

**FACULDADE IETEC**

Jonas Vieira de Andrade Júnior

**AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROGRAMA DE MANUTENÇÃO DE  
AERONAVES COMERCIAIS POR MEIO DE ESCALONAMENTO DOS  
INTERVALOS DE INSPEÇÕES**

Belo Horizonte  
2017

Jonas Vieira de Andrade Junior

**AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROGRAMA DE MANUTENÇÃO DE  
AERONAVES COMERCIAIS POR MEIO DE ESCALONAMENTO DOS  
INTERVALOS DE INSPEÇÕES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade IETEC, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Gestão de Processos e Sistemas.

Área de concentração: Engenharia e Gestão de Processos e Sistemas

Linha de pesquisa: Engenharia de Processos e Sistemas

Orientador: Prof. José Helvécio Martins  
Faculdade IETEC

Belo Horizonte  
Faculdade IETEC  
2017

A553a

Andrade Júnior, Jonas Vieira de.

Avaliação econômica do programa de manutenção de aeronaves comerciais por meio de escalonamento dos intervalos de inspeções / Jonas Vieira de Andrade Júnior. - Belo Horizonte, 2017.

60 f., enc.

Orientador: José Helvécio Martins.

Dissertação (mestrado) – Faculdade Ietec.

Bibliografia: f. 51-52.

1. Manutenção de aeronaves. 2. Confiabilidade. 3. Programa de manutenção. 4. Boletins de serviço. 5. Custo na aviação. I. Martins, José Helvécio. II. Faculdade Ietec. Mestrado em Engenharia e Gestão de Processos e Sistemas. III. Título.

CDU: 658.58



## DEDICATÓRIA

A Deus, por conceder-me a graça da vida e por fortalecer-me a cada manhã.

A meus pais pelo suporte, carinho e apoio durante toda a minha caminhada.

À minha família e, especialmente, ao meu primo Marcelo, pelo suporte e ajuda para transpor as barreiras da vida.

Ao meu filho Gabriel, por servir de incentivo a cada manhã, e que Deus fortaleça a sua caminhada a cada dia, com saúde e força para que tenha sucesso em todas as suas metas pela vida.

À Patrícia, que tem sido uma companheira nesta caminhada.

À minha vó Maria (*in memoriam*) e tia Lena (*in memoriam*), pela ajuda e suporte, nos momentos mais difíceis, e que Deus continue conduzindo-as pelo caminho da luz.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. José Helvécio e a Profa. Wanyr Romero pela ajuda, orientação e suporte neste projeto.

A todos os professores do IETEC, pelo apoio e dedicação durante as aulas.

Ao Centro Universitário UNA, pela ajuda financeira, sem a qual não seria possível a realização deste projeto.

A todas as pessoas e entes queridos que, diretamente ou indiretamente, colaboraram para o sucesso deste projeto.

*“No que diz respeito ao empenho,  
ao compromisso, ao esforço, à dedicação,  
não existe meio termo.  
Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.”*

*Ayrton Senna*

## 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 para operação. Os custos diretos são os relacionados com a tripulação, combustível, óleo, depreciação, locação (*leasing*), seguro e manutenção. Os custos indiretos são compostos das 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 a atrasos e 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 otimização do programa de manutenção são tomadas apenas para cumprir os requisitos de aeronavegabilidade ou operacionais. Este cenário pode ser melhorado se a quantificação do investimento e a economia obtida com as modificações realizadas nas aeronaves forem melhoradas, junto com a otimização do programa de manutenção. Neste 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 na aviação.



