

OTIMIZAÇÃO MULTIESCALÃO DE ESTOQUES DE ITENS REPARÁVEIS PARA A FROTA DE AERONAVES C-105 DA FORÇA AÉREA BRASILEIRA

MULTI-ECHELON INVENTORY OPTIMIZATION FOR REPAIRABLE ITEMS FROM BRAZILIAN AIR FORCE C-105 AIRCRAFT FLEET

Rafael Leonardo de Sena e Vasconcelos¹

Rachel Andrade Ballardin²

Daniel Cherobini³

RESUMO

Este trabalho analisa o modelo atual de gerenciamento de estoques de itens de reposição, mais especificamente de itens classificados como reparáveis e cujo processo de manutenção é realizado em intervalos específicos (*hard-time*), além de propor o cálculo de níveis de estoque a partir de modelo analítico multiescalão. Tal abordagem se justifica pelo fato de que a escolha de metodologias com abordagem sistêmica, para o cálculo dos níveis de estoque de itens reparáveis, gera uma análise global da alocação do suprimento de manutenção que possibilita a otimização da disponibilidade operacional da frota de aeronaves, em detrimento aos ótimos locais resultantes da abordagem item-a-item. A finalidade deste trabalho é propor a aplicação de metodologia multiescalão como alternativa ao modelo atual aplicado pela Força Aérea Brasileira para o cálculo de níveis de estoque e alocação de itens de reposição, com vistas à melhoria da relação entre disponibilidade operacional e custo. Este intento será conseguido mediante pesquisa bibliográfica sobre o assunto, levantamento de dados do gerenciamento de reparáveis da Força Aérea Brasileira, além da utilização do *software* OPUS 10 na etapa de modelagem para verificação dos resultados. A análise comprovou que o modelo multi-escalon é mais vantajoso em relação à abordagem por item, com duplicação do valor da disponibilidade operacional para o mesmo custo de aquisição da lista de compras de itens de reposição. Também foi possível verificar que, com o dobro do investimento para provisionamento inicial, seria possível elevar em quinze vezes a métrica de disponibilidade, ao comparar com a metodologia atualmente descrita nos manuais da Força Aérea Brasileira. Dessa forma, o estudo sugere que a metodologia proposta se torne o padrão a ser adotado em lugar do modelo por item.

Palavras-chave: Otimização. OPUS 10. Manutenção Preventiva.

¹ Especialista em Logística pelo Instituto de Logística de Aeronáutica e Bacharel em Engenharia Aeronáutica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica. E-mail: leonardorlsv@fab.mil.br.

² Doutora em Educação pela Universidade Metodista de Piracicaba, Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina e Bacharel em Secretariado Executivo Bilíngue pelo Centro Universitário Newton Paiva. E-mail: ballardin@uol.com.br.

³ Mestre em Logística e Gestão da Cadeia de Suprimentos pelo *Air Force Institute of Technology* - USAF (2020) e Bacharel em Engenharia Mecânica-Aeronáutica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (2009). Atualmente, é consultor do Instituto de Logística da Aeronáutica (ILA), atuando principalmente nos seguintes temas: confiabilidade, manutenção e logística e aeronaves. E-mail: cherobinidc@fab.mil.br.

ABSTRACT

This paper analyzes the current model of spare parts inventory management, more specifically repairable items and that have their maintenance process carried out at specific intervals (Hard Time), in addition to proposing the calculation of stock levels from multi-echelon analytical model. Such an approach is justified by the fact that the choice of methodologies with a system approach, for the calculation of the stock levels of repairable items, generates a global analysis of the maintenance supply allocation that allows the optimization of the aircraft fleet operational availability, a superior strategy than that generated by the local optimum resulting from the item-by-item approach. The aim of this work is to propose the application of a multi-echelon methodology as an alternative to the current model applied by the Brazilian Air Force for the calculation of stock levels and allocation of spare parts, aiming to improve the operational availability and cost trade-off. This goal will be achieved through a literature review on the research area, data collection of the Brazilian Air Force's repair management, in addition to the use of OPUS10 software in the modeling stage to verify the results. The analysis proved that the multi-echelon model is more advantageous in relation to the per-item approach, doubling the value of operational availability for the same acquisition cost of the spare-item purchasing list. It was also possible to verify that, with twice the investment for initial provisioning, it would be possible to increase the availability metric by fifteen times, when compared with the methodology currently described in the Brazilian Air Force manuals. Thus, the study suggests that the proposed methodology becomes the standard to be adopted instead of the item-based model.

Keywords: Optimization. OPUS 10. Preventive maintenance.

1 INTRODUÇÃO

Sistemas complexos, dentre os quais se situam os objetos da indústria aeronáutica, necessitam de manutenção e suporte logístico eficazes. Caso contrário, o resultado pode ser a elevação dos custos operacionais e diminuição da disponibilidade operacional. Nesse contexto, os itens reparáveis, isto é, itens cujo custo de recuperação e reuso é economicamente mais viável em relação ao descarte, são de fundamental importância, pois uma Força Aérea depende de vários equipamentos altamente utilizados, com longo tempo de vida e de aquisição notavelmente custosa. Por exemplo, na Força Aérea dos EUA (USAF), os itens reparados em Parques de Manutenção (reparos de 3º nível, de maior complexidade) representam quase 70% sozinhos dos valores totais dos ativos do estoque para as aeronaves não suportadas por um Contrato de Suporte Logístico, como é o caso dos modelos Hércules C-130T e C-130J, conforme dados divulgados pelo GAO (*Government Accountability Office*), renomada organização norte-americana de controle governamental (US GAO, 2020). No universo ideal, seria possível dispor de todas as peças em quantidades suficientes para atender a todas as demandas de suas aeronaves. Porém, na realidade, os recursos financeiros são finitos e, portanto, se tornam o fator preponderante para a restrição dos estoques.

Nos últimos anos, dois importantes e conflitantes desenvolvimentos sobre o gerenciamento de suprimentos ganharam destaque. O setor fabril apresentou a tendência de enfatizar um melhor planejamento e métodos “*Just-In-Time*” para reduzir os investimentos em suprimento. Por outro lado, o setor responsável pelo suporte de equipamentos complexos, com necessidade de atender metas de disponibilidade, optou pelo uso de modelos de estoque cada vez mais sofisticados. Dessa

forma, enquanto para os fabricantes a previsão de demanda e o modelamento do suprimento tem se tornado menos significativa, no suporte de um sistema complexo em operação, devido à incerteza sobre quando um item irá apresentar falha e demandar uma reposição, os investimentos em previsão de demanda e modelagem de suprimento tem aumentado significativamente.

No âmbito da Força Aérea Brasileira (FAB), a presença de trinta modelos de aeronaves distintos, distribuídos em doze bases aéreas em todo o território nacional, somada às frequentes restrições orçamentárias, tornam ainda mais pertinente a necessidade por decisões baseadas em metodologias sistêmicas. Nesse sentido, a abordagem por item, usada há anos, é mais simples porque as decisões sobre o número de unidades sobressalentes a adquirir, para o estoque de determinado item, são tomadas sem considerar o possível impacto de outros itens. Porém, a desvantagem da abordagem do item em relação à sistêmica é que, naquela, a disponibilidade e o total investimento no sistema de itens representam resultados não controlados. Além disso, Vandeput (2020) descreve que empresas de *software* têm trabalhado ao longo dos últimos vinte anos na otimização de estoques, avançando a ideia de que a abordagem multiescalão pode poupar de 20% a 30% do estoque em comparação com a abordagem de escalão único ou por item.

Nesta metodologia, as variáveis “disponibilidade” e “custo” são entradas do processo decisório, as quais estão estreitamente relacionadas com a duração entre o momento em que é feito o pedido de reparo da peça até o momento em que a peça retorna ao local do pedido, em condição operacional, o que é conhecido como *Turnaround Time* (TAT). Esse tempo pode apresentar diferentes valores dependendo se o reparo é feito pela própria empresa ou se será contratada uma outra empresa para realizar tal serviço. A decisão entre montar uma estrutura para realizar o serviço em casa, ou contratar uma outra empresa para realizá-lo, é uma tarefa muito complexa e representa, muitas vezes, um dilema para as empresas, conhecido como “*make or buy*”. Normalmente a opção “*make*” representa uma redução no TAT e a necessidade de um estoque menor.

