

Problema de Distribuição de Inventários Reparáveis de Aeronave – Uma Proposta de Solução Utilizando o METRIC e Algoritmo Genético

Abreu, R. C. B. A., Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Nascimento, F. S., Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

Resumo — A presente pesquisa trata da gerência de componentes reparáveis de uso em aeronave, em sistemas de múltiplo escalão de suprimento e manutenção. O texto aborda a questão de distribuição de componentes sobressalentes ao longo dos armazéns da cadeia logística do sistema, propondo o uso da meta-heurística algoritmo genético na busca da solução que minimize o número esperado de itens faltantes na frota. A implementação da técnica de múltiplo escalão para controle de itens reparáveis (METRIC – *multi-echelon technique for recoverable item control*) é feita utilizando recursos de informática de fácil acesso para gestores (planilhas Excel). Para demonstrar a viabilidade da proposta, os autores resolvem um problema numérico ilustrativo, semelhante à situação da vida real. Os resultados conseguidos permitem concluir acerca da viabilidade da proposta.

Palavras-Chave — Inventário reparável de aeronave, METRIC, Algoritmo genético.

I. INTRODUÇÃO

O gerenciamento de materiais em aviação representa importante atividade durante o ciclo de vida das aeronaves. De acordo com [1], a gestão de inventários é a atividade onde as companhias aéreas dispõem a maior parte de seus recursos, sendo esta área objeto de grande interesse da alta administração.

Em se tratando de aeronaves militares, o interesse pelo tema não é diferente. As forças aéreas, em geral, dispõem de recursos próprios para prover suporte logístico à atividade aérea, incluindo rede de armazéns e oficinas de reparo, distribuídos ao longo das áreas onde operam suas aeronaves. O funcionamento de toda esta estrutura requer altos investimentos e custo operacional da mesma ordem.

Dentre os tipos de materiais empregados em aviação, os componentes reparáveis (ou recuperáveis, como também são chamados) constituem importante parcela dos ativos em estoque. No diagrama de Pareto, os materiais recuperáveis são os típicos itens classe A: representam a pequena parcela do inventário, em geral, menos de 20% do total de *part numbers*, cujos custos impactam em mais de 80% dos investimentos em estoque. Além da importância econômica, a gerência do material reparável é, também, fator de relevância operacional. A carência deste tipo de item resulta, via de regra, em situações de indisponibilidade de todo o sistema.

A administração da cadeia dos componentes reparáveis de aeronave, conforme indica [2], é atividade de alta

complexidade, pois integra esforços das diversas áreas da logística, como a gestão de mão-de-obra especializada, investimento em infra-estrutura de manutenção, a coordenação do transporte (quando o reparo é feito distante do local de operação), além da gestão de estoque propriamente dita.

De acordo com [3], um dos primeiros estudos que tratou da questão de itens reparáveis resultou no desenvolvimento da técnica de múltiplo escalão para controle de item reparável (METRIC - *Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control*), trabalho feito pela RAND Corporation, a pedido da Força Aérea dos Estados Unidos (USAF – *United States Air Force*), e que se tornou a base de outros modelos de gestão. A descrição do referido modelo pode ser vista em [4] e [5].

A despeito dos resultados alcançados com o uso do METRIC pela USAF e por outras forças aéreas de reconhecida capacidade operacional, como pode ser verificado em [6] e [7], o modelo ainda é pouco difundido. Acredita-se que o não uso do modelo possa estar relacionado à inexistência de implementação em plataformas de uso habitual de gerentes.

O objetivo desta pesquisa é descrever uma alternativa de implementação do modelo METRIC, utilizando recursos de tecnologia da informação já disponíveis no COMAER, a saber, planilhas eletrônicas. Pretende-se demonstrar a implementação do modelo em formato de *templates*, que possam ser reutilizados a fim de tornar possível o uso em escala do modelo. Para solução do problema de otimização da alocação dos componentes ao longo da rede de armazéns, será utilizada a meta-heurística algoritmo genético (GA), ferramenta adicionada ao aplicativo Solver, do Excel.

Em linhas gerais, o artigo está organizado da seguinte forma: na segunda seção, é feita revisão crítica da literatura, visando destacar os principais pontos acerca da importância da gestão de inventários nas organizações, em geral, e aspectos da gestão de material de aviação, para companhias aéreas e para a Força Aérea. Na Seção 3, é descrita a metodologia empregada na pesquisa, destacando a estratégia para construção do modelo. Na quarta seção, são feitas a análise e interpretação dos dados levantados. Finalmente, na Seção 5, são apresentadas conclusões sobre o estudo, recomendações para a FAB e sugestões de temas correlatos para estudos futuros.

II. REVISÃO DA LITERATURA

A importância estratégica da gestão de inventários

O termo inventários, segundo definição em [8], refere-se aos materiais em estoque usados para atender a demanda de clientes ou para apoiar a produção de bens e serviços. A gestão de inventários compreende, portanto, à administração do fluxo de materiais de toda ordem (matéria-prima, produtos semi-acabados e produtos finais) dentro de uma empresa, ou entre diferentes organizações.

Estoques desempenham importante papel em quase todos os ramos de negócio, da manufatura à prestação de serviços. A gestão eficiente destes ativos deve fazer parte da estratégia de todas as empresas. O projeto da rede de suprimento, como aponta em [9], é fator chave de sucesso para empresas que hoje competem no mercado mundial.

