
Avaliação econômica do Programa de Manutenção de Aeronaves Comerciais por meio de escalonamento dos intervalos de inspeções

Jonas Vieira Andrade Junior¹, José Helvécio Martins², Wanyr Romero Ferreira³, Alan Kardek Rêgo Segundo⁴

1 Engenheiro Mecânico; Mestre em Engenharia e Gestão de Processos e Sistemas (IETEC)

2 Engenheiro Agrícola; Pós-Doutorado em Instrumentação e Controle de Processos - Universidade de Aveiro - Portugal (2000)

3 Doutora em Energia pela Université Paul Sabatier (Toulouse III – França - 1992)

4 Engenheiro de Controle e Automação; Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (2014)

RESUMO: O custo do ciclo de vida é o somatório de todos os custos recorrentes e não recorrentes aplicáveis a um produto, bem, serviço, estrutura ou sistema, durante toda a sua vida útil ou por um período definido de tempo. Os custos de operação das aeronaves comerciais envolvem os custos diretos e indiretos. Os custos diretos são os relacionados com tripulação, combustível, óleo, depreciação, locação (*leasing*), seguro e manutenção. Os custos indiretos são compostos de taxas de operação, serviços de cabine, emissão de passagens e administração. Os custos de manutenção, que representam cerca de 12,8% do custo do ciclo de vida de uma aeronave, estão diretamente relacionados aos atrasos e aos cancelamentos de operação das aeronaves, à otimização do programa de manutenção e modificações das aeronaves, por meio dos boletins de serviço. A maioria das decisões para as modificações e a otimização do programa de manutenção são tomadas pelo operador corrobora para cumprir os requisitos de aeronavegabilidade ou operacionais. Esse cenário pode ser melhorado se a quantificação do investimento e a economia obtida com as modificações realizadas nas aeronaves forem replanejadas, junto com a otimização do programa de manutenção. Nesse contexto, uma metodologia foi adaptada para as características operacionais brasileiras, com base na estatística, para otimizar as tarefas do programa de manutenção e analisar os custos de manutenção de aeronaves por meio do escalonamento das tarefas. Os resultados obtidos permitem concluir que existe um potencial significativo para aumento da oportunidade de receita, com a otimização do programa de manutenção das aeronaves por meio de escalonamento das inspeções.

Palavras Chave: Manutenção de aeronaves. Confiabilidade. Programa de Manutenção. Boletins de serviço. Custo em aviação.

Economical analysis of commercial Aircraft Maintenance Program by escalating inspection intervals

ABSTRACT: The cost of the life cycle is the sum of all recurring and non-recurring costs applicable to a product, service, structure or system, throughout your lifetime or for a defined period. The cost of the life cycle takes into account the costs of acquisition, installation, operation, maintenance, update and the residual value of the product, service, structure or system, at the time of transfer of the product to a third party or at the end of your life. The operating cost of commercial aircraft involve direct and indirect costs for operation. Direct costs are those related to the crew, fuel, oil, depreciation, leasing, insurance and maintenance. The indirect costs are composed of operation fees, cabin services, issuing tickets and administration. Maintenance costs make up about 12.8% of the cost of the life cycle of an aircraft. These costs directly relate to the delays and cancellations of aircraft operation, the maintenance program optimization and modification of aircraft, by the service bulletins. Most decisions taken to the modifications and maintenance program optimization is only to comply with airworthiness or operational requirements. The improvement of this scenario is possible by the quantification of investment and savings with the modifications carried out on aircraft, along with the maintenance program optimization. In this context, a methodology was adapted to Brazilian operations based on statistics in order to optimize the maintenance tasks and analyze the costs of maintenance of aircrafts through the scheduling of these tasks. The results allow concluding that there is a significant potential for increasing of revenue opportunity, with the maintenance program optimization of aircrafts by rescheduling the inspections intervals.

Key words: Aircraft maintenance. Reliability. Maintenance program. Service bulletins. Cost in aviation.

Citação: Junior, JVA. (2018) Avaliação econômica do Programa de Manutenção de Aeronaves Comerciais por meio de escalonamento dos intervalos de inspeções. *Revista Conexão Sipaer*, Vol. 9, No. 3, pp. 31-45.

1 INTRODUÇÃO

O Ciclo de Vida de um Produto (CVP) significa que todo produto irá passar por etapas definidas desde a sua produção (ou criação) até sua descontinuação. Essas etapas foram inspiradas no ciclo de vida biológico e compreendem quatro fases: (i) introdução, (ii) lançamento, (iii) maturidade e (iv) declínio (GORDON, 2011). Além disso, elas não têm duração determinada, variando de acordo com o produto.

A avaliação do ciclo de vida tem sido aplicada nos mais diversos produtos, como construção de túneis, pontes e pavimentação (BABASHAMSI et al., 2016). A utilização da análise do ciclo de vida na construção civil contribui para integração do projeto e ajuda a identificar oportunidades de eficiência de energia, como zona apropriada, luz natural e otimização do projeto de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar (TODOR; HORNET; IORDAN, 2016). No caso de manutenção de aeronaves, ainda há poucos trabalhos técnicos-científicos na literatura especializada. Nesse contexto, vislumbra-se a necessidade

de um estudo sobre esse assunto, visando obter soluções otimizadas, com aumento de retorno econômico, sem comprometer os requisitos de segurança das aeronaves.

Diante do cenário apresentado, este trabalho visa realizar uma análise técnica e econômica para avaliação de custo do ciclo de vida de aeronaves comerciais, com o objetivo de avaliar os processos disponíveis para redução do custo direto a fim de otimizar as tarefas do programa de manutenção.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 METODOLOGIA PARA OTIMIZAR AS TAREFAS DO PROGRAMA DE MANUTENÇÃO

A maioria das decisões para as modificações e a otimização do programa de manutenção corrobora para cumprir os requisitos de aeronavegabilidade ou operacionais. Esse cenário pode ser melhorado se forem quantificados o investimento e a economia realizados pelas modificações dos boletins de serviço¹, junto com a otimização do programa de manutenção (SUWONDO, 2008).

Os custos de operação das aeronaves comerciais envolvem os custos diretos e indiretos. Os custos diretos são tripulação, combustível, óleo, depreciação, leasing, seguro e manutenção. Os custos indiretos são compostos das taxas de operação, serviços de cabine, emissão de passagens e administração (SUWONDO, 2008).

Os sistemas das aeronaves degradam ao longo da operação, sendo um dos fatores que contribuem para que funcionalidades específicas do projeto diminuam com consequentemente queda da disponibilidade e operação. Geralmente, uma falha é definida como uma condição insatisfatória não prevista (CHRISTER; WALLER, 1994). As duas condições de falhas podem ser definidas como falha funcional e falha potencial. A falha funcional é definida como a incapacidade de um item ou equipamento em manter um padrão de funcionamento padrão. A falha potencial é uma identificação física que indica a iminência de uma falha funcional (SUWONDO, 2008). A diferença no tempo entre uma falha potencial e a falha funcional é chamada de tempo de atraso (*delay time*) (SMIT, 2014).