Outro fator a ser considerado são as rotas operadas, bem como suas frequências. Dependendo da localização das estações de linha (bases de manutenção do operador) e do tempo que as aeronaves vão permanecer nestas localidades, a provisão será diferente. Por fim, é preciso ainda considerar o processo de manutenção dos itens reparáveis. Se a maioria dos itens tiver sua manutenção regida por processos *on-condition* ou *condition monitoring*, nos quais os itens são removidos apenas em condições específicas de degradação, há a necessidade de elaborar estudos mais avançados para determinação do intervalo médio de remoção desses itens. No caso de itens gerenciados por processo *hard-time*, em que há remoções periódicas, é possível a elaboração de uma diagonal de manutenção a fim de evitar acúmulo de itens em manutenção.

A estimativa da quantidade demandada e a distribuição dos itens reparáveis merece notoriedade, pois poucas empresas utilizam modelos matemáticos para definir os suprimentos, visto que há poucas pessoas habilitadas para tratar do assunto. Sendo assim, baseiam-se em recomendações dos fabricantes com adaptações baseadas na experiência, caso recorrente na FAB. É importante salientar que decisões baseadas em experiência são difíceis de justificar, especialmente quando há restrições orçamentárias severas. Dessa forma, a aplicação de um modelo analítico tem maior potencial para proporcionar aquisições e alocações mais coerentes de itens reparáveis, além de possíveis melhorias nos processos de contratação no tocante aos instrumentos de medição de resultado. Devido à complexidade do problema, com múltiplos equipamentos e diferentes parâmetros, como níveis de manutenção, TAT, bases de operação, esforço aéreo, entre outros, o uso de *software* se faz necessário.

Desde 2005, as aeronaves CASA C-295, nomeadas internamente como C-105 AMAZONAS, estão integradas à Força Aérea Brasileira. Atualmente, a frota conta com 14 aeronaves (11 na especificação BR01 e 3 na especificação BR02) distribuídas em 3 esquadrões,

sediados em 2 localidades distintas: Campo Grande/MS (1º/15º GAv e 2º/10º GAv) e Manaus/AM (1º/9º GAv). De 2005 a 2016, a frota contou com suporte logístico contratado junto à empresa AIRBUS MILITARY. Porém, no período de 2016 a 2019, com a ausência de contrato, a média de aeronaves incompletas passou de 2 para 6 aeronaves, enquanto a disponibilidade operacional se estabilizou em 5 aeronaves. Para dimensionar a importância da frota em relação à sua dimensão, de acordo com os dados de planejamento disponíveis no Sistema Integrado de Logística de Material e Serviços (SILOMS), a frota apresentou um esforço aéreo previsto para 2022 de 5170 horas, o que representa cerca de 5% do esforço da frota de aeronaves da FAB para o corrente ano e, no planejamento de recursos financeiros anuais, consome cerca de 16% da previsão do Parque de Material Aeronáutico do Galeão (PAMA-GL), responsável por mais 11 outras frotas.

Dado tal contexto, este trabalho analisa a aplicação do modelo sistêmico em relação ao modelo atual de gerenciamento de estoques de itens de reposição, mais especificamente de itens classificados como reparáveis e cujo processo de manutenção é realizado em intervalos específicos (*hard-time*). Tal abordagem se justifica pelo fato de que a escolha de tais modelos para o cálculo dos níveis de estoque de itens reparáveis podem elevar a qualidade do suprimento de manutenção, no tocante à disponibilidade operacional da frota de aeronaves C-105. É importante ressaltar também a importância do trabalho para a FAB, devido ao fato de que há uma relação direta entre suprimento de materiais, manutenção, disponibilidade e segurança operacional. Portanto, tanto os setores de Planejamento e Controle da Produção, quanto o de Gestão da Cadeia de Suprimentos, podem obter resultados expressivos para a instituição. Embora o atual processo de aquisição ou reparo de itens esteja bem fundamentado e com equipes dedicadas, há grandes possibilidades de melhoria. Verifica-se ainda que, com relação ao gerenciamento de sobressalentes, há pelo menos três óbices a serem tratados: o acúmulo de excedentes; escassez de orçamento e o desprovimento de itens críticos. A finalidade deste trabalho é propor a aplicação de metodologia multiescalão como alternativa ao modelo atual aplicado pela Força Aérea Brasileira para o cálculo de níveis de estoque de itens de reposição, a fim de definir a quantidade mais adequada de sobressalentes e sua alocação nos diferentes elos, com vistas à melhoria da relação entre disponibilidade operacional e custo. Este intento será conseguido mediante pesquisa bibliográfica e documental, além de utilização de simulação computacional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Jacobs e Chase (2013) afirmam que inventário é o estoque de qualquer item ou recurso usado em uma organização. Um sistema de inventário é o conjunto de políticas e controles que monitoram os níveis de estoque e determinam quais níveis devem ser mantidos, quando o estoque deve ser reabastecido e quão grandes devem ser os pedidos. Nesse mesmo raciocínio, Dias (2010) propõe que o objetivo da administração de estoques é otimizar o investimento em estoque, aumentando o uso eficiente dos meios financeiros, reduzindo as necessidades de capital investido.

No tocante aos estoques de itens de reposição cabe ressaltar que estes podem responder por uma das maiores parcelas dos custos corporativos em empresas (WANKE, 2011 *apud* LIMA, 2017). Também é importante destacar que, no contexto das peças de reposição, empresas e gerentes enfrentam um problema mais complexo que o empregado para produção e distribuição. A abordagem de gerenciamento de tais itens necessita de análises particulares dadas as suas peculiaridades, como demanda errática e difícil de prever, longos tempos de ressurgimento e custos de aquisições elevados (WANKE, 2005).

2.1. Itens reparáveis e processos de manutenção

Pela ótica da administração de estoques, Botter e Fortuin (2000) dividem os itens de reposição em dois grupos: os reparáveis, cujo conserto é técnica e economicamente viável, e os consumíveis, que, em caso de falha, são substituídos por um item novo e descartados. Igawa (2006) aponta que o modo como os equipamentos são operados e mantidos influencia sobremaneira o suprimento. Os itens reparáveis podem ainda ser subdivididos em dois grupos, quanto à capacidade de substituição por um novo item: *Line Replaceable Units (LRU)*, projetados para serem substituídos rapidamente em um local de operação, ou *Shop Replaceable Units (SRU)*, cuja substituição deve ser realizada por um técnico em uma oficina especializada.

Nesse contexto, é importante destacar os três principais processos de manutenção de itens reparáveis: *hard-time*, *on-condition* e *condition monitoring*. O processo *hard-time* se caracteriza pela definição de um intervalo específico para remoção do item e a realização de atividade de manutenção ou revisão geral. A manutenção *on-condition* envolve inspeções ou testes repetitivos para determinar o estado de uma unidade ou sistema. Caso seja encontrada alguma discrepância, o item é removido. Finalmente, no processo *condition monitoring* não há ação de manutenção executada até a falha do sistema ou conjunto maior, já que, devido ao padrão de falha destes equipamentos, inexistente qualquer tarefa passível de ser realizada para avaliar a sua expectativa de vida restante. Portanto, não há um requisito específico de troca.

Dessa forma, Igawa (2006) argumenta que, para os processos que envolvem manutenções programadas é possível a aplicação do método *Just In Time*, não havendo necessidade, portanto, de estoque. Entretanto, para a manutenção corretiva, os reparos não são programados e a consequência de uma falta de peça de reposição se traduz em prejuízo.

