.

6.1. Posicionamento do Hub no Modelo *METRIC*

Para identificar a melhor posição para o *Hub*, deve ser feita uma simulação para cada uma das possíveis localizações. A Figura 6 mostra os custos obtidos para as diferentes localizações do *Hub*, considerando apenas o item 1. Nota-se que a configuração que resulta no menor custo é aquela na qual o *Hub* é colocado na base 1. Esse resultado se repetiu para todos os cenários simulados. Os resultados também ilustram o impacto que a escolha da localização do *Hub* tem no resultado final do modelo *METRIC*.

O fato de a base 1 possuir a maior demanda entre as bases contribui para ela seja a melhor escolha para a localização do *Hub*. Isto ocorre pois, quando as peças necessitam ser reparadas no *Hub*, os tempos de transporte entre os estoques afetam significantemente a disponibilidade das peças nas bases avançadas. Obviamente, dependendo das relações entre custo da peça, probabilidade de reparo na base e tempos de transporte, uma base que não possui a maior demanda pode, ainda assim, ser a mais indicada para o posicionamento do *Hub*.

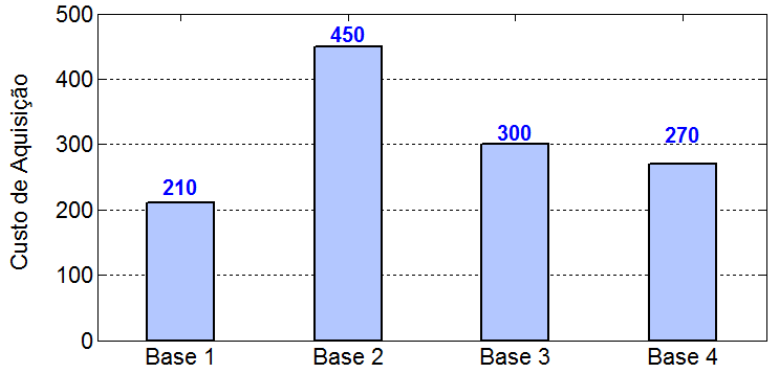

Figura 6: Avaliação da melhor localização do *Hub* para o item 1

6.2. Comparação entre os Modelos *Single Site* e *METRIC*

A Tabela 6 mostra o número de peças obtido na simulação do modelo *Single Site* para cada uma das bases, considerando novamente o cenário no qual apenas o item 1 é controlado. O custo total neste exemplo é 450. É possível notar que as bases com maior demanda são as que necessitam de maior número de peças para atingir a disponibilidade requerida.

Tabela 6: Número de peças em cada base no modelo *Single Site*

Parâmetro	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4
Número de Peças	5	3	4	3
Custo	150	90	120	90

Para a simulação do modelo *METRIC* foi usada a configuração na qual o *Hub* é posicionado na base 1, por ser a configuração de menor custo. A Tabela 7 mostra o número de peças calculado para cada base (incluindo a base 1, que atua como *Hub*) no cenário no qual apenas o item 1 é controlado. O custo total neste exemplo é 210. Enquanto no modelo *METRIC* a disponibilidade mínima foi atingida com apenas 7 peças, para o modelo *Single Site* seriam necessárias 15 peças. Esta diferença no número de peças acarreta no aumento dos custos.

Tabela 7: Número de peças em cada base no modelo *METRIC*

Parâmetro	*Hub*	Base 2	Base 3	Base 4
Número de Peças	4	0	2	1
Custo	120	0	60	30

A Figura 7 mostra os custos totais obtidos com os dois modelos para todas as combinações possíveis de itens. Em todas as simulações do modelo *METRIC* o *Hub* está localizado na base 1. A Tabela 8 apresenta a redução de custo de aquisição de peças proporcionada pelo modelo *METRIC* para todas as simulações.