## **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.

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

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Condições de falha.....	18
Figura 2 - Ilustração do período de tempo entre o início de defeitos e a ocorrência de falha.....	19
Figura 3 - Lógica de determinação do efeito adverso de uma falha na segurança de operação no caso de uma falha adicional.....	29
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.....	37
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.....	37
Figura 6 - Validação do escalonamento das tarefas de sistemas em 25 % para as tarefas de checagem do tipo A e C da frota de aeronaves ATR 72-600.....	41
Figura 7 - Resultado da análise do custo do ciclo de vida da aeronave analisada.....	47
Figura 8 - Representação ilustrativa da linha do tempo das inspeções ( <i>checks</i> ) A e C do intervalo atual de manutenção e escalonado para análise de dez anos de operação.....	48

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Definição dos critérios para análise de dados de manutenção.....	31
Quadro 2 - Definição dos critérios para análise de dados do Programa de Controle e Prevenção da Corrosão.....	32
Quadro 3 - Definição dos critérios para análise de dados do escalonamento das tarefas do Novo Programa de Inspeção .....	33
Quadro 4 - Definição dos critérios para análise de dados do escalonamento das tarefas do Novo Programa de Inspeção.....	33
Quadro 5 - Critérios para o escalonamento de tarefas relacionadas a campos de alta intensidade.....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Distribuição dos custos direto de operação e do ciclo de vida .....	20
Tabela 2 -	Distribuição dos custos indiretos de operação .....	20
Tabela 3 -	Dados da frota de aeronaves de uma empresa brasileira utilizados nas análises realizadas neste trabalho.....	41
Tabela 4 -	Dados das operações realizadas pela frota de aeronaves ATR 72-600 no ano de 2015.....	42
Tabela 5 -	Valores de mão-de-obra local para serviços em aeronaves ATR 72-600 .....	42
Tabela 6 -	Custo de mão-de-obra interna e de material, relativos às inspeções, obtidos da fabricante da aeronave ATR 72-600.....	43
Tabela 7 -	Resultados obtidos para as inspeções A, 2A, 3A, 4A, C, 2C e 4C para a aeronave ATR 72-600 com intervalo não otimizado do programa de manutenção.....	43
Tabela 8 -	Resultados obtidos para as inspeções A, 2A, 3A, 4A, C, 2C e 4C para a aeronave ATR 72-600 com intervalo otimizado do programa de manutenção.....	44
Tabela 9 -	Custos com a execução de tarefas relacionadas à análise e desenvolvimento de técnicas de otimização do programa de manutenção de aeronaves.....	45
Tabela 10 -	Custos das modificações e do aumento no valor de revenda das aeronaves, adotando-se um procedimento conservativo.....	45
Tabela 11 -	Economia com a manutenção da frota de aeronaves ATR 72-600 com a otimização do programa de manutenção.....	47

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1	Objetivo geral .....	15
2.2	Obejtivos específicos.....	15
<b>3</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
3.1	Metodologia para otimizar as tarefas do programa de manutenção.....	16
3.2	Análise de custo de manutenção de aeronaves por meio do escalonamento das tarefas.....	19
3.2.1	Custos de atrasos e cancelamentos.....	21
3.2.2	Otimização do programa de manutenção.....	21
3.2.3	Exemplo de otimização do programa de manutenção.....	24
3.2.4	Modificações das aeronaves .....	26
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>28</b>
4.1	Metodologia, com base na estatística, para otimizar as tarefas do programa de manutenção .....	28
4.2	Análise dos custos com base na otimização do programa de manutenção .	34
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>40</b>
5.1	Escalonamento das tarefas do programa de manutenção .....	40
5.2	Análise dos custos com base no escalonamento do programa de manutenção.....	41
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>49</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>
	<b>APÊNDICE A - Histórico da Análise do Custo de Ciclo de Vida.....</b>	<b>53</b>
	<b>APÊNDICE B - Panorama Mundial da Análise do Custo de Ciclo de Vida.....</b>	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE C - Panorama da Análise do Ciclo de Vida no Brasil.....</b>	<b>58</b>
	<b>APÊNDICE D - Informações Complementares .....</b>	<b>59</b>

## 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, ou seja, abrange todo o período de vida útil do produto ou processo. Estas etapas foram inspiradas no ciclo de vida biológico e compreendem quatro fases: (i) introdução, (ii) lançamento, (iii) maturidade e (iv) declínio (GORDON, 2011). Estas etapas não têm duração determinada, variando de acordo com o produto.