Nesse ponto, é preciso avaliar a condição diferenciada dos operadores militares. Verhoeff, Verhagenb e Curran (2015) descrevem que o objetivo principal da aviação militar é otimizar a prontidão operacional, isto é, a capacidade de realizar missões de voo designadas. Al-Momani *et al.* (2020) apresenta cinco problemas de inventário no apoio à frota de aeronaves, no contexto de Forças Aéreas: acumulação de excedentes de peças sobressalentes não utilizadas; acúmulo de itens vencidos; escassez orçamentária; expansão no uso de diferentes plataformas por motivos políticos e ameaças regionais impostas; e expiração do período de garantia causado por não monitoramento de perto itens de garantia. A partir desse contexto de incertezas, observa-se então a necessidade de um planejamento de estoques em nível sistêmico para itens com manutenção programada.

Dentre as variadas metodologias para o cálculo de estoque de componentes, neste trabalho serão abordados dois destes métodos: a abordagem por item, baseada no modelo estabelecido em manual da FAB (BRASIL, 2017), e o método para manutenção preventiva, baseado na distribuição de Bernoulli (SYSTECON AB, 2014 *apud* WIKANDER, 2016).

2.2 O modelo de otimização por item

Tradicionalmente, a abordagem por item é utilizada para determinar níveis de estoques de itens de reposição. O enfoque do gerenciamento dos níveis de estoques é, portanto, atender um determinado nível de serviço. Sherbrooke (2004) apresenta dois indicadores utilizados para a medição dos níveis de satisfação do cliente: o número de *Backorders* (BO) e o *Fill Rate* (FR). Este é definido como a probabilidade de uma demanda ser atendida imediatamente, enquanto aquele pode ser entendido como o número de pedidos de um bem ou serviço que não podem ser atendidos no momento atual.

Dentre as possibilidades de modelos para a abordagem por item, destaca-se o modelo baseado no Processo de Poisson, em que os eventos de falha são considerados aleatórios e a taxa de falha é considerada constante. Ainda segundo Sherbrooke (2004), a pedra angular da teoria de inventário de itens reparáveis é o teorema de filas de Palm. Este teórico propõe que se duas condições são preenchidas – a) demanda por um item segue uma distribuição de Poisson com média anual m ; e b) o tempo de reparo para cada item que falhou é independente e identicamente distribuído de acordo com qualquer distribuição de probabilidade com média T em ano – então a distribuição de probabilidade em regime estável do número de itens em reparo segue uma distribuição de Poisson, com média mT .

Como exemplo de aplicação do processo, pode-se realizar a otimização para que um item atinja um determinado *Fill Rate*. Dessa forma, ao implementar o Modelo de Poisson, calcula-se, para cada *Fill Rate (FR)*, um nível de estoque (S). O *Fill Rate (FR)* é, portanto, igual à probabilidade de que a quantidade (X) de itens, menor ou igual a S , que poderão falhar no período considerado, que neste caso é o tempo de reparo (T), conforme equação (1).

$$FR = P(X \leq S) = e^{-mT} \sum_{i=0}^S \frac{(mT)^i}{i!} \quad (1)$$

2.2.1. O modelo implementado na Força Aérea Brasileira

No âmbito da Força Aérea Brasileira, o Manual de Manutenção MCA 66-7 (BRASIL, 2017) define dois modos de cálculo para os níveis de estoque de reposição inicial para itens reparáveis. Para os itens com manutenção programada, segue a equação (2).

$$G_S = F \times QPA \times E_f \times TRR \times TR_S \quad (2)$$

Em que:

G_S = quantidade de giro para substituir itens por remoção programada;

F = quantidade de aeronaves da frota;

E_f = esforço aéreo mensal de uma aeronave;

QPA = quantidade por aeronave de um componente;

TRR = tempo entre o recolhimento à oficina e o retorno a uma UAe em meses; e

TR_S = taxa de remoção programada por horas de voo, quantidade de ciclos ou número de acionamentos.

Em relação à manutenção não programada, é sugerido o cálculo pelo Processo de Poisson, conforme equação (3):

$$P_U = e^{-F \times QPA \times E_f \times TRR \times TR_U} \sum_{i=0}^{G_U} \frac{(F \times QPA \times E_f \times TRR \times TR_U)^i}{i!} \quad (3)$$

Em que:

G_U = quantidade de giro para substituir itens por remoção não programada;

P_U = *Fill Rate*; e

TR_U = taxa de remoção programada por horas de voo, quantidade de ciclos ou número de acionamentos.

É importante observar ainda que o *Fill Rate* (P_U) é determinado por meio de classificação ABC. Para os itens da faixa A, que representam os 5% de maior valor de custo de reparo, o *Fill Rate* é estabelecido em 75%. Para os itens da faixa B, que são os 15% seguintes em termos de custo de reparo, em 85%, e 95% para os demais.

2.3 O modelo multiescalão

Na abordagem por sistema, o custo de investimento e a disponibilidade do sistema são dados de entrada no processo decisório. Enquanto no modelo de otimização por item a performance se concentra no *Fill Rate*, nesta abordagem a principal medida de desempenho é a disponibilidade do sistema, representada pela porcentagem esperada de uma frota de aeronaves que não está em falta para peças de reposição em um ponto aleatório no tempo. A meta, portanto, é obter a curva ideal para disponibilidade do sistema versus custo de investimento (SHERBROOKE, 2004). Para alcançar esse objetivo, recorre-se à técnica chamada de análise marginal, na qual em cada passo do algoritmo é preciso olhar apenas o valor marginal ou incremental para cada item, que fornece todas as informações necessárias sobre cada item em relação à aquisição, para determinar o próximo item que deve ser comprado.

Percebe-se, portanto, que a abordagem por sistemas é, em primeiro caso, uma abordagem multi-item, e que está relacionada com a abordagem item-a-item no sentido de que cada ponto na curva de custo de disponibilidade do sistema é calculado a partir de uma solução de abordagem de item para um conjunto específico de parâmetros. Dessa forma, o indicador do número de *Backorders* se torna fundamental para análise, pois, em suma, o objetivo da otimização é reduzir o somatório do valor esperado de pedidos não atendidos (*Expected Backorders* - EBO) para cada item em análise, os quais são submetidos a uma restrição orçamentária. Portanto, o problema pode ser formulado pelas equações (4), (5) e (6).

$$EBO(S) = \sum_{x=S+1}^{\infty} (x - s)P(X = x) \quad (4)$$

$$\min \sum_{i=1}^I EBO(S_i) \quad (5)$$

$$c_i S_i \leq C \quad (6)$$

Em que:

I = número de itens do sistema;

c_i = custo de aquisição por item;

S_i = nível de estoque de reposição por item; e

C = limite de orçamento.

A abordagem multiescalão representa uma evolução em relação à análise multi-item, que considera apenas uma base de manutenção, estendendo o problema para o seguinte modelo de funcionamento: quando um item (LRU) apresenta falha, ele é retirado da aeronave e verificado se é possível o reparo na base, enquanto isso, é solicitado um sobressalente ao estoque. Se existir o item no estoque da base, ele será atendido e a aeronave ficará disponível. Caso contrário, a existência do pedido de material representará a quantidade de itens faltantes na frota e, portanto,

uma *Backorder*. O pedido é atendido no caso da chegada de item de reposição no estoque, seja por reparo na própria base, ou após o item ter sido reparado em lugar específico para isso ou por envio do estoque central. As bases compõem, então, o primeiro escalão, e os depósitos centrais o segundo escalão. Tendo em vista que uma *Backorder* nos escalões superiores não causa indisponibilidade da aeronave, o objetivo é, portanto, minimizar o EBO das bases, e consequentemente maximizar a disponibilidade da frota (SHERBROOKE, 2004).

Como exemplos de modelos matemáticos multiescalão podem ser citados o *Multi-Echelon Technique for Recoverable Item Control* (METRIC), desenvolvido por Sherbrooke (1968) e o VARI-METRIC, concebido como melhoria ao METRIC por Slay (1984), que consiste em um modelo de segunda ordem, isto é, trata das Backorders em nível oficina relacionadas às SRU, e inclui, no cálculo da quantidade de EBOs, a média e a variância para o número de LRUs em reparo no maior escalão, e também para o número de SRUs em reparo na base ou em ressuprimento. É preciso ainda ressaltar que, no modelo METRIC, os tempos de reparo são independentes e identicamente distribuídos. Portanto, baseado no Teorema de Palm, o processo de Poisson é a formulação desse modelo. No VARI-METRIC (GRAVES, 1985), em lugar de aproximar o número de itens em *pipeline* por um processo de Poisson, esse número é estimado por uma distribuição binomial negativa.