Ao tratar da filosofia *Just in Time* na administração estratégica da produção, [10] enfatiza os impactos econômicos da redução de custos que se pode obter utilizando estratégias inovadoras na gestão de inventários, como o sistema puxado de produção. O autor menciona caso em que se conseguiu redução de cerca de 80% nos custos com materiais em processo, correspondendo a 8 milhões de dólares. Em se tratando da gestão de material aeronáutico em sistema de suporte à operação, em que a demanda apresenta comportamento errático e os tempos de re-suprimento podem ser da ordem de meses, a redução de níveis de estoque deve ser analisada com cautela. A falta de componentes resulta na indisponibilidade, podendo inviabilizar a operação.

Dando ênfase à questão estratégica da gestão de inventários, [11] destaca as duas principais razões para que as empresas mantenham itens em estoque, a saber: a garantia do nível de serviço oferecido aos seus clientes, e a economia dos custos de produção e transporte.

Sobre a importância da gestão de materiais no ciclo de vida de sistemas, [12] aponta que as despesas incorridas durante a fase de operação dos sistemas podem chegar a 70% (setenta por cento) do custo total do ciclo de vida. A maior parte desse custo refere-se a gastos com inventários.

Para a Força Aérea Brasileira, que habitualmente enfrenta restrições nos recursos destinados a financiar a aquisição de peças para a frota de suas aeronaves, o tema requer minuciosa apreciação.

Inventários em organizações de manutenção de aeronave

De acordo com [1], o controle de inventário nas companhias aéreas é o setor responsável por assegurar que toda necessidade de componentes e suprimentos de classe geral estejam disponíveis em cada local onde as ações de manutenção são realizadas. Cabe a este setor garantir o cumprimento da operação programada e suportar a estratégia de atendimento aos clientes que voam em suas aeronaves. Cumprir esta tarefa tem sido um desafio constante para as companhias aéreas, principalmente, para aquelas que operam frotas em processo de envelhecimento.

Acerca dos problemas enfrentados quando da aplicação de métodos usuais de gestão de estoques, como o MRP (*material requirement planning*), nas unidades de manutenção de aeronaves, a pesquisa de [13] aponta ser muito mais difícil aplicar tais métodos no ambiente de manutenção onde as necessidades de material são, praticamente, imprevisíveis.

Ao abordar a aplicabilidade da solução RFID para sistema Kanban na indústria aeronáutica, [14] aponta a necessidade de as empresas desse ramo utilizarem conceitos modernos de

manufatura enxuta, como ferramenta para aumentarem suas margens.

Tudo isso faz da gestão de material aeronáutico uma área específica no campo da administração da produção, para a qual deve-se ter abordagens que captem as complexidades e necessidades do sistema.

Há, portanto, a necessidade de desenvolver sistemas informatizados inteligentes e capazes de processar os dados, transformando-os em informações relevantes, a partir das quais as decisões poderão ser tomadas. Ao discutir o desenvolvimento de sistemas de apoio à tomada de decisão na gestão de inventários complexos, [15] sugerem abordagens que auxiliam nessa tarefa. Dentre elas, destacam-se as que seguem: (a) o nível de complexidade pode ser reduzido identificando-se, por meio de análise ou a partir de dados empíricos, somente os fatores e variáveis mais relevantes ao processo que se deseja levar em consideração; (b) os gestores devem fazer uso de ferramentas, que podem ser simples planilhas ou sistemas informatizados mais sofisticados; e (c) por último, usar o princípio da administração por exceção, focando questões que têm maior impacto na organização.

O Algoritmo Genético

Algoritmos genéticos são técnicas de busca e otimização inspiradas no princípio darwiniano de seleção natural e sobrevivência dos mais aptos [16]. Tais princípios simples da evolução das espécies são aplicados na construção de algoritmos computacionais os quais buscam uma melhor solução para um determinado problema, através da evolução de populações de soluções chamadas de “cromossomas artificiais”.

O que aqui é chamado de cromossoma trata-se de um conjunto de dados que representa uma das possíveis soluções no espaço de busca. Estas estruturas são submetidas a um processo de evolução o qual envolve as etapas de avaliação, seleção, cruzamento e mutação. O resultado esperado é uma população contendo os indivíduos mais aptos, isto é, mais próximos da solução esperada.

Algoritmos genéticos têm sido aplicados em diversos problemas de otimização, tais como: otimização de rota de veículos, layout de circuitos, alocação de espaço físico, análise de alternativas de investimentos, entre outros.

No problema de inventários, as variáveis referem-se ao conjunto de componentes associados aos armazéns. Cada variável é representada pela letra S, subscrita pelo binômio “ij”, onde i assume a função de identificar o tipo de componente (*part number*) e j, localização do armazém onde o componente será alocado. O conjunto de todas as variáveis compõe um cromossoma. O tamanho do cromossoma é representado pela matriz de ordem $i \times j$.

O tamanho da população inicial refere-se ao número de cromossomas que participarão do experimento. De acordo com [17], o experimento consiste da avaliação inicial da função objetivo, selecionando valores para as variáveis que compõem cada cromossoma da população. Em seguida, são realizadas trocas probabilísticas de valores entre os cromossomas (cruzamento) e reposicionamentos de valores dentro de cada cromossoma (mutação), considerando a taxa de mutação e os limites mínimos e máximos de cada variável, previamente definidos no modelo. Ao final, a função objetivo é novamente avaliada, repetindo-se o ciclo até que o algoritmo seja encerrado.

A Fig. 1, adaptada de [18] retrata a representação esquemática do algoritmo genético.