A otimização do programa de manutenção requer análise das tarefas do programa de manutenção e o custo de investimento consiste do custo de engenharia e modificações para aumento da confiabilidade (SUWONDO, 2008). Alterações dos custos de operação são resultado da otimização do programa de manutenção. Os custos de operação incluem a redução dos custos de manutenção e depreciação. As alterações dos custos de manutenção são, por causa das alterações do intervalo de manutenção, eliminação ou redução da manutenção de não rotina e manutenção não programada pela otimização do programa de manutenção e melhoria dos sistemas pelos boletins de serviço. Alterações no ganho na oportunidade de receita são explicadas pelas alterações da disponibilidade da aeronave, as quais ocorrem devido às alterações no tempo de solo durante as manutenções de rotina, não rotina e não programada (SUWONDO, 2008).

O modelo de “tempo de atraso” determina o intervalo de tempo entre a primeira indicação do defeito e a ocorrência da falha, conforme Figura 1. Pelo conhecimento da função “tempo de atraso”, um ótimo intervalo de inspeção para uma determinada tarefa poderá ser encontrado, o qual minimiza o custo total de manutenção.

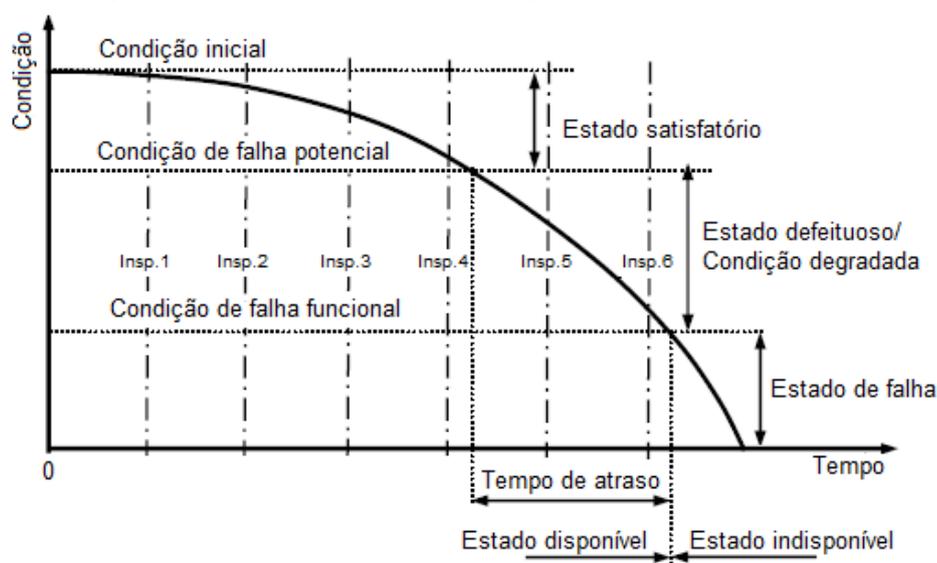


Figura 1 – Condições de falha

¹ Documento que pode ser emitido pela organização fabricante do produto aeronáutico (aeronave, motor, hélice, equipamento e componente), com o objetivo de corrigir falha ou mau funcionamento deste produto ou nele introduzir modificações e/ou aperfeiçoamentos, ou ainda visando à implantação de ação de manutenção ou manutenção preventiva aditiva àquelas previstas no programa de manutenção básico do fabricante.

Fonte: SUWONDO, 2008. (Adaptado)

Um defeito pode ser detectado quando o sistema falha (falha funcional) ou durante uma inspeção (falha potencial). Caso a soma do período de tempo entre o início do defeito (y) e o “tempo de atraso” (h) seja menor que o intervalo da inspeção, o sistema poderá falhar antes da inspeção programada. Caso a soma do período de tempo entre o início do defeito (y) e o “tempo de atraso” (h) seja maior que o intervalo da inspeção, o defeito será detectado durante a inspeção programada, conforme ilustrado na Figura 2. Como exemplo de inspeção programada, podemos citar a manutenção de linha conforme RBAC 43, a qual é a uma inspeção programada que contém serviço e/ou inspeções que não requerem treinamento especial, equipamento especial, recursos especiais ou instalações especiais e inclui checks progressivos, desde que todas as tarefas desses checks possam ser executadas seguramente no local pretendido (ANAC, 2014).



Figura 2 – Ilustração do período de tempo entre o início de defeitos e a ocorrência de falha

Fonte: SUWONDO, 2008. (Adaptado)

2.2 ANÁLISE DE CUSTO DE MANUTENÇÃO DE AERONAVES POR MEIO DO ESCALONAMENTO DAS TAREFAS

O Custo do Ciclo de Vida – Life Cycle Cost (LCC) é o somatório de todos os custos recorrentes e não recorrentes aplicáveis a um produto, bem, serviço, estrutura ou sistema, durante toda a sua vida útil ou por um período definido de tempo. O custo do ciclo de vida leva em consideração os custos de aquisição, instalação, operação, manutenção, atualização e também o valor residual do produto, bem, serviço, estrutura ou sistema, no momento de repasse do produto para um terceiro ou no final da vida útil (BLANCHARD, 1991).

O custo total consiste do investimento inicial (aquisição) e da utilização (operação e suporte). Os custos de investimento são, normalmente, divididos em pesquisa e desenvolvimento, testes, avaliação e custo de produção. O custo de utilização inclui operação, manutenção e descarte (SUWONDO, 2008).

O Custo Total de Operação – Total Operating Cost (TOC) é dividido em duas grandes categorias: o Custo Direto de Operação – Direct Operating Cost (DOC) que representa cerca de 42,4%, conforme Tabela 1, e o Custo Indireto de Operação – Indirect Operating Cost (IOC), que representa cerca de 57,6%, conforme Tabela 2.

2.2.1 Custos de atrasos e cancelamentos

Os custos de atrasos e cancelamentos geram perda de receita devido à baixa disponibilidade das aeronaves na operação (SUWONDO, 2008). O número de atrasos e cancelamentos tendem a diminuir com maior confiabilidade dos componentes ou com o uso de redundância (projeto) e pela manutenção programada bem executada (SUWONDO, 2008).

2.2.2 Otimização do programa de manutenção

A manutenção programada é, geralmente, considerada um custo visível, porque pode ser estimada antes que ocorra. Esse custo pode ser estimado pela demanda homem/hora para execução das tarefas de manutenção. Dessa forma, uma economia significativa poderá ser gerada pelo escalonamento dos intervalos do programa de manutenção. O escalonamento do programa de manutenção aumenta a disponibilidade da aeronave para operação, gerando mais receita. Entretanto, deve considerar o impacto na manutenção de não rotina (reparos) e manutenção corretiva (SUWONDO, 2008).

As equações para os cálculos da economia, proporcionada pelo escalonamento do programa de manutenção, são apresentadas a seguir. O escalonamento está atrelado às decisões de engenharia, quando em análise dos dados dos programas de acompanhamento e análise continuada, cumpridos conforme RBAC 121.373 pelas empresas RBAC 121 e RBAC 135.431 pelas empresas RBAC 135.

- Redução do número de checagem de tipo A

$$N_{rch} = t_{of} \left[\frac{t_{opa}}{t_{chA}} - \frac{t_{opa}}{t_{chA} (1 + T_{esc})} \right] \quad (1)$$

em que:

N_{rch}	=	Número de checagem reduzido, [checagem/aeronave];
t_{of}	=	Tempo efetivo de operação da aeronave (vida útil), [ano];
t_{opa}	=	Tempo de operação anual da aeronave, [h/ano];
t_{chA}	=	Intervalo de tempo para a checagem da aeronave, [h/(checagem/aeronave)];
T_{esc}	=	Percentual de aumento do intervalo de escalonamento, [adimensional].