É preciso ressaltar que a confiança na aplicação do método multiescalão em indústrias e organizações de manutenção está se tornando cada vez mais prevalente. Graves (1985) destaca o uso e o interesse militar nesse tipo de abordagem, e Sherbrooke (2004) reforça que uma Força Aérea pode ser considerada um sistema de dois escalões para a maioria dos propósitos. Shanker (1977) analisa um sistema de dois escalões formado por um depósito e um conjunto de bases, no qual as demandas primárias ocorrem nas bases para uma ou várias unidades por vez, em um processo de Poisson. No estudo deste autor, todos os locais assumem capacidades infinitas de reparo, com prazos constantes de reparo e aquisição.

Por fim, Costantino, Di Gravio e Tronci (2013) dissertam sobre o problema da logística militar no gerenciamento de reparáveis para as aeronaves, com foco na Força Aérea Italiana, no qual nem todas as bases podem ter um armazém ou centro de manutenção, e ações em itens críticos são comumente centralizadas em estruturas dedicadas. Dessa forma, como o objetivo é a maximização da disponibilidade submetida a restrições orçamentárias, é preciso atentar que a falta de um item de reposição tornará uma aeronave indisponível.

2.4 OPUS10

Desenvolvido pela empresa sueca Systecon AB, o *software* OPUS10 é aplicado nos problemas de otimização de sistemas de suporte, auxiliando na escolha de quantidades e locais de armazenagem para itens sobressalentes, por exemplo, além de auxiliar em decisões quanto a nível de reparo (*Level of Repair Analysis* - LORA), possibilitando também análises de custo-benefício, as quais envolvem comparações de alternativas e verificações de hipóteses (*what-if analysis*). Uma característica chave no modelo matemático do OPUS10 é que a demanda de peças de reposição é representada pelo processo de Poisson. Outro ponto importante é que o modelo é estacionário, portanto, os processos de demanda e outras condições não mudam com o tempo. Dessa forma, as metodologias METRIC e VARI-METRIC, por seu pioneirismo, são as bases para a construção de seu algoritmo. Lau e Song (2005) discorrem que o modelo do OPUS10 é um ramo da formulação de otimização proposta por Alfredsson (1999) continuamente desenvolvido por mais de 20 anos. É importante salientar que, embora o OPUS10 contenha um modelo de um cenário logístico do mundo real, inseridos pelo usuário, não é uma ferramenta de simulação, mas um modelo analítico.

Entre suas aplicações, destacam-se análise da lista de provisionamento inicial (LAI), estudo de estoque (rearranjo, repletamento, ou ambos), avaliação de alternativas de suporte logístico e análise de sensibilidade (FIGUEIREDO, 2020). Outro uso desta ferramenta encontrado na literatura é proposto por Wu e Hsu (2008), que apresentam uma abordagem para reduzir o custo operacional total de um sistema logístico, projetando adequadamente a lista de compra de peças de reposição através da análise das taxas de falha e preços de cada item e respectivo fornecedor. O OPUS10 foi aplicado, então, para calcular uma política de estoque ideal e seu custo logístico total associado. Dado que uma peça de reposição pode ter vários fornecedores, a pesquisa exaustiva pelo OPUS10 do espaço de solução do sistema, no entanto, pode ser extremamente demorada. Para remediar o problema, os autores desenvolveram uma rede neural para emular eficientemente a função do OPUS10 e um GA (algoritmo genético) no intuito de encontrar rapidamente uma solução ótima. Por outro lado, Figueiredo (2020) utiliza o *software* com dados históricos para analisar a relação entre *Turnaroud Time* (TAT) médio de reparáveis e o impacto na disponibilidade da frota de uma aeronave específica da Força Aérea Brasileira (FAB).

2.4.1 A distribuição de Bernoulli e a manutenção preventiva

Wikander (2016) descreve que o modelo matemático para manutenção preventiva no OPUS10 é formulado baseado em suposições de perfeita regularidade e coordenação entre as diferentes bases. Isso significa que a demanda nas bases pode ser considerada completamente regular, e que a contribuição oriunda da manutenção preventiva para o *pipeline* é bem conhecida. Dessa forma, os diferentes escalões estão coordenados e a demanda agregada é completamente regular. Portanto, o número de itens em reparo é sempre 0 ou 1, o que se considera um *pipeline* completamente regulado.

No OPUS10, conforme a manutenção preventiva não assume o mesmo caráter randômico da manutenção corretiva, assume-se que o *pipeline* é completamente regulado e, portanto, a demanda cíclica é representada como uma distribuição de Bernoulli, que é uma distribuição discreta que assume somente dois valores em torno da média, conforme representado na equação (7):

$$p(n) = \begin{cases} 1 - p_h, & n = k \\ p_h, & n = k + 1 \\ 0 & \text{outros } n \end{cases} \quad (7)$$

$$k = \lfloor m \rfloor \quad (8)$$

$$p_h = m - k \quad (9)$$

Em que:

m é a demanda média de itens reparáveis em um determinado nível do sistema; e
k e k+1 são os possíveis valores assumidos pelo *pipeline*.

3 MATERIAL E MÉTODO

Conforme salientou-se na introdução, pretende-se analisar a eficiência da aplicação de metodologia multiescalão em relação à abordagem por item, a fim de efetuar o cálculo de níveis de estoque de itens de reposição das aeronaves C-105 AMAZONAS, e sua alocação nos armazéns dos operadores e no Parque de Material. Para alcançar tal objetivo, recorreu-se, inicialmente, à revisão bibliográfica quanto ao assunto, já discutida na seção anterior. A seguir, com referência

às tipologias de Gil (2008), foi realizada uma pesquisa aplicada, de campo, documental, quantitativa e exploratória, com o levantamento de dados de vinte e oito itens reparáveis distintos, os quais foram aplicados nos *softwares* Microsoft Excel e OPUS10 para verificação e análise de resultados.

3.1. Obtenção e tratamento de dados

Para verificar o impacto da aplicação da metodologia multiescalão para determinação de níveis de estoque de itens de reposição em relação à abordagem por item, atualmente aplicada na FAB (BRASIL, 2017), foi realizado, inicialmente, o levantamento dos dados das requisições de reparo de itens da frota de aeronaves em estudo, referentes aos anos de 2020 a 2022, no Sistema Integrado de Logística de Material e Serviços (SILOMS), *software* de gerenciamento logístico utilizado na FAB. Tal abordagem foi necessária devido ao fato de, em 1º de novembro de 2019, ter sido assinado contrato de suporte à manutenção de itens reparáveis para a frota de aeronaves C-105. Portanto, os prazos de execução dos reparos anteriores a essa data não contêm a representatividade necessária ao estudo, pois são muito superiores aos praticados no momento atual.

Para selecionar os itens e realizar a aquisição dos dados de falha, recorreu-se às Fichas de Coleta de Dados de Defeito (FCDD), também extraídas do SILOMS, nos anos de 2016 a 2022. Porém, durante a fase de tratamento dos dados, verificou-se que as informações referentes aos tempos em que ocorre a falha desde o item novo ou desde a última revisão não estavam lançados ou estavam com valores muito acima da idade média da frota, em especial para os itens que vencem em prazos de calendário. Conforme não foi possível obter tais dados dos fabricantes por questões contratuais, recorreu-se ao levantamento de dados das requisições de itens com processo de manutenção *hard-time* no SILOMS. Para garantir que a análise de estoques para trocas por vencimentos de inspeções programados é uma abordagem válida, foram verificados dados dos Assessoramentos Técnicos da Engenharia do Parque de Material Aeronáutico do Galeão (PAMA GL), para concessões de extensões operacionais aos vencimentos das manutenções programadas de itens reparáveis. Foram levantados os dados dos anos de 2017 a 2022, com comparações entre os períodos de 2017 a 2019 e de 2020 a 2022, por causa do advento do contrato de suporte à manutenção. Após a filtragem das informações, foram encontradas para o período de 2020 a 2022, 84 extensões de uso operacional após vencimento de revisão geral a 21 itens reparáveis, com uma média de 10% de extensão do tempo entre revisões, totalizando 24 componentes distintos ao longo dos últimos 6 anos. Foram, então, escolhidos 27 itens da relação de itens controlados por processo *hard-time* para análise do *Turnaround Time* de reparo por vencimento programado.