Avaliações de ciclo de vida podem ser feitas em uma enorme variedade de produtos e processos, incluindo motores, fraldas, copos de bebida, computadores e eliminação de lixo. Para um produto típico, a análise do ciclo de vida (ACV) leva em conta o fornecimento de matérias-primas necessárias para produzir o produto, a fabricação de intermediários e, finalmente, o produto em si, incluindo a embalagem, o transporte de matérias-primas e o produto, uso do produto e a eliminação do produto depois do seu uso. Esta sequência é chamada de avaliação do "berço ao túmulo".

Existem quatro fases principais do processo de análise do ciclo de vida (ACV): (i) objetivos e escopo, (ii) inventário de ciclo de vida, (iii) avaliação de impacto do ciclo de vida e (iv) interpretação.

A etapa de escopo determina quais processos e quais as preocupações ambientais serão incluídas e que bem econômico ou social é fornecido pelos produtos ou serviços em questão, que irão resolver qualquer problema técnico e definir o público-alvo para a ACV.

O inventário fornece informações sobre todas as entradas ambientais e saídas de todas as partes do sistema do produto envolvido na avaliação do ciclo de vida. Isto envolve a modelagem do sistema de produto, coleta de dados e verificação de dados para entradas e saídas, para todas as partes do sistema. As entradas incluem: entradas de materiais, energia, produtos químicos, dentre outros. Os resultados incluem: emissões para a atmosfera, emissões para os cursos de água e resíduos sólidos.

A avaliação de impacto utiliza os dados do inventário e os convertem em indicadores para cada categoria de impacto. Uma lista típica dos indicadores de impacto inclui: (i) alterações climáticas globais, (ii) depleção do ozônio estratosférico, (iii) poluição atmosférica, (iv) acidificação, (v) eutrofização, (vi) recursos naturais (habitat, água, combustíveis fósseis, minerais, recursos biológicos), (vii) toxicidade humana e (viii) ecotoxicidade.

A última etapa é uma análise de dados de impacto, o que leva a concluir se as ambições a partir dos objetivos e do escopo podem ser atendidas.

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, trabalhos técnicos-científicos são escassos na literatura especializada. Neste contexto, vislumbra-se a necessidade de um estudo sobre este assunto, visando obter soluções otimizadas, com aumento de retorno econômico, sem comprometer os requisitos de segurança das aeronaves.

Assim este trabalho tem como objetivo a análise de uma metodologia para aumento de receita das aeronaves comerciais, adaptados para o perfil operacional brasileiro.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Realizar uma análise técnica e econômica para análise de custo do ciclo de vida de aeronaves comerciais, com o objetivo de avaliar os processos disponíveis para redução do custo direto de manutenção.

### **2.2 Obejtivos específicos**

- a) Desenvolver uma metodologia, com base na estatística, para otimizar as tarefas do programa de manutenção;
- b) Analisar os custos de manutenção de aeronaves por meio do escalonamento das tarefas.



### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção, são abordados, sucintamente, os conceitos básicos, a tecnologia disponível e a metodologia de análise do ciclo de vida relacionado à manutenção de aeronaves na aviação comercial.

#### 3.1 Metodologia para otimizar as tarefas do programa de manutenção

A maioria das decisões para as modificações e otimização do programa de manutenção é realizada apenas para cumprir os requisitos de aeronavegabilidade ou operacionais. Este cenário pode ser melhorado se for quantificado o investimento e economia realizados pelas modificações dos boletins de serviço, 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, o que leva ao não cumprimento das funções especificadas de projeto. 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).