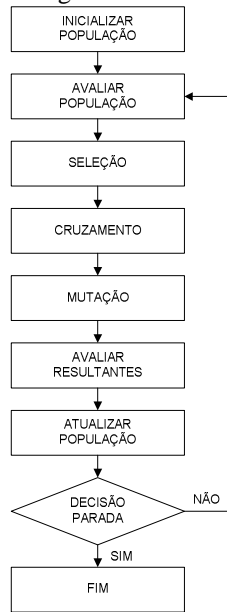


Fig. 1. Processo de busca e otimização do AG.

O modelo METRIC de gestão

Sistemas de itens reparáveis são caracterizados pela grande incerteza que se tem em torno da necessidade de componentes sobressalentes. Como afirmado em [19], os motivos da incerteza decorrem, primeiramente, da dificuldade de se prever a demanda do curto prazo. Em segundo lugar, quando o item recuperável entra em processo de reparo, há, também, grande incerteza acerca do procedimento de manutenção a ser realizado, e das partes que nele serão aplicadas. A informação detalhada acerca das reais necessidades só estará disponível quando o item tiver sido inspecionado. Em consequência, o controle de estoques de itens reparáveis requer abordagem específica, sendo tópicos de constante pesquisa na área de aviação.

Um dos primeiros estudos que abordou a questão relativa aos materiais recuperáveis em sistemas de múltiplo escalão, [4], resultou no desenvolvimento do METRIC, pela RAND Corporation, empresa de consultoria dos Estados Unidos.

Para entendimento do modelo METRIC, é necessário, antes, compreender a estrutura do sistema de reparáveis em múltiplo escalão. Um resumo dessa estrutura, produzido a partir da leitura de [20] e [3] é apresentado a seguir, destacando as regras de relacionamento entre os diversos elos do sistema. São elas:

1. Quando o item reparável é retirado da aeronave, seja por motivo de falha ou para manutenção preventiva, o setor de manutenção emite pedido ao armazém local, requisitando outro componente em condições de uso.

2. Se a quantidade em estoque do referido item no armazém local for maior ou igual a 1, a requisição será atendida. Caso contrário, será computada uma falta para o item naquele armazém. Esta falta é chamada de *backorder* e permanecerá pendente de atendimento até que o armazém local receba 1 unidade do item em condições de uso (*serviceable*).

3. Simultaneamente, o item retirado da aeronave passará por inspeção, podendo, em alguns casos, ser reparado com os recursos de manutenção disponíveis no próprio local. Neste

caso, ao término do reparo, o componente segue para o armazém local, a fim de atender às demandas pendentes do item, ou, quando não houver pendências, o item vai para estoque.

4. Quando o reparo não puder ser feito no mesmo local de operação, o item danificado será encaminhado para o armazém local para que este processe o envio do mesmo ao escalão seguinte de reparo. Imediatamente, uma requisição por outro item em condição de uso é emitida para o armazém localizado no escalão seguinte de manutenção, chamado armazém central porque, normalmente, atende às demandas de todos os locais de operação.

5. No armazém central, se a quantidade em estoque do referido item for maior ou igual a 1 a requisição será atendida e um item revisado é remetido para o armazém requisitante. Caso contrário, será computada uma *backorder* para o item, no armazém central, ficando a requisição pendente até que se tenha um componente disponível para envio. O tempo de remessa do armazém central para o armazém local é chamado *turn around time* (TAT).

6. O item danificado, recolhido pelo armazém local, ao chegar ao armazém central, é enviado para a oficina responsável pelo reparo. Essas oficinas, via de regra, estão localizadas no mesmo sítio do armazém central. Ao término do reparo, a oficina retorna o componente ao armazém central e este lhe dará destino, podendo enviá-lo a um dos armazéns locais, quando houver requisição pendente, ou, simplesmente, estocar o item no próprio armazém central.

A Fig. 2 retrata as regras de relacionamento acima descritas, enfatizando os dois escalões de suprimento e manutenção em sistemas semelhantes ao que a FAB opera.

Segundo [3], o modelo METRIC assume que toda demanda inicia-se nos locais onde as aeronaves operam e segue a regra de distribuição de probabilidade de Poisson. Os tempos de reparo nas oficinas locais e nas de segundo escalão, e o tempo despendido com o transporte de material entre os armazéns locais e o armazém central (TAT) são considerados estocásticos, e seguem distribuição de probabilidade qualquer. Para cálculo destes tempos, é utilizado o estimador de tendência central, o tempo médio calculado a partir de amostra, ou de outra técnica de estimação.

O METRIC estabelece que somente pode haver fluxo de material entre os armazéns locais e o armazém central. Não é prevista remessa entre os armazéns locais da mesma cadeia (re-suprimento lateral). O modelo não contempla a prática de se retirar um componente em condição de uso de uma aeronave em manutenção para suprir a necessidade de outra aeronave que necessite somente daquele componente, conhecido como prática de canibalização.

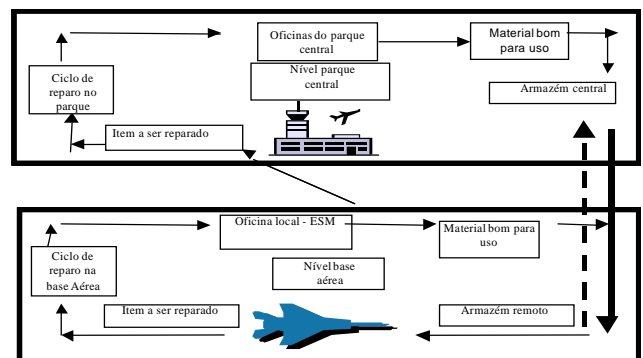


Fig. 2. Esquema representativo do ciclo de utilização do item reparável.