Foram realizadas ainda entrevistas com os membros envolvidos nos processos de levantamento das demandas de itens reparáveis e processos de compra para fins de entendimento de como são aplicadas as equações previstas nos manuais do Comando da Aeronáutica, e se há metodologia paralela já aplicada. Contudo, foi verificado que apenas o processo de gerenciamento de estoques de itens consumíveis está bem desenvolvido, sendo o escopo de gestão de itens reparáveis ainda bastante incipiente para o projeto C-105. Foram ainda levantados o esforço aéreo anual e a distribuição da frota nos operadores, dos anos de 2018 a 2022, além dos dados de tempo entre a saída de um item dos operadores e o recebimento no Parque de Material, para estimativa do *Transit Time*, que é o intervalo necessário para uma remessa ser entregue entre a retirada do armazém do operador até o destino final no Parque de Material.

Por fim, conforme havia elevado número de itens duplicados nos dados de estoques fornecidos no SILOMS, este estudo visa elaborar a comparação de listas de aprovisionamento inicial elaboradas a partir das abordagens por item e por sistema.

3.2. Métricas de avaliação de desempenho

Conforme tratado anteriormente, a métrica de avaliação deste estudo é a disponibilidade. Sherbrooke (2004) aponta que os logísticos combinam a palavra “disponibilidade” com três adjetivos diferentes para medir coisas diversas: inerente, alcançada e operacional.

Segundo Pryor (2008), em termos gerais, a disponibilidade operacional (A_o) é a proporção de tempo que um sistema está operando ou é capaz de operar (chamado *uptime*), ao ser usado de uma maneira específica em um típico ambiente de manutenção e suprimento. Então, A_o pode ser entendida como a razão entre o tempo de atividade e o tempo ativo total. O tempo ativo refere-se a um período na vida do item em que ele está sendo utilizado no ambiente em qual se destina a desempenhar a sua função principal. Em contrapartida, tempo inativo refere-se ao período de tempo em qual um item não está sendo utilizado, como o tempo em que é armazenado ou em reparo, ou mesmo em fase de transporte de longo alcance ou sendo utilizado como item de reposição. Matematicamente, ela é representada pela equação (SHERBROOKE, 2004):

$$A_o = \frac{100 \times MTBM}{MTBM + MDT} \quad (10)$$

Onde:

MTBM (*Mean Time Between Maintenance*) é o tempo médio entre as manutenções; e
MDT = (*Mean Downtime*) é o tempo médio inativo devido a peças de reposição, manutenção (corretiva e preventiva).

Sherbrooke (2004) define que, para fins de cálculo, é conveniente computar a disponibilidade operacional como o produto de duas disponibilidades, a disponibilidade por manutenção e a disponibilidade por suprimento. A disponibilidade por manutenção (A_M) é dada pela equação (11):

$$A_M = \frac{100 \times MTBM}{MTBM + MCMT + MPMT} \quad (11)$$

Em que:

MCMT (*Mean Corrective Maintenance Time*) é o tempo médio que o item leva em manutenção corretiva; e

MPMT (*Mean Preventive Maintenance Time*) é o tempo médio que o item fica em manutenção preventiva.

A disponibilidade por suprimento (A_s) é dada pela equação (12):

$$A_s = \frac{100 \times MTBM}{MTBM + MSD} \quad (12)$$

Onde:

MSD (*Mean Supply Delay*) é o tempo médio de atraso para suprimento.

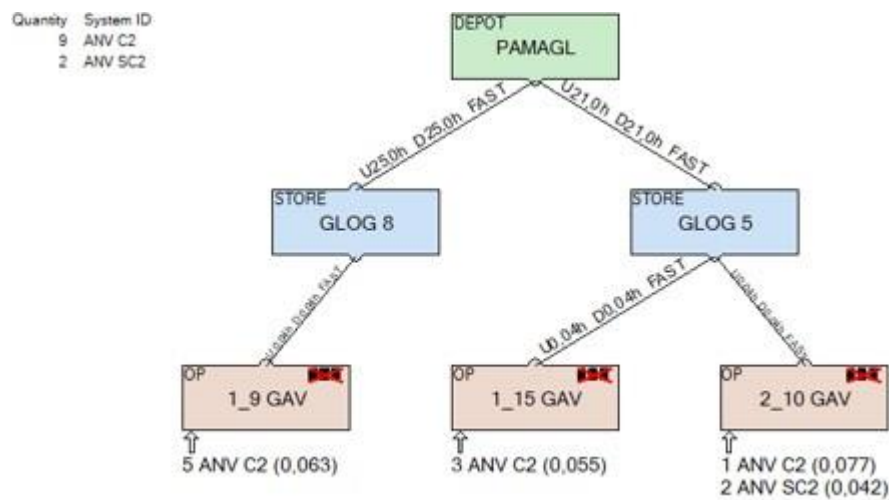
No estudo em tela, foram apreciados somente os tempos de indisponibilidades por manutenção preventiva, no caso, revisões gerais. O foco da análise se concentra na disponibilidade por manutenção (A_M). No modelo, é assumido ainda que a demanda segue uma distribuição de Bernoulli.

3.3 Modelo do OPUS10

O modelo aplicado ao problema em estudo consta de três escalões, compostos por itens reparáveis apenas do tipo LRU. Desta forma, quando o intervalo de manutenção for atingido, o item será retirado da aeronave e uma ordem de serviço é criada para manutenção do equipamento. Observa-se que o operador, 1º escalão, não possui estoques, pois estão vinculados a outras unidades intermediárias, os Grupamentos de Apoio Logístico (GLOG). Portanto, existe um atraso entre a retirada da unidade com prazo de manutenção expirado e o fornecimento de item de reposição. Se há peça de reposição no estoque no GLOG, outra unidade em funcionamento será colocada no lugar. Caso contrário, a ordem de serviço permanece em aberto no respectivo GLOG e a aeronave ficará indisponível até a chegada de outro equipamento. O item, então, segue para revisão geral no Parque central. São assumidas as seguintes condições: demanda perfeitamente regular, não há condenações, nem canibalização, não há ressuprimento lateral, isto é, entre GLOGs, e capacidade de reparo ilimitada.

A figura 1 apresenta a configuração do modelo, em que o PAMAGL teve a sua estação classificada como DEPOT, ou seja, local onde os itens são reparados e estocados, o GLOG 5 e o GLOG 8 como STORE, pois nessas estações há apenas estocagem de itens de reposição e os operadores 1º/15º GAv, 1º/9º GAv e 2º/10º GAv foram classificados como OP, pois não permitem nem estocagem nem reparo dos materiais reparáveis. Assim, são nove sistemas C-105 e dois C-105 distribuídos em 3 organizações militares, sendo que os SC-105 estão localizados somente no 2º/10º GAv.

Figura 1 – Modelo da Estrutura Logística de Suporte



Fonte: Os autores (2022).

A lista de provisionamento inicial e a análise de alocação de estoques foram a ferramentas do *software* escolhidas para o estudo. A opção se deu por dois motivos: o primeiro é que o estudo visa comparar as metodologias de determinação de estoques por item e por múltiplos escalões, e portanto, não se trata de um estudo de caso para realocação dos estoques já existentes. O segundo foi o superdimensionamento ou subdimensionamento, para os itens reparáveis em análise, dos dados de estoque apresentados no SILOMS.

Para cada sistema C-105 e SC-105, foram considerados vinte e sete itens reparáveis. Os dados considerados (custo, quantidade por aeronave - QPA, TAT e tempo entre revisões) foram extraídos do SILOMS e estão esmiuçados na tabela 1.