As indicações de degradação do sistema podem ser um aumento na potência requerida ou consumo de combustível, nível de vibração, defeito mecânico, etc. 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. As tarefas analisadas no programa podem estar nas seguintes situações:

- a) sem discrepâncias durante o período de avaliação;
- b) com discrepâncias ou remoções não programadas, o que requer uma investigação técnica que pode levar a modificação do componente ou alterações das tarefas de manutenção;
- c) não pode ser escalonada por ser parte dos Itens de Limitação de Aeronavegabilidade - *Airworthiness Limitation Items (ALI)* ou da Certificação de Requerimentos de Manutenção - *Certification Maintenance Requirements (CMR)*.

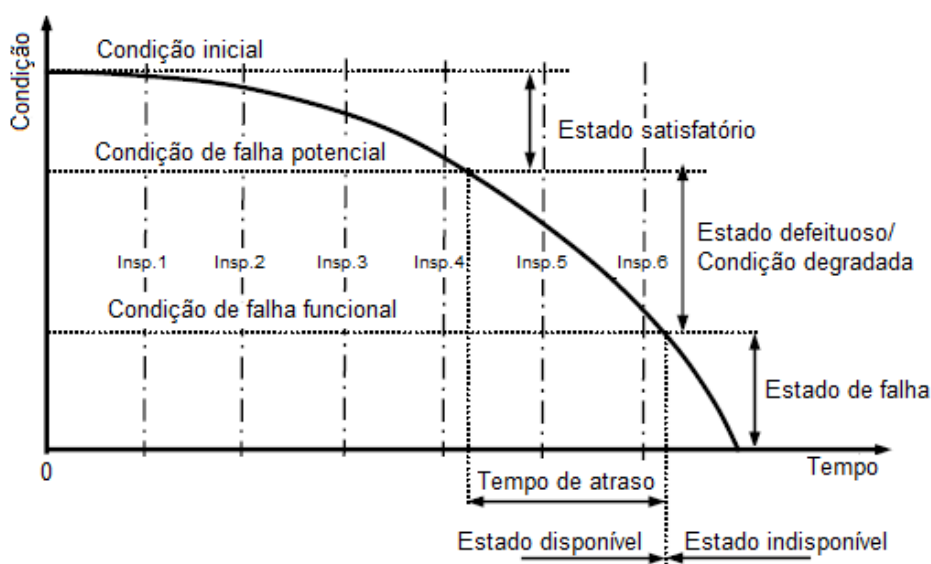
O custo de investimento consiste do custo de engenharia e modificações para aumento da confiabilidade. O custo de engenharia consiste das horas de engenharia para coleta de informações de manutenção, análise dos problemas e esforços para desenvolvimento da proposta de escalonamento e custo de mão-de-obra para suporte. Estes custos são considerados investimentos porque as atividades, muitas vezes, são subcontratadas para uma terceira parte, sob supervisão dos engenheiros da empresa aérea (SUWONDO, 2008).

Alterações dos custos de operação são resultados da otimização do programa de manutenção. Os custos de operação incluem a redução do custo de manutenção e depreciação. As alterações do custo de manutenção são, devidas às alterações do intervalo de manutenção, eliminação ou redução da manutenção de não-rotina e manutenção não programada. Os custos de suprimentos também são influenciados pelas alterações do intervalo de manutenção. A redução do custo de depreciação é devida ao aumento no valor de revenda, causado pelo baixo tempo gasto para manutenção programada.

Alterações no ganho na oportunidade de receita é devida as alterações da disponibilidade da aeronave, as quais são devidas às alterações no tempo de solo durante as manutenções de rotina, não-rotina e não programada. Como a alteração de receita depende da utilização da aeronave, a sua utilização é considerada como uma oportunidade de receita (SUWONDO, 2008).

Para os sistemas no quais as falhas geram maior custo, a inspeção é, frequentemente, usada para minimizar o custo total de manutenção, quando aplicável. O custo total de manutenção consiste do custo de inspeção, reparo das discrepâncias encontradas na manutenção de não-rotina e o custo de correção, para a manutenção não programada. 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.