- Economia resultante da redução do número de checagens:

$$C_{red} = N_{rch} C_{ch} \quad (2)$$

em que:

C_{red}	=	Redução de custos em função da redução do número de checagens durante a vida útil da aeronave, [US\$/aeronave];
C_{ch}	=	Custo unitário de checagem [US\$/checagem];

- Aumento da disponibilidade da aeronave

$$A_{dis} = N_{rch} t_{exchA} \quad (3)$$

em que:

A_{dis}	=	Aumento da disponibilidade da aeronave para voar, [h/aeronave].
t_{exchA}	=	Tempo de execução da checagem tipo A, [h/checagem].

- Oportunidade de receita em função do aumento da disponibilidade da aeronave

$$R_{op} = A_{dis} V_{aer} R_{pk} N_{as} T_{oc} \quad (4)$$

em que:

R_{op}	=	Oportunidade de receita, [US\$/aeronave];
V_{aer}	=	Velocidade média da aeronave por bloco [km/h];
R_{pk}	=	Receita por quilômetro, [US\$/km];
N_{as}	=	Número de assentos da aeronave, [adimensional];
T_{oc}	=	Taxa percentual de ocupação, [adimensional].

- Estimativa do aumento de receita

$$R_{au} = T_{lu} R_{op} \quad (5)$$

em que:

R_{au}	=	Aumento de receita, [US\$/aeronave];
T_{lu}	=	Percentual de lucro [adimensional].

- Estimativa da economia total por aeronave durante o período avaliado

$$R_{tau} = C_{red} + R_{au} \quad (6)$$

- Estimativa da economia anual por aeronave

$$R_{aae} = \frac{R_{\text{ta}}}{N_{\text{ano}}} \quad (7)$$

em que:

$$R_{aae} = \text{Economia anual por aeronave, } [(US\$ / \text{ano}) / \text{aeronave}];$$

$$N_{\text{ano}} = \text{Período de tempo avaliado (vida útil), } [\text{ano}].$$

2.2.3 Modificações das aeronaves

As modificações têm o objetivo de assegurar e manter a aeronavegabilidade da aeronave, melhorando a confiabilidade e, conseqüentemente, a rentabilidade da empresa aérea, com o objetivo de melhorar a qualidade dos serviços, o valor do ativo e o mercado da aeronave (SUWONDO, 2008). Os boletins de serviço são instrumentos legais para execução das modificações nas aeronaves ou através das modificações do projeto de tipo conforme RBAC 21.93. Cada pessoa mantendo, modificando, reparando ou executando manutenção preventiva deve executar esse trabalho de tal maneira e usar materiais de tal qualidade que as condições da aeronave, célula, hélice, rotor ou equipamento trabalhado fiquem pelo menos iguais às condições originais ou fiquem apropriadamente modificadas, conforme RBAC 43.13.

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado em duas etapas. A primeira descreve a metodologia para a otimização das tarefas do programa de manutenção de aeronaves. A segunda apresenta detalhes da análise dos custos operacionais de uma frota de aeronaves, com base na otimização do programa de manutenção destas.

3.1 METODOLOGIA, COM BASE NA ESTATÍSTICA, PARA OTIMIZAR AS TAREFAS DO PROGRAMA DE MANUTENÇÃO

A função de um sistema é definida como sua característica normal de operação, incluindo as ações necessárias para um sistema atingir a sua meta. A maneira como ocorre a falha do sistema, ao executar sua função, caracteriza a falha funcional, e existem normalmente três possibilidades de falhas (EMBRAER, 2017): (i) completa perda de função, (ii) intermitência da função e (iii) a função se torna ativa quando não esperada.

O efeito da falha é a consequência da falha funcional e somente um efeito é considerado, sendo avaliado normalmente o mais rigoroso em relação a segurança operacional. A causa da falha funcional é analisada por meio dos componentes e dos eventos relevantes, que podem causá-la.

O procedimento usado para determinar um programa de manutenção de sistemas e motores aeronáuticos utiliza uma lógica de dois níveis. O primeiro nível de análise requer as avaliações das falhas funcionais para determinar a categoria do efeito da falha. O segundo nível de análise determina a tarefa de manutenção apropriada, considerando o efeito da falha encontrada no primeiro nível, as causas, a aplicabilidade e a efetividade da tarefa.

A análise de primeiro nível considera as falhas funcionais e suas consequências para determinar a categoria, por meio de uma lógica SIM ou NÃO, realizada por meio de questões. A primeira questão verifica se uma falha foi evidente ou oculta. Caso a falha seja evidente, a próxima questão determina se a falha ou a perda de função pode levar a um efeito adverso na segurança da operação. Caso a falha seja evidente e não possua consequências na segurança, uma questão deve ser respondida para determinar se ela pode afetar a capacidade operacional ou se possui apenas consequências econômicas, conforme MSG-3².

No caso de falhas ocultas, outra questão determina se a falha pode levar a um efeito adverso na segurança de operação, no caso de uma falha adicional no sistema relacionado. A lógica de determinação do efeito adverso de uma falha na segurança de operação, no caso de uma falha adicional, encontra-se representada na Figura 3 (EMBRAER, 2017).

Para otimização das tarefas do programa de manutenção de sistemas e motores, as categorias das falhas do terceiro nível da lógica apresentadas na Figura 3 são levadas em consideração. Dados referentes às tarefas são coletados em campo por meio de amostras, cujo tamanho é calculado estatisticamente a partir do tamanho da frota mundial de um mesmo certificado de tipo, em função dos ciclos e das horas voadas que representam a população finita de tarefas executadas mundialmente. O nível de confiança a ser considerado é de 95%, com intervalo de confiança ou erro variando de 4% a 6%.

A estimativa do tamanho da amostra dependerá das proporções estudadas, do nível de confiança, das probabilidades de sucesso (p) ou não sucesso na execução da tarefa (q), assim como do intervalo de confiança.

² Maintenance Steering Group (MSG) é um grupo de trabalho (IWG – Industry Working Group) com participantes das diversas áreas e instituições: clientes (operadores), autoridades (FAA), projetistas, fornecedores entre outros, para estabelecer uma filosofia de manutenção. O MSG-3 se difere dos MSG-2 e MSG-1 por ser orientado no processo e não na tarefa. O processo MSG-3 tem como foco a consequência da falha.

Se a população for considerada finita de tamanho (N), o tamanho da amostra (n) pode ser determinado usando a Equação 8 e a Equação 9 (TRIOLA, 1998).

$$n = \frac{z^2 p q N}{z^2 p q + (N-1)E^2} \quad (8)$$

$$z = \frac{x - \bar{x}}{s} \quad (9)$$

em que:

n	=	Tamanho da amostra;
Z	=	Valor crítico da variável de distribuição S normal padronizada, que corresponde ao grau de confiança desejado $\left(Z = \frac{X - \bar{X}}{S} \right)$;
p	=	Probabilidade de sucesso na execução da tarefa;
q	=	Probabilidade de não sucesso na execução da tarefa ($q=1-p$);
N	=	Tamanho da população;
E	=	Erro máximo da estimativa,
X	=	Variável em estudo, com média \bar{X} e desvio padrão S ;
\bar{X}	=	Média da amostra em estudo;
S	=	Desvio padrão da amostra em estudo.