Tabela 1 – Dados de entrada no OPUS10.

ITEM	QPA	TBO (HORAS)	TAT MÉDIO (DIAS)	CUSTO (US\$)
I-1	2	2000	162	50.429,95
I-2	2	2400	250	31.662,84
I-3	2	43800	224	3.127,36
I-4	3	2000	209	42.475,10
I-5	1	140160	365	342.072,92
I-6	1	140160	365	342.072,92
I-7	1	140160	500	342.072,92
I-8	1	140160	270	28.588,36
I-9	1	140160	270	101.464,85
I-10	2	140160	180	73.040,22
I-11	1	26280	234	4.873,52
I-12	4	43800	173	1.385,41
I-13	1	2500	212	72.649,57
I-14	2	6000	170	7.241,56
I-15	2	6000	178	5.076,98
I-16	2	6000	174	9.633,61
I-17	2	6000	221	7.343,47
I-18	2	6000	219	6.212,55
I-19	3	11680	168	11.906,00
I-20	7	5840	228	9.393,79
I-21	2	6000	206	54.010,11
I-22	2	6000	198	37.115,92
I-23	2	6000	173	3.800,00
I-24	12	61320	140	73.089,22
I-25	6	1000	215	13.281,35
I-26	2	1000	202	13.281,35
I-27	20	1000	173	13.281,35

Fonte: Os autores (2022).

3.4. Abordagem por item

Para o cálculo dos estoques de itens de reposição, como não há um modelo específico de cálculo para reposições de itens baseados em manutenção preventiva, foram utilizados os dados da tabela 1 e aplicados à equação (2) para estoque de reposição para manutenção programada. Os estoques foram alocados de duas maneiras: a primeira, somente nos GLOGs e calculados considerando-se as horas de operação somadas de todos os esquadrões atendidos por cada um deles. A segunda, deslocando-se os estoques calculados por GLOG e centralizando-os no PAMAGL.

Os dados da tabela 1 também foram aplicados à equação (3), com índices de *Fill Rate* de 75%, 85% e 95% para cada item.

4 RESULTADO E DISCUSSÃO

Como não há metodologia aplicada para o cálculo da disponibilidade operacional do sistema a partir dos estoques gerados a partir das equações (2) e (3), optou-se, para fins de comparação do indicador em análise, por inserir os dados do estoque de reposição obtido por esta abordagem no modo ANALYSIS do *software* OPUS10 a fim de estabelecer qual a disponibilidade operacional seria atingida com a alocação. A partir da solução obtida para o modelo multiescalão, foram escolhidos os seguintes critérios de comparação para cada caso: o primeiro com a disponibilidade próxima àquela obtida na abordagem por item e o segundo com o custo de aquisição próximo ao obtido na abordagem por item. Os resultados estão na tabela 2.

Tabela 2 – Custo e disponibilidade operacional obtidos dos respectivos modelos.

ANÁLISE	MÉTODO	CUSTO (US\$)	DISPONIBILIDADE (%)
A-1	MCA 66-7 (Alocação nos GLOGs)	1.159.244	6,15
A-2	MCA 66-7 (Alocação no PAMAGL)	1.159.244	6,16
A-3	MCA 66-7 (Alocação nos GLOGs) pelo menos um item de reposição por Componente	3.894.188	6,73
A-4	MCA 66-7 (Alocação no PAMAGL) pelo menos um item de reposição por Componente	2.526.716	6,63
A-5	Abordagem por item - Distribuição de Poisson (<i>Fill Rate</i> 75%)	5.912.647	13,06
A-6	Abordagem por item - Distribuição de Poisson (<i>Fill Rate</i> 85%)	6.291.436	13,11
A-7	Abordagem por item - Distribuição de Poisson (<i>Fill Rate</i> 95%)	9.061.518	13,77
A-8	OPUS10	281.182	6,27
A-9		365.725	6,70
A-10		1.139.296	11,52
A-11		1.351.797	14,5
A-12		2.557.944	48,1
A-13		3.763.548	85,52

Fonte: Os autores (2022).

À primeira vista, chama a atenção que, na abordagem por item para manutenção programada, independentemente de onde os estoques estejam alocados, a disponibilidade operacional apresenta praticamente o mesmo valor, entre 6% e 7%. Foi possível observar ainda que, aplicando-se o modelo de manutenção não programada baseada no *Fill Rate*, apesar da disponibilidade duplicar em relação ao método previsto para manutenção programada, ainda sim a disponibilidade é baixa (13,8%) e com custos de aquisição extremamente elevados. Quanto à análise comparativa entre a eficiência das abordagens por item e multiescalão, para o mesmo valor de disponibilidade operacional atingido, a abordagem multiescalão apresenta uma alocação de estoque com custo até 90,6% menor em relação à abordagem por item. Quanto ao custo de investimento na aquisição do estoque, observa-se ganhos de disponibilidade de até 1171% do modelo multiescalão em relação à abordagem mencionada na MCA 66-7, como é o caso do salto de 6,73% para 85,52% de disponibilidade com o investimento na casa de US\$3,8 milhões.

Outro aspecto merecedor de uma análise mais profunda é a distribuição dos itens de reposição entre as bases. Enquanto no modelo apresentado na MCA 66-7 não existe uma definição explícita sobre decisão de onde alocar determinado item, ficando esta função a cargo do analista de estoque, a abordagem multiescalão apresenta ferramenta matemática para a decisão. Isso se traduz no fato de que, para a determinação de estoques através da abordagem por item, foi decidido ou implementar os estoques diretamente nos GLOGs com base na utilização anual de seus respectivos operadores ou centralizá-los no PAMAGL. Como critério de análise, na tabela 3 seguem os dados comparativos dos estoques totais obtidos na abordagem por item e na abordagem multiescalão.

Tabela 3 – Total de itens alocados por estação.

ANÁLISE	TOTAL	PAMAGL	GLOG 5	GLOG 8
A-1	51	0	26	25
A-2	51	51	0	0
A-3	81	0	40	41
A-4	66	66	0	0
A-5	192	0	97	95
A-6	207	0	104	103
A-7	262	0	130	132
A-8	39	18	4	17
A-9	48	18	26	4
A-10	120	57	25	38
A-11	136	48	56	32
A-12	200	74	66	60
A-13	213	76	72	65

Fonte: Os autores (2022).

Na comparação entre os dados das tabelas 2 e 3, evidencia-se que, entre a análise A-10 e a análise A-1, apesar de o mesmo valor de investimento em itens de reposição, são adquiridos 69 itens a mais na primeira em relação à última. Além disso, é notório que os estoques obtidos na abordagem multiescalão priorizam a alocação no ente central, o PAMAGL. De fato, verifica-se que para a análises A-8 e A-10, cerca de 47% dos itens da lista de compras estão alocados no 3º escalão, enquanto nas demais análises multiescalão, este valor fica em torno de 36%. A centralização de estoques também é uma boa opção mesmo se considerando a abordagem por item,

pois a disponibilidade operacional atingiu o mesmo patamar tanto com o estoque concentrado no ente central quanto dividido entre as bases do 2º escalão. Dessa forma, se a análise fosse encaminhada no sentido da viabilidade ou não de serem construídos armazéns de suprimento nos elos GLOG, a melhor opção é priorizar o estoque no PAMAGL.

Destaca-se ainda, na tabela 4, que os 10 itens com maior custo de aquisição apresentam estoque 0 (zero) em 4 das 6 análises multiescalão realizadas. Além disso, quando esses itens entram na lista de aprovisionamento, verifica-se elevado incremento na disponibilidade do sistema, como é possível verificar para as análises A-12 e A-13.