Conforme [3], o indicador chave para sistemas de componentes reparáveis deve o número esperado de itens faltantes, em inglês, *expected backorder* (EBO). Este indicador é calculado a partir de parâmetros de demanda de cada item, em cada local de operação da aeronave, dos tempos de reparo nas oficinas locais e na oficina central, da probabilidade do item ser reparado no próprio local de operação, e do tempo de remessa entre o armazém central e o armazém local (TAT). O autor advoga que o modelo visa a aumentar a disponibilidade das aeronaves em todo o sistema. De acordo com o autor, isto é conseguido por meio da redução do número esperado de itens faltantes (EBO) no sistema. Na prática, esta redução do EBO é conseguida com o pré-posicionamento dos itens sobressalentes ao longo dos armazéns de toda a cadeia logística da aeronave.

Uma possível maneira de se representar matematicamente o modelo, adaptada de [3], em que a função objetivo é minimizada, pode ser assim resumida:

$$\text{Minimize } EBO_{ij}(S_{ij}) = \sum (x - S) * P(x / \text{Demanda} * \text{Tempo de retardo}), \text{ para } x = S+1 \text{ a infinito.} \quad (1)$$

Restrições:

$$\sum C_{ij} * S_{ij} \leq \text{Crédito disponível}$$

$S_{ij} \geq 0$ (zero), inteiro. Condição de não-negatividade e solução inteira

Onde:

i = cada item reparável do sistema. Para “ n ” itens, deve-se numerar de 1 a “ n ”.

j = cada armazém onde o item pode ser alocado. Para “ x ” armazéns locais e um armazém central, costuma-se identificar o armazém central com o número zero, e os demais armazéns de 1 a “ x ”.

EBO_{ij} = número esperado de itens faltantes para o componente “ i ”, no armazém “ j ”.

C_{ij} = custo de cada item i , no local j .

S_{ij} = quantidade sobressalente do item “ i ”, no armazém “ j ”.

x = variável aleatória que descreve o número de itens “ i ”, no ciclo de reparo do armazém “ j ”.

Demanda = independente para os armazéns locais e dependente para o armazém central.

Tempos de retardo = qualquer atraso logístico que possa ser estimado em termos de tempo. Exemplo: reparo na oficina local ou central, transporte, espera e etc.

P = distribuição de probabilidade da variável “ x ”. Esta distribuição é assumida como Poisson, pelo Teorema de Palm.

Em sua obra, o autor sugere uma forma de implementação do método de distribuição, em que a alocação é feita item a item, seguindo a técnica de análise de custo-benefício para o incremento de mais uma unidade sobressalente de qualquer um dos componentes no sistema. Na prática, o uso da análise de custo-benefício proposta em [3] é de utilização inviável, por consumir tempo elevado. Utilizando o método proposto em [3], a distribuição de cerca de uma dezena de itens sobressalentes poderia consumir horas, mesmo utilizando recursos de cálculo informatizados. Esta opinião é compartilhada entre vários autores que estudam o modelo, dentre eles pode-se citar [21], [20], [50], e [22].

Outros autores, como [23] e [24], descrevem estratégias de implementação do modelo de distribuição de reparáveis. No entanto, em todos os casos pesquisados, a implementação refere-se ao uso de linguagens de programação cujo conhecimento não é do domínio do gerente comum, assim entendido aquele profissional da administração que não tenha profundo conhecimento em técnicas de programação.

A contribuição desse trabalho reside, exatamente, na premissa de que é possível implementar o modelo METRIC usando recursos computacionais de domínio do gerente comum, como as planilhas eletrônicas Excel, do pacote MS Office.

Como isto pode ser feito é o que será demonstrado na seção seguinte, que trata da metodologia da implementação do modelo.

III. IMPLEMENTANDO O METRIC EM PLANILHA

A metodologia para a realização do estudo de implementação do modelo METRIC em planilha eletrônica compreende duas etapas, a saber: (1) a condução de entrevistas com gestores de materiais da FAB, a fim de verificar a aderência das regras de relacionamento entre os elos do Sistema de Material Aeronáutico (SISMA) com as regras do METRIC; (2) a elaboração de um problema numérico ilustrativo de situações semelhantes às que podem ser encontradas na vida real, para que seja modelado matematicamente em planilha eletrônica.

A seguir, são apresentadas as principais observações e considerações acerca das etapas acima citadas.

Entrevistas com gestores de material da FAB

As entrevistas com gestores da área de logística da FAB tiveram como tema principal as regras de funcionamento do sistema de reparáveis no âmbito do Sistema de Material Aeronáutico (SISMA). O ponto de partida da conversa foi a submissão do fragmento de texto contido na Seção 2 deste artigo, em que os autores apresentam o sumário descritivo da estrutura do sistema de reparáveis tal como é estabelecida no modelo METRIC. A proposta de discutir estas questões visou à realização de verificação prévia, para saber se o modelo a ser implementado tem aderência com os processos de gestão de componentes reparáveis praticados no âmbito da FAB.