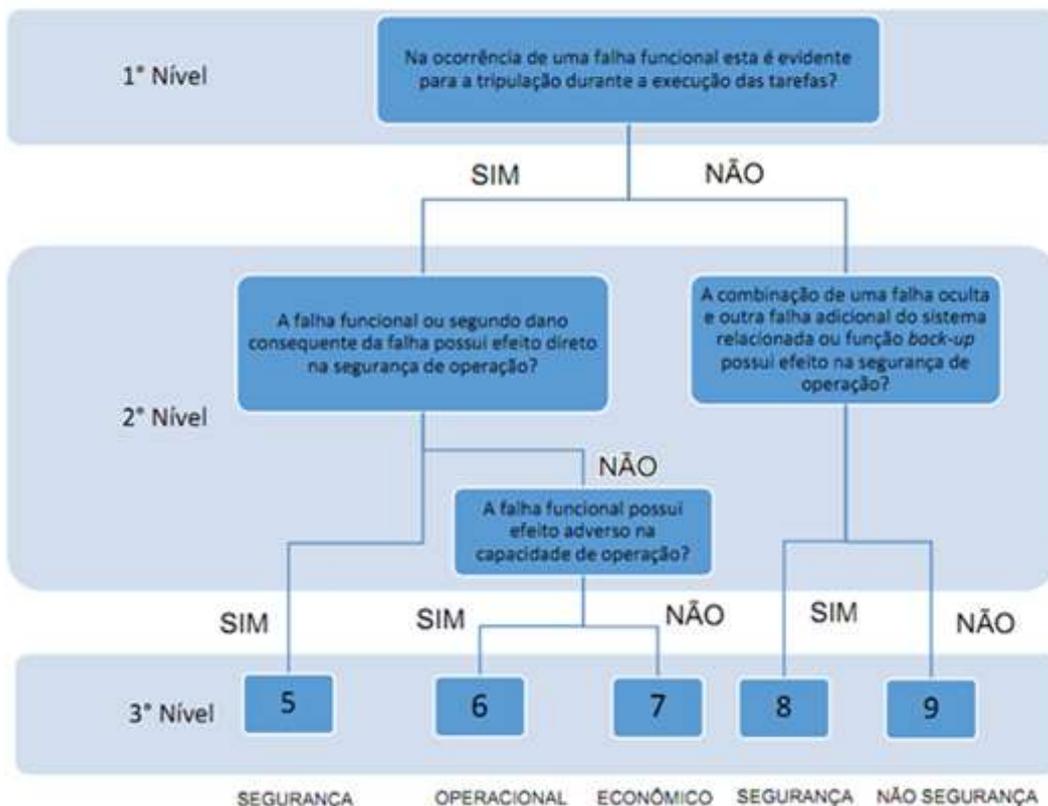


Figura 3 – Lógica de determinação do efeito adverso de uma falha na segurança de operação no caso de uma falha adicional

Fonte: EMBRAER, 2017. (Adaptado)

A análise dos dados de manutenção ocorre em dois níveis, sendo o primeiro nível para análise das tarefas programadas e seus resultados, com uma probabilidade p de sucesso depois da execução. O segundo nível de análise é, normalmente, usado quando o primeiro nível de análise não confirma o escalonamento do intervalo e/ou quando os dados de manutenção não programada distorcem os dados da manutenção programada. No Quadro 1 apresentam-se os critérios para análise dos dados de manutenção de acordo com Embraer (2017).

Quadro 1 – Definição dos critérios para análise de dados de manutenção

Categoria da Falha	Primeiro Nível de Análise	Segundo Nível de Análise	Conclusão
Sistemas: (5 e 8) E = 4%	$p \geq 90\%$	N/A	A tarefa é candidata ao escalonamento proposto.
	$p < 90\%$	Realizar análise de confiabilidade, gerando a distribuição dos dados e verificar o valor do intervalo para $p=90\%$	Completar a análise de segundo nível e limitar o intervalo para o valor de $p=90\%$.
Sistemas: (6 e 9) E = 5%	$p \geq 90\%$	N/A	A tarefa é candidata ao escalonamento proposto.
	$p < 90\%$	Realizar análise de confiabilidade, gerando a distribuição dos dados e verificar o valor do intervalo para $p=80\%$	A tarefa é candidata ao escalonamento para $p=80\%$
Sistemas: (7) E = 6%	$p \geq 90\%$	N/A	A tarefa é candidata ao escalonamento proposto.
	$p < 90\%$	Realizar análise de confiabilidade, gerando a distribuição dos dados e verificar o valor do intervalo para $p=70\%$	A tarefa é candidata ao escalonamento para $p=70\%$

Fonte: EMBRAER, 2017. (Adaptado)

3.2 ANÁLISE DOS CUSTOS COM BASE NA OTIMIZAÇÃO DO PROGRAMA DE MANUTENÇÃO

A análise de custo/benefício contempla os custos das melhorias dos sistemas, propostas pelos fabricantes, por meio de dados técnicos conforme a regra de execução geral contida no RBAC 43.13 e escalonamento dos intervalos das tarefas de manutenção. O objetivo dessa análise é explicitar o potencial de economia, devido à redução de custos, em relação à diminuição das remoções não programadas de aeronaves e ganhos com as modificações dessas aeronaves ao longo do tempo em que elas permanecem em operação.

A análise de otimização é baseada nos investimentos, nas alterações do custo de manutenção, nas alterações na oportunidade de receita e período de estudo. O teste do modelo para análise dos custos operacionais foi realizado utilizando os dados relativos aos custos da manutenção programada e não programada da aeronave selecionada para este estudo, incluindo os dados de confiabilidade dos sistemas desta aeronave. Com base no escalonamento das tarefas de manutenção e diminuição das remoções não programadas da aeronave, foi projetada a diminuição dos custos de manutenção utilizando a metodologia proposta por Suwondo (2008).

Uma análise de depreciação das aeronaves ao longo de sua vida útil é possível de ser realizada utilizando os investimentos iniciais, os custos de locação (*leasing*) e os custos de utilização, para serem analisados juntos com os valores de ganhos com escalonamento das tarefas de manutenção e modificação das aeronaves. Devido à dificuldade de quantificar o valor de redução de depreciação, normalmente devido à melhoria do produto com aplicação de boletins de serviço e, conseqüentemente, aumento da confiabilidade, no presente trabalho a redução da depreciação foi considerada igual a zero. A análise foi baseada na redução dos custos diretos de manutenção, com a análise de escalonamento das tarefas do programa de manutenção da aeronave ATR 72-600, com propulsão turboélice de fabricação francesa.