Tabela 4 – Níveis de estoque dos 10 itens com maior valor de aquisição

ITEM	CUSTO (US\$)	ANÁLISE					
		A-8	A-9	A-10	A-11	A-12	A-13
I-5	342072,92	0	0	0	0	0	0
I-6	342072,92	0	0	0	0	0	0
I-7	342072,92	0	0	0	0	0	1
I-9	101464,85	0	0	0	0	0	1
I-24	73089,22	0	0	0	0	0	8
I-10	73040,22	0	0	0	0	0	1
I-13	72649,57	0	0	0	0	1	2
I-21	54010,11	0	0	0	0	1	1
I-4	42475,10	0	0	0	0	5	5
I-22	37115,92	0	0	0	0	1	1

Fonte: Os autores (2022).

Quanto ao aspecto do TAT, verifica-se que, dos 10 itens com maior TAT de manutenção programada, 6 itens apresentam estoque 0 (zero) em 4 das 6 análises multiescalão. Quanto à análise A-13, comparando-se os dados das tabelas 4 e 5, é possível notar que apenas os itens I-5 e I-6, com elevado custo de aquisição e elevado TAT apresentam nível de estoque zero.

Tabela 5 – Níveis de estoque dos 10 itens com maior TAT

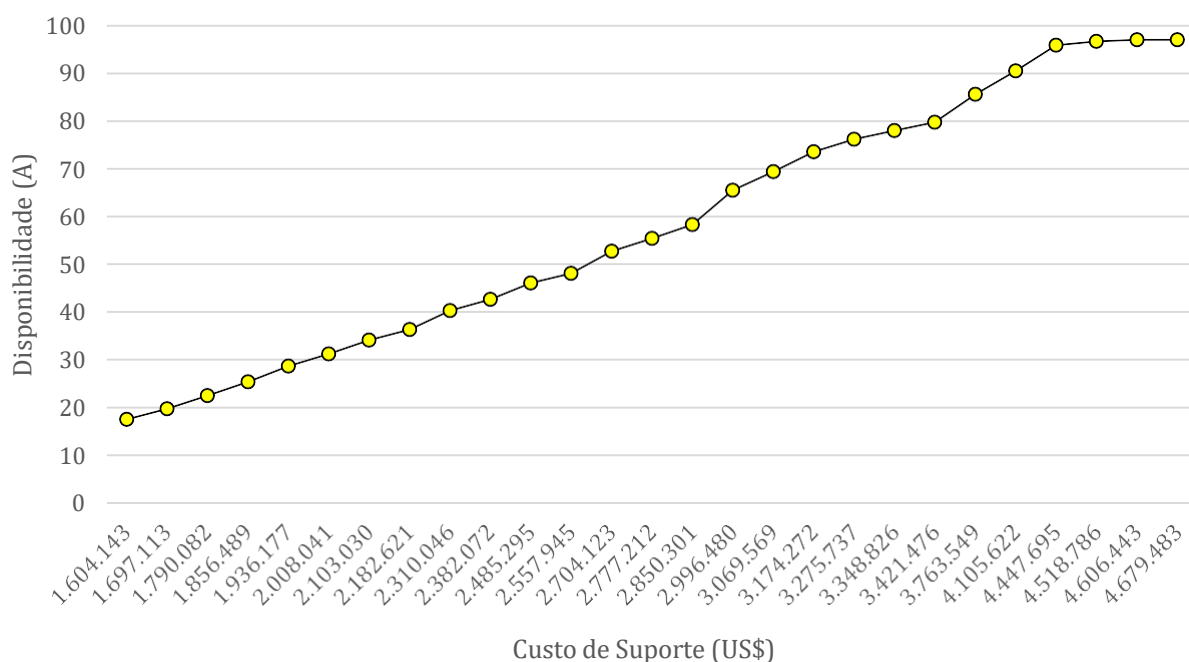
ITEM	TAT (dias)	ANÁLISE					
		A-8	A-9	A-10	A-11	A-12	A-13
I-7	500	0	0	0	0	0	1
I-5	365	0	0	0	0	0	0
I-6	365	0	0	0	0	0	0
I-9	270	0	0	0	0	0	1
I-8	270	0	0	0	0	1	1
I-2	250	0	0	0	0	3	4
I-11	234	2	2	3	3	3	3
I-20	228	24	33	73	73	73	73
I-3	224	3	3	3	3	3	3
I-17	221	1	1	1	1	2	2

Fonte: Os autores (2022).

Contrapondo-se ainda as análises A-1 e A-8, 10 itens foram recomendados em maior quantidade na lista de compras na última análise, enquanto apenas 8 itens tiveram menor indicação de acervo. Aparentemente, essa é uma contradição, pois o número de itens adquiridos na análise 8 representa 235% do acervo total da análise A-1, baseada na abordagem por item. Contudo, o investimento necessário para esta lista maior representa 101% do montante necessário para aquela. Essa é outra evidência das vantagens de aplicação do modelo multiescalão, pois é possível verificar que a disponibilidade operacional pode ser otimizada com a aquisição de itens com menor valor unitário e maior intervalo de TBO, enquanto itens com elevado TBO, mas também dispendiosos são menos recomendados.

Por fim, é preciso enfatizar o aspecto mais vantajoso da análise multiescalão em relação à abordagem por item. A abordagem multiescalão apresenta uma lista de possíveis escolhas para análise de custo-benefício, enquanto a abordagem por item somente oferece uma possibilidade de escolha a partir dos parâmetros estabelecidos. A figura 2 apresenta o gráfico obtido para o modelo multiescalão.

Figura 2 – Disponibilidade por custo da lista de compras dos itens reparáveis de reposição por vencimento programado, na frota C-105 da FAB.



Fonte: Os autores (2022).

Da análise do gráfico, é possível verificar que com um investimento de US\$4,1 milhões é possível atingir 90,4% de disponibilidade operacional. Portanto, aplicando-se 3,6 vezes mais recursos em relação à análise A-10, por exemplo, é possível aumentar em 8 vezes o valor da disponibilidade, em relação à própria metodologia multiescalão. Comparando-se com a abordagem por item, a título de amostra a análise A-1, esse valor chega a 15 vezes. Portanto, a abordagem multiescalão revela-se muito mais capaz de oferecer relações de custo-benefício, além de a abordagem por item ter conduzido a um ponto extremamente ineficiente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs a aplicação de metodologia multiescalão como alternativa ao modelo atual aplicado pela Força Aérea Brasileira para o cálculo de níveis de estoque e alocação de itens de reposição, com vistas à melhoria da relação entre disponibilidade operacional e custo. Esse modelo é apresentado como uma alternativa mais vantajosa em relação à abordagem por item, atualmente utilizada pela FAB nos seus manuais de manutenção, por apresentar melhor relação custo de aquisição vs. disponibilidade. Nesse sentido, foram elencados objetivos específicos: revisão bibliográfica sobre o assunto, levantamento de dados do gerenciamento de reparáveis da Força Aérea Brasileira, além da utilização do *software* OPUS 10 na etapa de modelagem para verificação dos resultados.

A aplicação do *software* OPUS10, cujo modelo matemático analítico é bastante consolidado, mostrou-se fundamental para obtenção dos resultados, devido à facilidade de interação, elaboração de modelo, e inserção de dados no programa. Os resultados obtidos para o aprovisionamento inicial demonstraram que, para atingir o mesmo valor no indicador disponibilidade, em algumas das análises realizadas, a abordagem multiescalão apresenta uma alocação de estoque com custo 75,4% menor em relação à abordagem por item. Fixando-se o custo de investimento na aquisição do estoque como critério comparativo, observou-se um incremento de disponibilidade de 87,3% do modelo multiescalão em relação à abordagem apresentada nos manuais da FAB.

A análise ainda permitiu observar que, ao se aplicar cerca de 4 vezes mais recursos para aquisição do aprovisionamento inicial (US\$4,1 milhões em relação aos US\$ 1,1 milhão previstos na abordagem por item), é possível, em relação à própria metodologia multiescalão, aumentar em 8 vezes o valor da disponibilidade, com um salto de 11,5% para 90,4% de disponibilidade. Já em relação à abordagem por item, esse valor chega a 15 vezes (6,15% para 90,4%). Os resultados obtidos ainda apresentam ganhos já bem difundidos em outras pesquisas na área. Tysseland (2009), por exemplo, demonstrou que, nos projetos em que foi possível aplicar a metodologia do OPUS10, a redução de custos para a Força Aérea Norueguesa foi de cerca de 60%.