Destes colóquios, foram extraídas as seguintes considerações: (a) falta, segundo o ponto de vista dos entrevistados, maior detalhamento dos processos, principalmente no que se refere aos modais de transporte utilizados na movimentação dos componentes entre os armazéns remotos e parque central; (b) no que tange à demanda por componentes reparáveis, há grande diversidade no modo como ela ocorre, podendo resultar de falha no componente ou de realização de manutenção programada; e (c) no sistema da vida real, há situações em que ocorrem práticas de canibalização e transferências de material entre armazéns locais.

A análise das considerações acima será feita na Seção 4 do texto. Por ora, é importante dizer que as observações não invalidam o METRIC como modelo representativo dos processos do SISMA.

Criando os templates em Excel

A escolha do Excel, do pacote MS Office, se deu por duas razões: (i) por ser a ferramenta de uso extensivo por gestores

de diversos níveis no âmbito da FAB; (ii) por possuir set de ferramentas que podem ser agregadas ao pacote inicial, como o aplicativo Solver, utilizado para solução de sistemas de equações, e que foi utilizado para resolver o problema numérico proposto.

À versão básica do Solver, que acompanha o pacote MS Office, foi adicionado outro aplicativo, que utiliza a meta-heurística algoritmo genético (GA) para melhorar o processo de busca de resultados. O aplicativo GA é indicado para casos em que a busca da solução é dificultada pela estrutura do problema, ou seja, problemas de programação com números inteiros, com funções do tipo não-linear, de comportamento assintótico e etc. A solução de problemas com estas características é bastante difícil quando são utilizados outros algoritmos, como o *branch-and-bound*. O arquivo eletrônico com o aplicativo GA foi obtido gratuitamente e acompanha o livro texto [17].

A construção do *template* em Excel seguiu os seguintes passos:

1. Foram construídas tabelas contendo os dados de input necessários à implementação do modelo METRIC. São eles: demanda, preços unitários, tempos de reparo, tempo de transporte e probabilidade de reparo no site de operação.

2. Foram construídas tabelas para representar o número esperado de itens faltantes para cada componente e local de armazenagem, primeiro no nível central, e depois no nível local. Nesta etapa da construção foi utilizada a função POISSON, pré-definida no Excel.

3. Visando dar maior flexibilidade de uso ao *template*, foram construídas tabelas consolidadoras das informações descritas no item 2, acima. A consolidação seguiu dois critérios: por local e por item.

4. Foi criada uma célula para representar o número esperado de itens faltantes em todo o sistema. Além disso, foram designadas células para serem as variáveis de decisão, ou seja, para representarem a opção de alocação dos itens sobressalentes ao longo dos armazéns da cadeia logística, e uma célula para representar o custo total, calculado a partir do produto entre os preços unitários pela quantidade alocada.

5. Finalmente, o problema é inserido no Solver e resolvido usando a meta-heurística algoritmo genético.

A versão do Solver utilizado neste problema dispõe de uma ferramenta (macro) desenvolvida na linguagem de programação VBA. A referida versão do Solver foi obtida junto ao texto [17], em disco compacto que acompanha o livro texto, sem custos adicionais. A opção de uso do algoritmo genético na solução do problema é feita na janela de abertura do próprio Solver (já acrescido da macro), selecionando a opção "Standard Evolutionary", conforme pode ser visto na Fig. 3.

Os ajustes de parâmetros de cruzamento. Outros ajustes, como o tempo máximo de execução das rotinas de otimização, número de iterações, tamanho da população de cromossomas, taxa de mutação e etc são ajustados na tela semelhante à apresentada na Fig. 4, que é acessada a partir "Options" que aparece na Fig. 3.

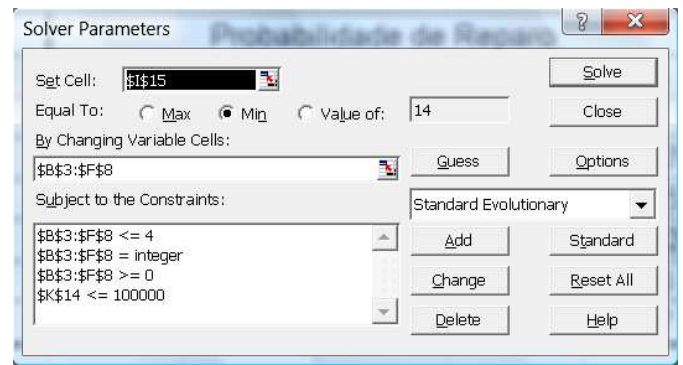


Fig. 3. Tela inicial do Solver versão Premium.

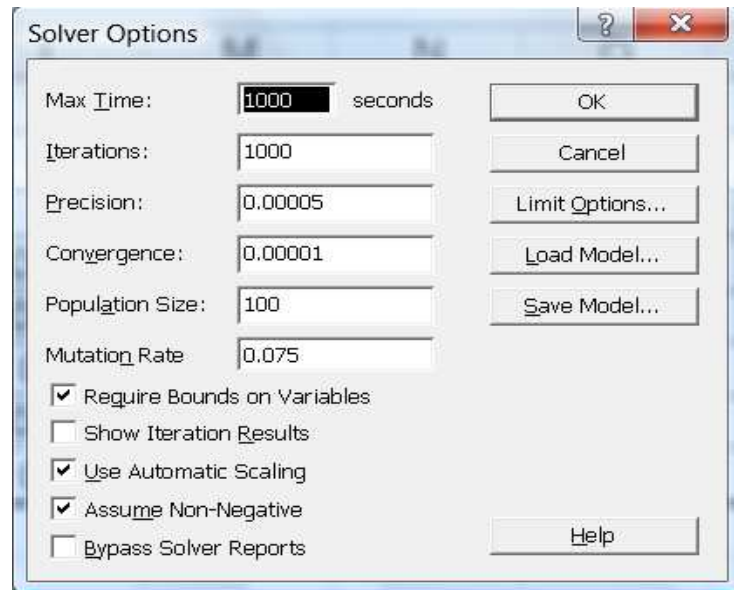


Fig. 4. Tela de ajuste de parâmetros.