O programa de manutenção da frota ATR 72-600 é composto, basicamente, dos seguintes tipos de checagem (*checking*):

- Checagem de linha** – composta da inspeção de linha a cada dois dias do calendário e da checagem semanal a cada sete dias. As tarefas executadas são, normalmente, inspeções visuais, checagens operacionais e tarefas de serviço;
- Checagens A, 2A, 3A e 4A** – realizadas a cada 500 horas de voo. As tarefas executadas são tarefas de inspeções zonais, ou seja, por áreas da aeronave, teste de equipamento de teste incorporado ou *b.i.t.e.* (*built-in test equipment – b.i.t.e.*), checagens operacionais, lubrificação e de serviço;
- Checagens C, 2C e 4C** – realizadas a cada 5000 horas de voo. As tarefas executadas são inspeções zonais, operacionais e checagens funcionais da aeronave e sistemas do motor;
- Checagens estruturais** – programa de controle e prevenção de corrosão³ e fadiga. Os limites e intervalos são expressos em anos. O programa de controle e prevenção da corrosão possui os limites de 2, 4 e 8 anos com intervalos de 2, 4 e 8 anos.

³ O programa de controle e prevenção de corrosão tem como objetivo de controlar a corrosão e manter a aeronave resistente a corrosão, baseado nos resultados da análise de deterioração ambiental.

O programa de controle e prevenção de fadiga possui os limites de 18.000, 24.000 e 36.000 voos, com intervalos de 3.000, 6.000, 12.000, 18.000 e 24.000 voos;

- e) **Inspecões dos componentes** – estas inspecões incluem: (1) A monitoração da condição do motor (*Engine on Condition Monitoring*) com relação à sua condição e ao seu nível de degradação, para avaliar a necessidade de revisão; (2) Inspecão dos cubos e das pás das hélices a cada 10.500 horas de voo; (3) Revisão geral do trem de pouso com 20.000 pousos ou 9 anos, o que ocorrer primeiro.

Para embasar as análises de custos dos intervalos escalonados, foram utilizadas informações contidas nos gráficos apresentados na Figura 4 e na Figura 5. A análise dos custos operacionais de uma frota de aeronaves, com base na otimização do programa de manutenção destas, foi realizada com base nas equações desenvolvidas e apresentadas na sequência (Equações de 10 a 15).

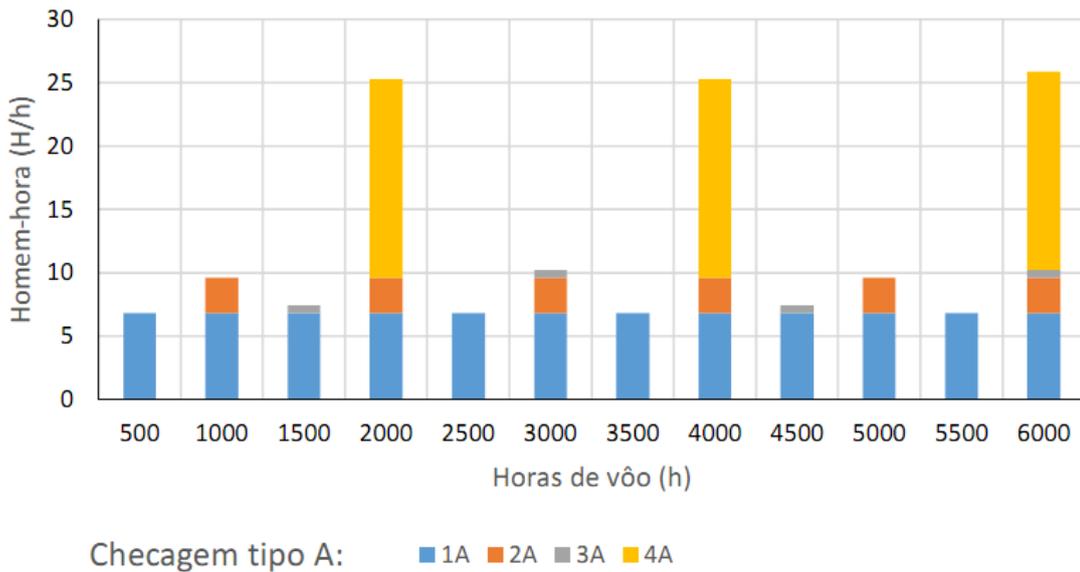


Figura 4 – Quantidade de homem/hora necessária para executar as tarefas de checagem tipo A, 2A, 3A e 4A, na frota de aeronaves ATR 72-600
 Fonte: ATR, 2013. (Adaptado)

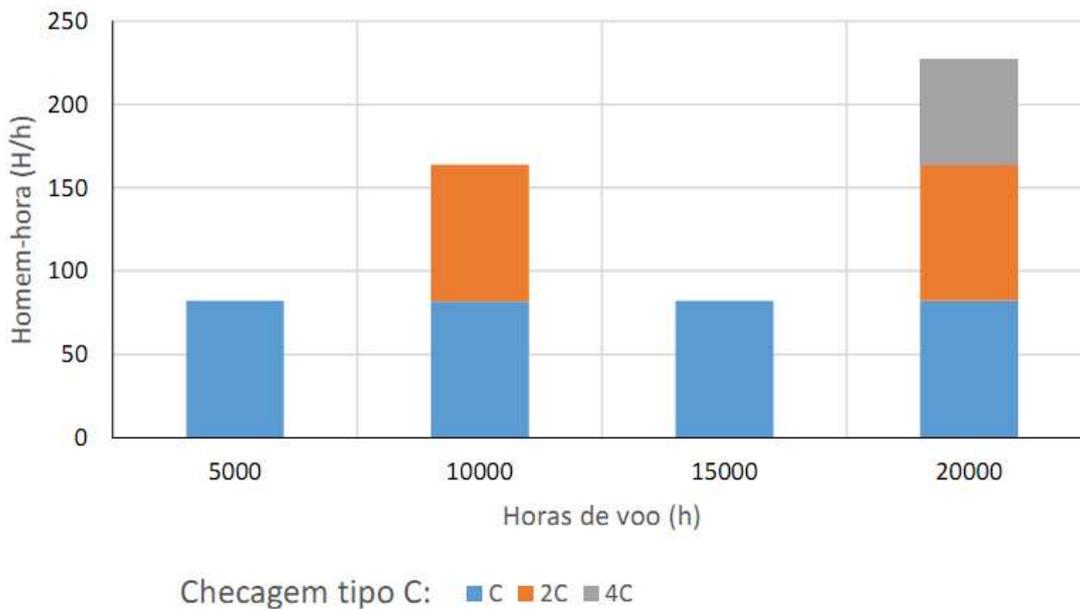


Figura 5 – Quantidade de homem/hora necessária para executar as tarefas de checagem tipo C, 2C e 4C, na frota de aeronaves ATR 72-600
 Fonte: ATR, 2013. (Adaptado)

- Receita por quilômetro de voo

$$R_{pk} = \frac{R_b}{(N_{pas})(D_{voo})} \quad (10)$$

em que:

$$\begin{aligned} R_{pk} &= \text{Receita por quilômetro de voo, [(US\$/passageiro)/km]}; \\ R_b &= \text{Receita bruta por voo, [US\$]}; \\ N_{pas} &= \text{Número de passageiros por voo, [passageiro]}; \\ D_{voo} &= \text{Distância percorrida em cada etapa de voo, [km]}. \end{aligned}$$