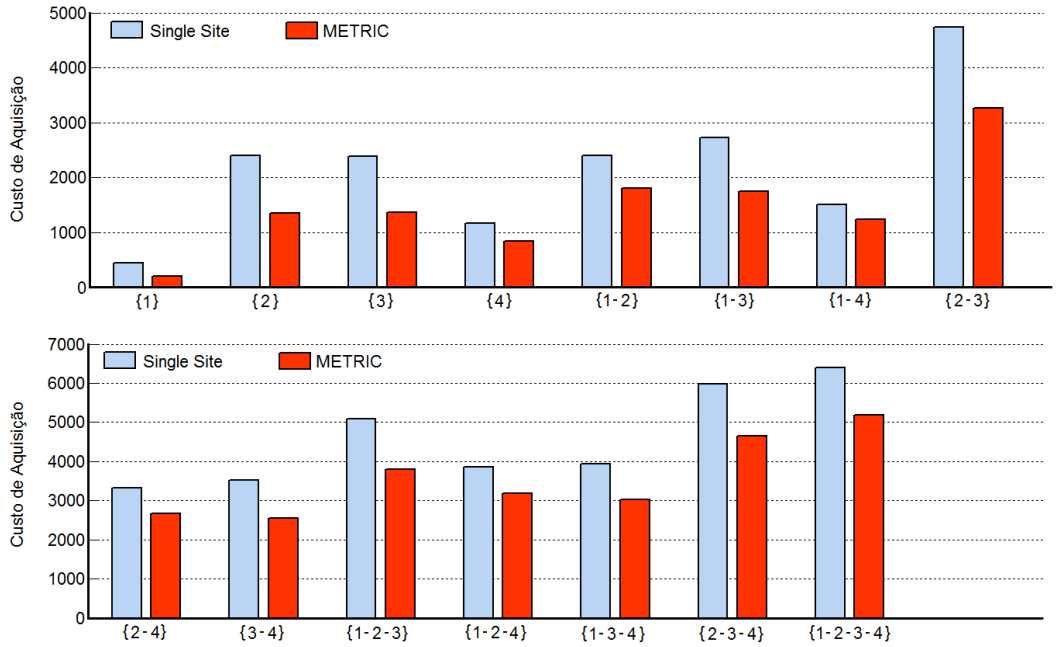

Figura 7: Comparação de custos entre os modelos *Single Site* e *METRIC*

Tabela 8: Redução de custo obtida com o modelo *METRIC*

Itens	Redução de custo	Itens	Redução de custo	Itens	Redução de custo
{1}	53,3%	{1-3}	35,8%	{1-2-3}	25,3%
{2}	43,8%	{1-4}	18,2%	{1-2-4}	17,7%
{3}	42,9%	{2-3}	31,0%	{1-3-4}	23,3%
{4}	27,8%	{2-4}	19,5%	{2-3-4}	22,2%
{1-2}	25,0%	{3-4}	27,4%	{1-2-3-4}	19,0%

7. Conclusões

Neste trabalho foi realizado um estudo sobre o uso de um modelo multi-elos para gestão de estoques de peças de reposição. Simulações foram realizadas com o objetivo de comparar os resultados obtidos com o modelo multi-elos, que é uma variação do modelo *METRIC*, com os resultados obtidos com um modelo *Single Site*.

Observou-se que ambos os modelos têm suas vantagens e desvantagens. Por isso, é de extrema importância a utilização de uma ferramenta computacional capaz fornecer as informações necessárias para uma tomada de decisão correta. A partir dos modelos desenvolvidos, é possível fazer uma primeira análise de qual seria a melhor abordagem e a respectiva configuração ideal para o posicionamento das peças de reposição para que se possa reduzir os custos sem deixar de atender o requisito de disponibilidade.

No exemplo que considera apenas o item 1, usando o modelo *METRIC* foi possível atender o requisito de disponibilidade com 7 peças, enquanto usando o modelo *Single Site* foram necessárias 15 peças. Nesse exemplo, o uso do modelo *METRIC* proporcionou uma redução de cerca de 53% nos custos relativos à aquisição de peças de reposição. Constatou-se que a escolha da localização do *Hub* tem grande influência no resultado final.

Observou-se ainda que, nas simulações com o modelo *METRIC*, apesar da disponibilidade global atender o requisito de disponibilidade, a disponibilidade observada em cada base pode variar. Em alguns casos, algumas bases poderão ter disponibilidades menores que a disponibilidade mínima exigida. Em geral, valores mais baixos de disponibilidade foram observados em bases com frotas pequenas e em bases distantes do *Hub*.

Referências

Clark, A. e Scarf, H. (1960). Optimal policies for a multi-echelon inventory problem. *Management Science*, 6:475–490.

Ehrardt, R. A., Schultz, C. R. e Wagner, H. . M. (1981). (S, s) Policies for a wholesale inventory system. *TIMS Studies in the Management Science*, 16:145–161.

Ganeshan, R. (1999). Managing supply chain inventories: a multiple retailer, one warehouse, multiple supplier model. *International Journal of Production Economics*, 59:341–354.

Kennedy, W. J., Patterson, J. W. e Fredendall, L. D. (2002). An overview of recent literature on spare parts inventories. *International Journal of Production Economics*, 76:201–215.

Kilpi, J., Töyli, J. e Vepsäläinen, A. (2009). Cooperative strategies for the availability service of repairable aircraft components. *International Journal of Production Economics*, 117:360–370.

Kilpi, J. e Vepsäläinen, A. P. J. (2004). Pooling of spare components between airlines. *Journal of Air Transport Management*, 10:137–146.

Kinnison, H. A. (2004). Aviation Maintenance Management. McGraw-Hill, Nova York.

Kutanoglu, E. (2008). Insights into inventory sharing in service parts logistics systems with time-based service levels. *Computers & Industrial Engineering*, 54:341–358.

Lombardo, D. A. (2000). European airlines: third-party maintenance providers. *Aviation Maintenance*, 19(7):22–25.

Sherbrooke, C. C. (2004). Optimal inventory modeling of systems*:* multi-echelon techniques. Klumer Academic Pub., Nova York.

Snyder, L. V. e Shen, Z. J. M. (2011). Fundamentals of Supply Chain Theory. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.

Wong, H., Cattrysse, D. e Van Oudheusden, D. (2005). Inventory pooling of repairable spare parts with non-zero lateral transshipment time and delayed lateral transshipments. *European Journal of Operational Research*, 165:207–218.