O problema numérico ilustrativo

Para avaliar a proposta de construção do METRIC em planilha eletrônica, foi construído um problema numérico ilustrativo, cujos dados de inputs se assemelham a situações que ocorrem no sistema da vida real.

O problema consiste em alocar cinco diferentes componentes (s1, s2, s3, s4 e s5), ao longo da cadeia logística composta de dois escalões de suprimento e manutenção. Nesta cadeia, há cinco sítios onde operam as aeronaves. Nestes sítios, existe capacidade parcial de reparo, expressa em termos de probabilidade de reparo. Em cada sítio, há tempo diferente de reparo para os itens em estudo. Os tempos de remessa entre o armazém central e os armazéns locais são fornecidos. Há, também, o nível central, onde existem oficinas com capacidade plena de reparo para todos os componentes. Neste sítio, há o armazém central, que provê apoio às oficinas e envia e recebe itens dos outros cinco armazéns.

As Tabelas I, II e III, apresentam os dados relativos à demanda, as probabilidades de reparo e os tempos de reparo dos cinco componentes ao longo dos sítios de operação e, quando pertinente, nas instalações do parque central.

TABELA I DEMANDA

Demanda Anual				
s1	s2	s3	s4	s5
38.1	38.4	39.25	37.82	35.56
12	16	14	9	25
8	9	7	11	21
14	8	10	13	12
9	9	6	18	18
6	12	11	9	17

TABELA II PROBABILIDADE DE REPARO

Probabilidade de Reparo				
s1	s2	s3	s4	s5
0.22	0.15	0.12	0.53	0.87
0.15	0.21	0.1	0.45	0.75
0.2	0.18	0.11	0.1	0.22
0.14	0.23	0.09	0.17	0.3
0.5	0.65	0.43	0.9	0.7

TABELA III TEMPO DE REPARO

Tempo de Reparo				
s1	s2	s3	s4	s5
0.0557	0.04387	0.0632	0.04983	0.05283
0.2531	0.2744	0.6	0.1644	0.0895
0.2385	0.22375	0.54383	0.21387	0.07384
0.1276	0.2102	0.3608	0.2212	0.0908
0.2003	0.2004	0.2106	0.3029	0.0899
0.043	0.152	0.182	0.2822	0.0887

Importante notar que a demanda dos itens em cada sítio é do tipo independente. Já no armazém central, a demanda é do tipo dependente pois resulta da soma do produto da demanda do item pela probabilidade de reparo em cada sítio de operação.

São informados os tempos de transporte entre o armazém central e os sítios de operação, que são 0,06027 ano (sítio 1), 0,09041 ano (sítio 2), 0,001 ano (sítio 3), 0,0302 ano (sítio 4), e 0,0896 ano (sítio 5).

São informados, também, os preços unitários de cada um dos itens, que são \$3000 (s1), \$5400 (s2), \$3200 (s3), \$6000 (s4) e \$1200 (s5). É designada uma célula para representar o custo total, que corresponde à soma dos produtos dos preços unitários pela quantidade a ser sugerida nas células de decisão.

Adicionalmente, é informado o valor disponível para a compra (limite orçamentário) de componentes sobressalentes, no valor de \$ 100.000,00, designando-se uma célula na planilha para tal situação.

Finalmente, inserem-se os dados do problema no Solver. A partir da combinação de restrições e escolha da rotina de otimização, o aplicativo se encarrega de fazer a alocação dos componentes sobressalentes, visando atender às regras impostas. Para o problema ilustrativo, optou-se por minimizar a função número esperado de itens faltantes em todo o sistema, EBO (Sij), alocando os itens sobressalentes ao longo dos seis armazéns (cinco locais e um central) da cadeia logística. As questões eram: quais itens deveriam ser adquiridos, em que quantidade, e em que armazém deveriam

ser alocados? Os resultados serão comentados na seção seguinte.

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA PESQUISA

Acerca dos comentários dos gestores sobre a aderência das regras de relacionamento do modelo METRIC ao sistema operado pela FAB, cabe argumentar que todo modelo é uma simplificação da realidade, devendo captar os aspectos que são necessários e relevantes para a representação do sistema da vida real.

Excesso de detalhes agrega pouco valor ao modelo e, ao mesmo tempo, demanda maior esforço no design do modelo, na programação e na busca da solução.

Em relação às críticas do modelo não representar situações como as práticas de canibalização e de re-suprimento lateral, é oportuno dizer que ambas as práticas, de fato, ocorrem e, quando feitas controladamente, podem resultar em melhora da disponibilidade das aeronaves.

No entanto, não se pode negar que os dois casos mencionados, também, evidenciam ineficiências que devem ser evitadas. A canibalização consome mão-de-obra além do que seria necessária para o funcionamento normal do sistema, pois requer, no mínimo, que o componente a ser canibalizado seja desinstalado de uma aeronave e instalado em outra. Além disso, dependendo do item que é transferido de uma aeronave para a outra, há sempre o gasto de outros materiais usados na instalação. Há, também, risco de perda do componente em bom estado pelo simples ato de desinstalação e reinstalação do mesmo.