O estudo ainda revelou uma importante característica da abordagem por item para o gerenciamento de estoques com substituição por manutenção preventiva: a quantidade de itens de reposição é modelada para suprir a demanda de substituição periódica. Isso pode ser verificado na modelagem da equação (2), a qual se revela uma modificação do teorema das filas de Palm para a inclusão de tempos de remoção programada e tempo de manutenção programada. Diallo, Ait-Kadi e Chelbi (2009) também modelam o número de itens de reposição por substituição periódica baseado em preenchimento de demanda. Conforme foi possível verificar, para sistemas complexos, como aeronaves, essa abordagem se revela ineficaz quanto para o dimensionamento de estoques quanto à disponibilidade do sistema, em especial se os tempos de manutenção e transporte forem elevados. Para as condições em análise no presente estudo, com TAT médio de 225 dias, verificou-se que a abordagem por demanda média por item é ineficaz para garantir índices de disponibilidades acima de 70%.

Este trabalho requer ainda um maior aprofundamento em diversos aspectos. Primeiramente, podem ser comparadas as disponibilidades atingidas metodologias por item que envolvem a métrica *Fill Rate*. Essa metodologia já é contemplada na Força Aérea Brasileira para itens com reposição não programada e aplicada através da classificação ABC. Também podem ser avaliados os impactos dos tempos de transporte entre os escalões, ou ainda o impacto da redução do TAT na métrica disponibilidade, conforme já visto no trabalho de Figueiredo (2020), ou ainda os processos de ressuprimento lateral e canibalização. Finalmente, pode ser ainda investigado o

impacto da distribuição de estoques de acordo com a relação entre as reposições por manutenção programada e não programada.

REFERÊNCIAS

ALFREDSSON, Patrik. **OPRAL – A Model for Optimum Resource Allocation**. Systecon AB, Box 5205, SE-102 45 Stockholm, Sweden, 1999.

AL-MOMANI, Hesham; AL MEANAZEL, Osama T; KWALDEH, Ehsan; ALAWEEN, Abdallah; KHASALEH, Atif; QAMAR, Ahmad. The efficiency of using a tailored inventory management system in the military aviation industry. **Heliyon**, [s. l.], v. 6, n. e4424, ed. 7, 15 jul. 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04424>. Disponível em: [https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440\(20\)31268-8.pdf](https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440(20)31268-8.pdf). Acesso em: 9 jul. 2022.

BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial**. 5.ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 616 p.

BLANCHARD, Benjamin S.; FABRYCKY, Walter J. **Systems Engineering and Analysis**. 5.ed. Boston: Prentice Hall, 2011.

BOTTER, René; FORTUIN, Leonard. Stocking strategy for service parts: a case study. **International Journal of Operations & Production Management**, [s. l.], v. 20, n. 6, p. 656-674, 2000. DOI <https://doi.org/10.1108/01443570010321612>. Disponível em: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/01443570010321612/full/html>. Acesso em: 15 jul. 2022.

BRASIL. Ministério da Defesa, Comando da Aeronáutica, Comando Geral de Apoio, Diretoria de Material Aeronáutico e Bélico. **Manual de manutenção: doutrina, processos e documentação de manutenção**. Rio de Janeiro, RJ, 2017.

COSTANTINO, Francesco; DI GRAVIO, Giulio; TRONCI, Massimo. Multi-echelon, multi-indenture spare parts inventory control subject to system availability and budget constraints. **Reliability Engineering & System Safety**, [s. l.], v. 119, p. 95-101, 2013. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.05.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832013001312>. Acesso em: 15 jul. 2022.

D'APICE, Ciro *et al.* **Modeling, Simulation, and Optimization of Supply Chains**: a continuous approach. Philadelphia: Society For Industrial And Applied Mathematic, 2010. 216 p.

DIALLO, C.; AÏT-KADI, D.; CHELB, A. Integrated Spare Parts Management. In: BEN-DAYA, Mohamed *et al.* **Handbook of Maintenance Management and Engineering**. 1. ed. London: Springer-Verlag, 2009. cap. 9, p. 191-218.

DIAS, Marco Aurélio P. **Administração de Materiais: Uma abordagem logística**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

FIGUEIREDO, M.; SCANFONE, L.; MOTA, D. (2020). Análise do impacto do Turnaround Time de reparáveis na disponibilidade da frota do Projeto C-95M. **Revista Defesa e Segurança**.4. 2019. P.42-60.

GRAVES, Stephen C. A Multi-Echelon Inventory Model for a Repairable Item with One-for-One Replenishment. **Management Science**, [s. l.], v. 31, n. 10, p. 1247-1256, 1985. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/2631714>. Acesso em: 17 jul. 2022.

IGAWA, M. **Otimização do suprimento de itens reparáveis para frotas de aeronaves**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

JACOBS, F. Robert; CHASE, Richard. **Operations and Supply Chain Management**. 14. ed. New York: Irwin/McGraw-Hill, 2013. 800 p.

LAU, Hoong Chuin; SONG, Huawei. Evaluation of Time-Varying Availability in Multi-Echelon Inventory System with Combat Damage. Research Collection School Of Information Systems, [S. l.], p. 226-231, 2005. IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE) 1-2 August, Edmonton: **Proceedings**.

LIMA, M. C. **Estratégias de estoque de peças de reposição: um estudo de caso de um OSRV**. 2017. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

PRYOR, Gary A. **Methodology for Estimation of Operational Availability as Applied to Military Systems**. **ITEA Journal**, [s. l.], n. 29, p. 420–428, 2008. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA518378.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2022.

RUSHTON, Alan; CROUCHER, Phil; BAKER, Peter. **The Handbook of Logistics & Distribution Management: Understanding the Supply Chain**. 6. Ed. London: Kogan Page, 2017.

SHANKER, Kripa. **An Analysis of a Two-Echelon Inventory System for Recoverable Items**. Unpublished Doctoral Dissertation, (also Technical Report No. 341), School of Operations Research and Industrial Engineering, Cornell University, Ithaca, NY, June 1977.

SHERBROOKE, Craig C. **Optimal Inventory Modeling of Systems – Multi-EchelonTechnics**. 2. ed. Massachusetts: Kluwer Academics, 2004.

Slay, F. M. (1984). VARI-METRIC: An Approach to Modelling Multi-Echelon Resupply when the Demand Process is Poisson with a Gamma Prior. **Logistics Management Institute**, Washington, D.C. Report AF301-3.

Systecon AB, OPUS10 Algorithms and methods, Version 10, 2014-03- 31.

U.S. GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. **Relatório GAO-21-101SP**. Whashington, DC, 2020. 228 p.

VANDEPUT, Nicolas. **Inventory Optimization: models and simulations**. Berlin/Boston:Walter de Gruyter GmbH & Co Kg, 2020. 318 p.

VERHOEFF, M.; VERHAGEN, W.J.C.; CURRAN, R. Maximizing operational readiness in military aviation by optimizing flight and maintenance planning. **Transportation Research Procedia**, [S. l.], v. 10, p. 941-950, 2015. 18th Euro Working Group on Transportation, EWGT 2015, 14-16 July 2015, Delft, The Netherlands.

WANKE, Peter F. **Gestão de Estoques na Cadeia de Suprimentos: Decisões e Modelos Quantitativos**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2011.

WANKE, Peter F. Metodologia para Gestão de Estoques de Peças de Reposição: Um Estudo de Caso em Empresa Brasileira. **Revista Tecnológica**, São Paulo, SP, ano 11, n. 121, p. 60-65, dez. 2005.

WIKANDER, M. **Modeling unit replacement associated with preventive maintenance**. 2016. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeroespacial) - School of Engineering Sciences (SCI), Mathematics (Dept.), KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2016.

WU, M.-C.; HSU, Y.-K. Design of BOM configuration for reducing spare parts logistic costs. **Expert System with Applications**, Hsin-Chu, v. 34, n. 4, p. 2417-2423, 2008