- Custo de mão de obra

$$C_{mo} = V_{ht} I_c m_i \quad (11)$$

em que:

$$\begin{aligned} C_{mo} &= \text{Custo de mão-de-obra, [US\$]}; \\ V_{ht} &= \text{Custo de uma hora de trabalho de um homem, [US\$/h]}; \\ I_c &= \text{Intervalo entre as inspeções em horas de voo, [h]}; \\ m_i &= \text{Índice monetário da mão de obra interna por hora de voo, [h/h]}. \end{aligned}$$

- Custo de material

$$C_{ma} = m_{ai} I_c \quad (12)$$

em que:

$$\begin{aligned} C_{ma} &= \text{Custo de material, [US\$]}; \\ m_{ai} &= \text{Índice monetário do material por hora de voo, [US\$/h]}. \end{aligned}$$

- Custo total anual

$$CT_a = C_{mo} + C_{ma} \left(\frac{B_h F_{vd} T_o}{I_c} \right) \quad (13)$$

em que:

$$\begin{aligned} CT_a &= \text{Custo total anual, [US\$]}; \\ B_h &= \text{Tempo da aeronave em voo mais o tempo de taxiamento, [h]}; \\ F_{vd} &= \text{Frequência de voos por dia, [1/dia]}; \\ T_o &= \text{Tempo de operação da frota por ano, [dia]}. \end{aligned}$$

- Tempo total anual

$$TT_a = T_s \left(\frac{B_h F_{vd} T_o}{I_c} \right) \quad (14)$$

em que:

$$TT_a = \text{Tempo total anual, [h]};$$

T_s = Tempo de permanência da aeronave em solo, [h].

- Oportunidade de receita:

$$R_{op} = \left(\frac{N_{pas} T_{xoc} \bar{D}_{voo}}{B_h} \right) (R_{pk} TT_{10}) \quad (15)$$

em que:

R_{op} = Oportunidade de receita, [US\$];
 T_{xoc} = Taxa de ocupação anual da frota, [adimensional]
 \bar{D}_{voo} = Distância média de voo em cada etapa realizada, [km];
 TT_{10} = Custo total em dez anos, [US\$].

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESCALONAMENTO DAS TAREFAS DO PROGRAMA DE MANUTENÇÃO

Seguindo a metodologia descrita na Seção 3.1, foi realizada uma simulação para análise de custo para uma frota de aeronaves ATR 72-600, com um escalonamento de 25% dos intervalos de inspeções do tipo A e do tipo C, referentes ao programa de manutenção da aeronave. As inspeções do tipo A e do tipo C foram escolhidas devido à considerável repetitividade⁴ ao longo do ciclo de vida da aeronave.

4.2 Análise dos custos com base no escalonamento do programa de manutenção

A Tabela 3 contém os dados de uma empresa aérea brasileira, utilizados na análise da otimização de custos do programa de manutenção das aeronaves. O período analisado foi igual a 10 anos de operação, com uma média de 289 dias anuais de operação da aeronave ATR 72-600. Os resultados das operações realizadas para esta aeronave no ano de 2015 encontram-se na Tabela 4.

Tabela 3 – Dados da frota de aeronaves de uma empresa brasileira utilizados nas análises realizadas neste trabalho

Descrição das características da frota de aeronaves	
Tipo e modelo da aeronave analisada	ATR 72-600
Número de aeronaves da frota	40 unidades
Distância média percorrida por etapa de voo	410 km
Tempo de permanência em cada bloco	1,38 h
Frequência de voos diários	5 voos por dia
Capacidade de lotação de ocupação da aeronave	70 passageiros
Taxa de ocupação	0,79

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 4 – Operações realizadas pela frota de aeronaves ATR 72-600 no ano de 2015

Características da operação	Unidade	Valor
Número de passageiros transportados	ud	20.177.711
Distância média voada por etapa	km	694

⁴ A repetitividade está relacionada às intervenções de manutenção, estas relacionadas às recorrências das falhas e estas baseiam-se nas curvas de confiabilidade dos itens analisados, a fim de que este escalonamento tenha efetividade. A Confiabilidade é definida, do ponto de vista da Engenharia, sendo desta a última palavra, para que fatores como de aeronavegabilidade sejam mantidos.

Receita anual	US\$	2.000.000.000
Receita por quilômetro	US\$/passageiro	0,14

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os valores de mão de obra local, convertidos para a moeda americana (dólar americano), utilizados no modelo de escalonamento, encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de mão de obra local para serviços em aeronaves ATR 72-600

Descrição	Unidade	Valor
Valor de uma hora de trabalho para serviços de manutenção	US\$/h	20
Valor de uma hora de trabalho para serviços de engenharia	US\$/h	30
Taxa de juros	1/ano	0,12

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os valores relativos ao custo de mão de obra interna e de material, relativos às inspeções, foram obtidos da fabricante da aeronave ATR 72-600, conforme constam na Tabela 6.

Tabela 6 – Custo de mão de obra interna e de material, relativo às inspeções, obtido da fabricante da aeronave ATR 72-600

Tarefas por hora de voz	Mão de obra interna (h/h)	Material (US\$/h)	Total (US\$/h)
Inspeções de linha e serviço (h serviço/h voo)	0,14	0,40	4,72
Inspeções A, 2A, 3A e 4A	0,10	11,20	14,32
Inspeções C, 2C e 4C	0,08	5,83	9,71
Inspeções estruturais	0,15	9,68	17,09

Fonte: Elaborada pelos autores.

Para o intervalo de inspeção não escalonado (atual) utilizado do programa de manutenção da aeronave do tipo/modelo ATR 72-600 igual a 500 horas de voo (500 FH) para a inspeção do tipo A e 5000 horas de voo (5000 FH) para a inspeção do tipo C, os resultados obtidos para as inspeções A, 2A, 3A, 4A, C, 2C e 4C se encontram na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados obtidos para as inspeções A, 2A, 3A, 4A, C, 2C e 4C para a aeronave ATR 72-600 com intervalo não escalonado do programa de manutenção

Manutenção de rotina	C _{mo} (US\$)	C _{ma} (US\$)	T _s (h)	I _c (h)	CT _a (US\$)	CT ₁₀ (US\$)	TT _a (h)	TT ₁₀ (h)
Inspeção A (A, 2A, 3A e 4A)	1.000	5.600	12,50	500	26.322,12	263.221,20	49,85	498,53
Inspeção C (C, 2C e 4C)	8.000	29.150	139,00	5000	N/A	148.161,63	N/A	554,36
Custos/Tempo Total						411.382,83		1.052,88

Fonte: Elaborada pelos autores.

Observa-se, com base nos resultados contidos na Tabela 7, que, utilizando os intervalos não escalonados para as inspeções de tipo A e tipo C, o custo total relativo à manutenção direta, considerando como zero o valor de manutenção de não rotina e não programada, é igual a US\$ 411.382,83. Nesse caso, a oportunidade de receita referente ao tempo total de 1.052,88 horas é igual a US\$ 2.470.639,53.

Para as inspeções do tipo A, obtém-se uma oportunidade de receita igual a US\$ 1.169.810,38, e, para as inspeções do tipo C, a oportunidade de receita é igual a US\$ 1.300.829,15.