Quanto ao re-suprimento lateral, é fato que as transferências entre armazéns acabam por aumentar os custos com transporte. Na prática, tal situação deve ser motivo de minuciosa avaliação, caso a caso, para saber se o benefício a ser gerado compensa os custos incorridos com a movimentação do componente.

Em suma, sugere-se que tanto a canibalização quanto o re-suprimento lateral devem ser decisões a serem tomadas fora do modelo.

Os resultados do problema numérico ilustrativo

Após resolver o problema numérico ilustrativo no Solver, a alocação de componentes proposta ao longo dos armazéns do sistema foi feita conforme consta da Tabela 4.

Com a distribuição sugerida pelo Solver, foi possível reduzir o indicador número esperado de itens faltantes no sistema – EBO (Sij) – de 39.35, situação em que não havia nenhum sobressalente, para 16.22, após a proposta de alocação. Nesta situação, foram comprometidos \$ 99.800,00, dos \$ 100.000,00 inicialmente disponíveis. O saldo de \$ 200,00 não foi possível alocar por ser valor inferior ao preço do item de menor valor.

Em todas as vezes em que o aplicativo foi utilizado, a solução foi encontrada em tempo inferior a dois minutos, tempo este considerado bastante razoável, se comparado com o tempo gasto no método de custo benefício, anteriormente mencionado. Utilizando o método do custo benefício, em que a solução é feita item a item, e usando a ferramenta de cálculo Mathcad, o tempo para se achar a solução ótima acima de 1 hora

A análise da Tabela IV permite verificar que o modelo privilegia a compra de itens de preço menor, em detrimento daqueles de maior valor. Por exemplo: foi sugerida a compra

de 12 unidades do item s5, cujo preço é \$ 1.200; já para o item s4, cujo preço é \$ 6.000, a sugestão é de apenas 3 unidades. Tal situação pode não ser a ideal em termos de melhorar a disponibilidade da frota, pois acarretaria faltas recorrentes daqueles itens de maior valor. Usando os recursos do Solver, é possível impor restrições que minimizem estas discrepâncias. A verificação destes cenários ficou fora do escopo deste estudo e será remetida como proposta para possíveis estudos futuros acerca do tema.

TABELA IV DISTRIBUIÇÃO DOS COMPONENTES

Distribuição sugerida pelo METRIC					
Local	s1	s2	s3	s4	s5
Central	1	1	1	0	2
Sítio 1	1	1	2	0	3
Sítio 2	1	1	1	1	2
Sítio 3	1	0	1	0	1
Sítio 4	1	1	0	1	2
Sítio 5	1	1	2	1	2

No que se refere às dificuldades de se implementar o modelo em planilhas, foram identificadas as que seguem:

1. A construção do modelo requer a criação de um número grande de tabelas auxiliares, até que se chegue nas tabelas finais, que computa o valor dos indicadores. Ao criar um *template*, há necessidade de manter o trabalho organizado, para que não se perca entre as várias tabelas.

2. Para resolver o problema usando o Solver, há limites em relação ao número de células (variáveis de decisão) que podem ser incluídas no aplicativo. No formato freeware, este limite é cinquenta células. Nas versões profissionais do Solver, as quais não são gratuitas, o limite pode chegar a 2.000 variáveis, conforme informação contida no site do fabricante em <http://www.solver.com/pspro.htm>. Portanto, dependendo do tamanho do problema que se quer resolver, deve-se considerar a necessidade da compra de licença do aplicativo. Importante notar que o custo da licença do *software* Solver é muito inferior quando comparado a outros programas, como o OPUS 10 e V-METRIC, cuja função é otimizar a gestão de suprimento.

3. Ao usar a meta-heurística de busca algoritmo genético, os valores encontrados como melhor solução do problema podem variar de uma rodada de solução para outra. Isto é comum, pois o resultado encontrado depende da trilha de busca, que é designada de forma aleatória no início de cada rodada. Portanto, deve-se considerar a realização de mais de uma tentativa de solução, e verificar os melhoramentos que se consegue em cada uma delas. Nestes casos, há que se ponderar a relação custo/benefício de se fazer novas tentativas, considerando o aumento do tempo para se obter a solução.

V. CONCLUSÕES, RECOMENDAÇÕES E ESTUDOS FUTUROS

Este trabalho teve como objetivo principal analisar a possibilidade de implementação do modelo METRIC de gestão de componentes reparáveis de aeronave, usando recursos de informática disponíveis para os gestores de material no âmbito do Comando da Aeronáutica, a saber, as planilhas eletrônicas.

A pesquisa permitiu adentrar na área de gestão de componentes reparáveis de aeronave, onde existe pouca produção científica em língua portuguesa.

Para atingir o objetivo acima enunciado, construiu-se um *template* em Excel, baseado em situação fictícia, representando problema numérico ilustrativo de situação semelhante à encontrada na vida real.

Para construção do modelo em planilha eletrônica, foi necessário aprofundar a discussão acerca da gestão de itens reparáveis, o que foi conseguido pela revisão da literatura e pela condução de entrevistas com especialistas na gestão da logística da FAB.

Os experimentos com o *template* permitiram concluir acerca da viabilidade da proposta, possibilitando a resposta ao problema de pesquisa que consta na introdução deste trabalho. Dessa forma, pode-se dizer que o uso de planilhas eletrônicas, conjugado com aplicativos de otimização como o Solver e a meta-heurística algoritmo genético, é uma possível forma de implementar o modelo METRIC, sendo uma maneira confiável e de baixo investimento em licenças de software proprietário.