Considerando, agora, o intervalo escalonado do programa de manutenção da aeronave ATR 72-600 em 25% dos valores atuais, o intervalo de inspeção do tipo A é aumentado de 500 horas de voo para 625 horas de voo e para a inspeção do tipo C este intervalo passa de 5000 h para 6.250 h. Os resultados obtidos para as inspeções do tipo A, 2A, 3A, 4A, C, 2C e 4C encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados obtidos para as inspeções A, 2A, 3A, 4A, C, 2C e 4C para a aeronave ATR 72-600 com intervalo escalonado do programa de manutenção

Manutenção de rotina	Cmo (US\$)	Cma (US\$)	Ts (h)	Ic (h)	CTa (US\$)	CT10 (US\$)	TTa (h)	TT10 (h)
Inspeção A (A, 2A, 3A e 4A)	1.000	5.600	12,50	625	21.057,70	210.576,96	39,88	398,82
Inspeção C (C, 2C e 4C)	8.000	29.150	139,00	6.250	N/A	118.529,30	N/A	443,49
Custos/Tempo Total						329.106,26		842,31

Fonte: Elaborada pelos autores.

Com base nos resultados contidos na Tabela 8, para intervalos escalonados do programa de manutenção, obtém-se o custo total relativo à manutenção direta igual a US\$ 329.106,26, considerando como zero o valor de manutenção de não rotina e não programada. Nesse caso, obtém-se uma oportunidade de receita, referente ao tempo total de 842,31 h, igual a US\$ 1.976.511,62.

Para as inspeções do tipo A, com o escalonamento, obtém-se uma oportunidade de receita igual a US\$ 935.848,31, e, para as inspeções do tipo C, a oportunidade de receita é igual a US\$ 1.040.663,32. Os custos para execução dessas tarefas encontram-se na Tabela 9, e os custos das modificações e do aumento no valor de revenda das aeronaves, adotando-se um procedimento conservativo, encontram-se na Tabela 10.

O valor médio da economia anual obtido com a manutenção direta, no período de 10 anos de operação, refere-se à média da diferença entre o custo total da manutenção direta considerando o intervalo de manutenção não escalonado (atual) e o escalonado, durante o período de operação considerado.

Tabela 9 – Custos com a execução de tarefas relacionadas à análise e ao desenvolvimento de técnicas de escalonamento e otimização do programa de manutenção de aeronaves

Descrição das tarefas	Custos (US\$)
Custo da coleta de dados	768.000,00
Custo da análise do problema	12.900,00
Custo de desenvolvimento	12.900,00
Custo do suporte de manutenção	19.200,00
Custo Total de Análise	813.000,00

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 10 – Custos das modificações e do aumento no valor de revenda das aeronaves, adotando-se um procedimento conservativo

Descrição dos custos	Custos (US\$)
Custo das modificações	0,00
Aumento no valor de revenda das aeronaves	0,00
Economia anual na manutenção total direta	8.227,66
Custo manutenção não programada	0,00
Redução do custo de componentes	0,00
Outras reduções anuais de custo	0,00
Economia anual com manutenção direta, para inspeção do tipo A	5.264,42
Economia com manutenção de 3 anos, 6 anos e 9 anos, para inspeção do tipo C	9.877,44
Oportunidade de receita anual, para inspeção do tipo A	23.396,21
Oportunidade de receita em 3 anos, 6 anos e 9 anos, para inspeção do tipo C	86.721,94

Fonte: Elaborada pelos autores.

O valor médio da economia com a manutenção direta, relativa às inspeções do tipo A, foi calculado pela diferença média entre o custo total das inspeções do tipo A para o intervalo não escalonado e o escalonado, no período de 10 anos.

A economia com a manutenção direta relativa às inspeções do tipo C foi calculada pela diferença média entre os custos totais das inspeções do tipo C (considerando as três categorias: C, 2C e 4C), para o intervalo não escalonado e o escalonado.

A oportunidade de receita referente às inspeções do tipo A foi calculada pela média das diferenças entre os valores de oportunidade de receita considerando os intervalos não escalonado (atual) e escalonado, no período de 10 anos.

A oportunidade de receita referente às inspeções do tipo C foi calculada pela média das diferenças entre os valores de oportunidade de receita considerando os intervalos não escalonado (atual) e escalonado, para as três categorias de inspeções (C, 2C e 4C).

A oportunidade de receita referente às inspeções do tipo C foi calculada pela média das diferenças entre os valores de oportunidade de receita considerando os intervalos não escalonado (atual) e escalonado, para as três categorias de inspeções (C, 2C e 4C).

O valor total futuro (V_f) se refere à diferença entre o investimento e a economia anuais, calculada no valor presente (V_p), para a taxa de juros considerada (j) e o período de investimento (n). O valor presente é calculado usando a equação:

$$V_p = \frac{V_f}{(1+j)^n} \quad (16)$$

O tempo de retorno do investimento para o escalonamento do programa de manutenção foi de 1,55 anos, com potencial de economia de US\$ 311.558,03 por aeronave. Portanto, para um operador com uma frota de 40 aeronaves ATR 72-600 este potencial poderá chegar a US\$ 12.462.321,25. Estes resultados encontram-se resumidos na Tabela 11.

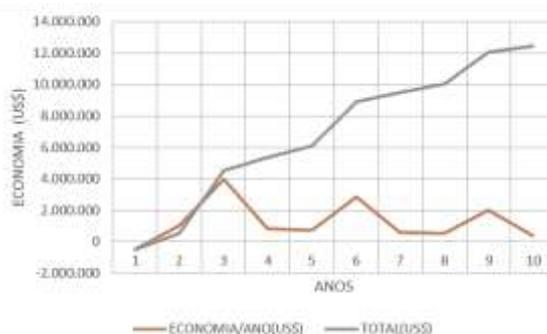
Tabela 11 – Economia com a manutenção da frota de aeronaves ATR 72-600 com o escalonamento do programa de manutenção.

Cálculo do escalonamento / Economia da frota			
Ano	Investimento (US\$)	Economia (US\$)	Total (US\$)
1	813.000,00	333.425,27	-479.574,73
2	0,00	1.146.425,27	1.023.593,99
3	0,00	5.010.400,67	3.994.260,74
4	0,00	1.146.425,27	816.002,86
5	0,00	1.146.425,27	728.573,98
6	0,00	5.010.400,67	2.843.035,90
7	0,00	1.146.425,27	580.814,72
8	0,00	1.146.425,27	518.584,57
9	0,00	5.010.400,67	2.023.616,79
10	0,00	1.146.425,27	413.412,44
Total			12.462.321,25

Fonte: Elaborada pelos autores.

A análise do custo do ciclo de vida da aeronave em estudo encontra-se representada graficamente na Figura 6. Pode-se observar, nesta figura, o potencial de economia anual e de economia total em um período de 10 anos, com o escalonamento do programa de manutenção das aeronaves.

Figura 6 – Resultado da análise do custo do ciclo de vida da aeronave ATR 72-600.



Fonte: Elaborada pelos autores.

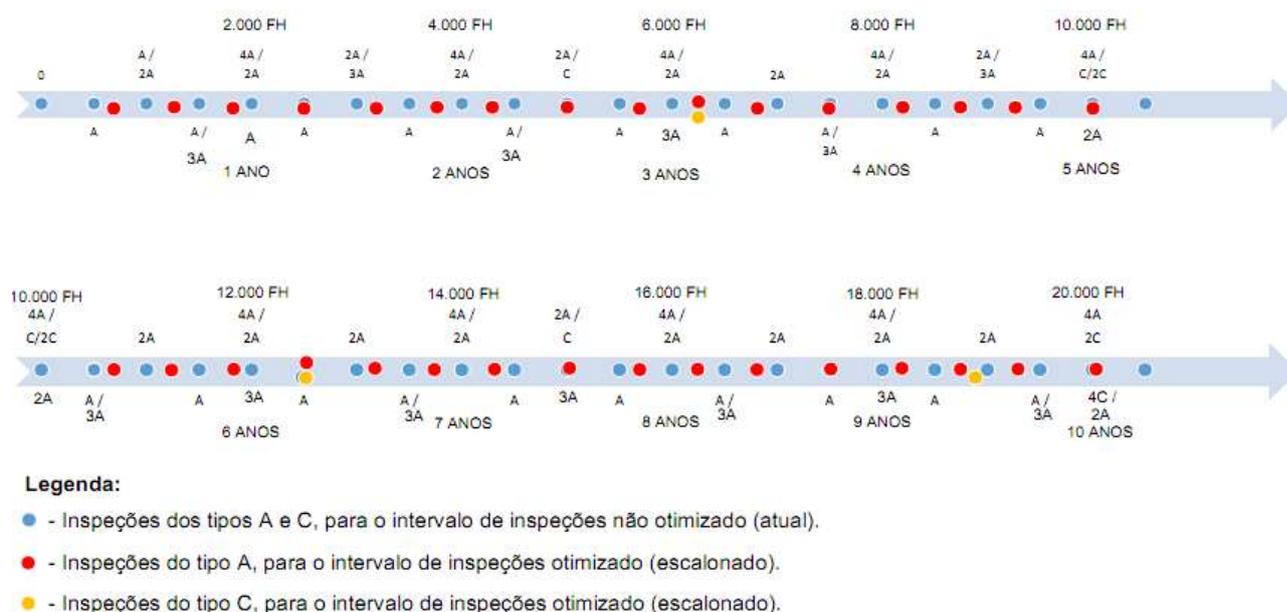


Figura 7 – Representação ilustrativa da linha do tempo das inspeções (*checks*) do tipo A e C, para o intervalo de inspeção não escalonado e escalonado

Fonte: Elaborada pelos autores.

Conforme demonstrado na Figura 7, em 10 anos de operação, com intervalo escalonado, realizam-se oito checagens do tipo A e uma checagem do tipo C a menos, o que significa um ganho no tempo de operação da aeronave ATR 72-600 de cerca de 210 horas e aumento na receita dessa aeronave.

5 CONCLUSÃO

A análise do custo de ciclo de vida é uma ferramenta importante para o gerenciamento dos custos e das tomadas de decisões, que envolvem desde o nascimento até o descarte de determinado produto. Os custos de manutenção das aeronaves representam cerca de 12,8% do custo de vida de uma aeronave e podem ser gerenciados de forma eficiente pelo escalonamento e pela otimização do programa de manutenção, com o objetivo de aumentar o período de receita de determinada aeronave durante o seu ciclo de vida, sem afetar a segurança de voo.

Os programas de manutenção das aeronaves podem ser escalonados e otimizados conforme o perfil de operação de cada operador, pois as condições, às quais os sistemas e as estruturas aeronáuticas estão expostos e que são utilizadas, são diferenciadas podendo, dessa forma, ser possível obter um ótimo intervalo de manutenção conforme o perfil de operação da aeronave.

No caso analisado de uma frota de 40 aeronaves, um escalonamento de 25% das inspeções, que possuem maior frequência de execução, forneceu uma oportunidade de receita de, aproximadamente, US\$ 12.462.321,25, durante 10 anos de operação. E esse período representa cerca de um terço da vida útil de uma aeronave. Outras ações para melhorar a receita de uma aeronave envolvem a melhoria de sua confiabilidade, por meio de boletins de serviço, e um projeto de certificação com um bom nível de redundância e confiabilidade de seus sistemas, os quais diminuem os atrasos e os cancelamentos durante a operação da aeronave, gerando maior receita.

O escalonamento das tarefas deve ser utilizado de forma a buscar um ótimo intervalo de manutenção, o qual se caracteriza pelo menor índice de paradas não programadas, gerando, dessa forma, maior período de utilização da aeronave. Outro fator para diminuição do custo de manutenção é a utilização de frota homogênea, ou seja, de apenas um fabricante, para a gestão de operações e de custos, tendo em vista as reduções dos encargos com procedimentos de pessoal, estoque de peças e treinamento de equipes de voo. A idade da frota também deve ser considerada, pois, quanto mais antiga, maior será o custo com manutenção e consumo de combustível (DIEHL, MIOTTO; SOUZA, 2010).

REFERÊNCIAS

- ATR. **Direct maintenance costs: understanding ATR DMC analysis.** Toulouse, França: ATR, 2013.
- BABASHAMSI, P.; IZZI, Y. N.; HALIL, C.; NOR, G.; HASHEM, S. J. Evaluation of pavement life cycle cost analysis. In: **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 9, p. 241-254, 2016.
- BLANCHARD, B. The Impact of Integrated Logistic Support on the Total Cost-Effectiveness of a System. **International Journal of Physical Distribution and Logistics Cost Management**, v. 5, n. 21, p. 23-26, 1991.

- CHRISTER, A. H.; WALLER, W. M. An operational research approach to planned maintenance: modelling P.M. for a Vehicle Fleet. **The Journal of the Operational Research Society**, v. 35, n. 11, p. 967-984, 1994.
- DIEHL, C. A; MIOTTO, G. R; SOUZA, M. A. Análise da tecnologia das aeronaves como determinante de custos no setor de aviação comercial brasileiro. **Revista Brasileira de Gestão de Negócios - RBGN**, São Paulo, v. 12, n. 35, p. 191-207, 2010.
- EMBRAER. **Police and procedures handbook**. rev. 8. São José dos Campos, SP: Embraer, 2017.
- GORDON, E. J. H. **Records life cycle: a cradle-to-grave metaphor**. rim fundamentals. Overland Park, KS: ARMA International, Information Management, 2011. Disponível em: <http://content.arma.org/IMM/Libraries/Sept-Oct_2011_PDFs/IMM_0911_RIM_fundamentals_records_life_cycle.sflb.ashx>. Acesso em: 10 out. 2017.
- SMIT, K. **Maintenance engineering and management**. Delft, The Netherlands: Delft Academic Press, 2014. 470 p.
- SUWONDO, E. **Life cycle costing in aircraft maintenance: life cycle cost models development and implementation**. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Muller, 2008.
- TODOR, R. D.; HORNET, M.; IORDAN, N. Implementing the Life Cycle Cost Analysis in a Building Design. **Trans. Tech. Publications**, Switzerland, v. 21, p. 581-586, 2016.
- TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC Ed., 1998. 410 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. IS 145.109-001:Disponível em: <http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/boletim-de_pessoal/2009/19s/is-145-109-001a>. Acesso em : 5 dez. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. RBAC 43:Disponível em: <http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-043-emd-01/@@display-file/arquivo_norma/RBAC43EMD01.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. RBAC 21:Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-21-emd-03>>. Acesso em: 15 dez. 2018.

....