O arquivo do *template*, uma das contribuições conseguidas com a realização desta pesquisa, será entregue aos colaboradores especialistas que participaram das entrevistas conduzidas ao longo do trabalho. Em havendo interesse, a Força Aérea poderá utilizar o referido arquivo, podendo, a seu critério, aplicá-lo em casos reais.

Para aqueles que têm interesse no tema, adiante são oferecidos tópicos que, na opinião dos autores, carecem de estudos futuros. São eles:

1. Aplicar a solução proposta em problemas da vida real, de maior escala, envolvendo número maior de variáveis.
2. Adaptar o algoritmo do modelo METRIC à situação das companhias aéreas comerciais.
3. Utilizar o algoritmo genético em outros problemas que envolvam decisões acerca de inventários, como no caso de estoques de materiais consumíveis de aviação.
4. Desenvolver modelos em que sejam simuladas situações de canibalização e re-suprimento lateral.

REFERÊNCIAS

- [1] H.A. Kinnison, *Aviation Maintenance Management*. New York, NY: McGraw-Hill, 2004.
- [2] M. Elisa Cunha, J. Alvaro Assis. Lopes, A. Paula Barbosa Pova, "Modelo de simulação para determinação da operacionalidade de locomotivas", *Inv. Op.*, vol.23, no.2, p.113-130, 2003.
- [3] C. C. Sherbrooke. *Optimal Inventory Modeling of Systems*. New York, NY: John Wiley & Sons, 1992.
- [4] C. C. Sherbrooke. METRIC: A Multi-Echelon Technique For Recoverable Item Control. Memorandum RM-5078-PR,1966. Disponível <http://www.rand.org/pubs/research_memoranda/2006/RM5078.pdf>. Acesso em 20 agosto 2012.
- [5] C. C. Sherbrooke. "METRIC: A Multi-echelon technique for recoverable item control", *Operations Research*, 16, pp. 122-141, 1968.
- [6] V. Daniel R. Guide, R. Srivastava., "Repairable inventory theory: models and applications", *European Journal of Operational Research*, 102, pp.1-20, 1997.
- [7] W. J. Kennedy *et al.* "An overview of recent literature on spare parts inventories", *International Journal of Production Economics*. v76. 201-215, 2002.
- [8] L.P. Ritzman, L.J. Krajewsky. *Administração da Produção e Operações*. São Paulo, SP: Prentice Hall, 2004.
- [9] D. N. Burton, D. W. Dobler, S. L. Starling. *World Class Supply Management - The Key to Supply Chain Management*. New York, NY: McGraw-Hill/Irwin, division of McGraw-Hill Companies, Inc., 2003.

- [10] J. Murta Alves, “O Sistema Just In Time Reduz os Custos do Processo Produtivo”, In: IV Congresso Internacional de Custos, realizado na Universidade Estadual de Campinas, no período de 16 a 20 de outubro de 1995.
- [11] R. H. Ballou. Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos / Logística Empresarial. Porto Alegre, RS: ARTMED Editora SA, 2010.
- [12] B. S. Blanchard. Logistics Engineering and Management. Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2004.
- [13] A. A. Ghobbar, C. H. Friend. “The material requirements planning system for aircraft maintenance and inventory control: a note”, Journal of Air Transport Management Volume 10, Issue 3, Pages 217-221, 2004.
- [14] J. Henrique da Silva Schreiber, S. Bloch da Silva, A. Ribeiro Correia. “Análise da aplicabilidade da solução RFID no contexto do sistema de abastecimento Kanban”, In: 3rd CTA-DLR Workshop on Data Analysis & Flight Control, September 14-16, S. J. Campos, SP, Brazil, 2009.
- [15] E. A. Silver, D. F. Pyke, R. Peterson. Inventory management and production planning and scheduling. New York, NY: John Wiley & Sons, 1998.
- [16] D. E. Goldberg. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison-Wesley, 1989.
- [17] C. T. Ragsdale. Spreadsheet Modeling and Decision Analysis – A practical Introduction to Management Science. Cincinnati, OH: South-Western, 2001.
- [18] M. Nunes de Miranda. Algoritmos Genéticos: Fundamentos e Aplicações. GTA-UFRJ. Disponível em <<http://www.nce.ufrj.br/GINAPE/VIDA/algenet.htm>>. Acessado em 20 agosto 2012.
- [19] H. F. M. De Haas, J. H. C. M. Verrijdt. “Target setting for the departments in an aircraft repairable item”, European Journal of Operational Research 99, p. 596-602, 1997.
- [20] A. Diaz, M. C. Fu. Multi-echelon models for repairable items: a review. Decision & Information Technologies Research Works Collection, Digital Repository at the University of Maryland, 2005.
- [21] H. C. Lau *et al.* “Evaluation of time-varying availability in multi-echelon spare parts systems with passivation”, European Journal of Operational Research. 170:1, 91-105, 2006.
- [22] J. A. Muckstadt. “Some approximations in multi-item, multi-echelon inventory systems for recoverable items”, Naval Research Logistics Quarterly, Vol.25, pp.377-394, 1978.
- [23] A. Kaplan. “Mathematics for SESAME Model”, Technical report no. TR80-2 US. Army Inventory Research Office, Philadelphia PA, 1980.
- [24] J. Buzen. “Computational Algorithms for Closed Queueing Networks with Exponential Servers”, Communications of the ACM, v16 p527, 1973.