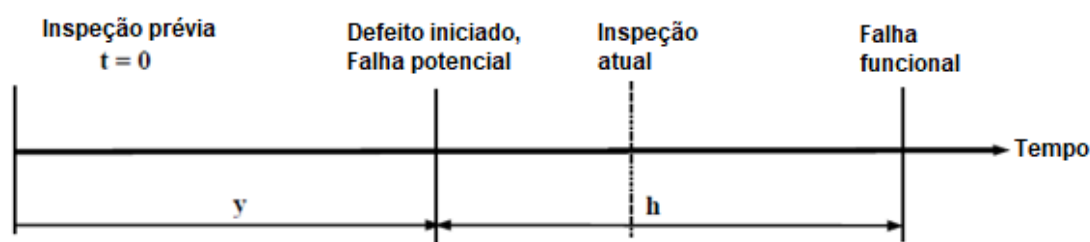
Figura 1 – Condições de falha



Fonte: SUWONDO, 2008. (Adaptado pelo autor).

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.

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



Fonte: SUWONDO, 2008. (Adaptado pelo autor).

### 3.2 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 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.

O custo direto de operação é composto pelo custo da tripulação, combustível/fluidos, depreciação/locação/seguro, e manutenção/revisão geral. O custo indireto de

operação é composto pelas taxas aeroportuárias e serviços como administração e passagens (SUWONDO, 2008).

Tabela 1 - Distribuição dos custos direto de operação e do ciclo de vida

<b>CUSTO</b>	<b>TOC (%)</b>	<b>DOC (%)</b>	<b>LCC (%)</b>
Tripulação	7,2	17,0	9,2
Combustível/fluidos	12,5	29,4	16,0
Depreciação/locação/seguro	12,7	30,0	16,3
Manutenção/revisão <i>geral</i>	10,0	23,6	12,8
<b>Total</b>	<b>42,4</b>	<b>100,0</b>	<b>54,4</b>

Fonte: SUWONDO, 2008. (Adaptado pelo autor).

Tabela 2 - Distribuição dos custos indiretos de operação

<b>CUSTO</b>	<b>IOC (%)</b>	<b>LCC (%)</b>
Taxas de pousos	5,4	6,9
Taxas em rota	4,6	5,9
Custos de estações e solo	12,0	15,4
Serviços com tripulação e passageiros	13,6	17,4
Passagens, vendas e promoções	16,4	-
Gerais e administração	5,6	-
<b>TOTAL</b>	<b>57,6</b>	<b>45,6</b>

Fonte: SUWONDO, 2008. (Adaptado pelo autor).

Para análise do custo do ciclo de vida, os custos de passagens, vendas e promoções são agrupados juntos aos custos gerais e de administração, pois são atribuídos ao operador aéreo ao invés da aeronave. Assumindo que a composição do custo de operação seja constante ao longo do ciclo de vida da aeronave, o custo de aquisição representado pelo custo de depreciação é somente cerca de 16,3% do custo ao longo do seu ciclo de vida (SUWONDO, 2008).

Esforços para redução do DOC podem ser através do consumo de combustível e fluidos, manutenção e depreciação. Redução do combustível poderá ser realizado pela redução do peso e arrasto através de modificações. A redução do custo de manutenção é conduzida pela otimização do programa de manutenção e/ou

modificações da aeronave. Enquanto a redução da depreciação poderá ser obtida pelo aumento do valor de revenda através de modificações e manutenção correta (SUWONDO, 2008).

### 3.2.1 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). Os atrasos podem ser divididos em nove categorias:

- a) chegada atrasada de outra estação;
- b) manutenção;
- c) manuseio (*handling*), incluindo os serviços a passageiros e de cabine em solo;
- d) equipamento de solo, incluindo indisponibilidade dos terminais;
- e) suprimentos;
- f) tripulação;
- g) clima;
- h) equipamento atrasado, incluindo saída atrasada da aeronave de hangar;
- i) outros, incluindo o controle de tráfego aéreo.

Dentre os fatores citados, a manutenção, o equipamento de solo e suprimentos são influenciados pelo projeto e operação (SUWONDO, 2008).

O número de atrasos e cancelamentos irá diminuir com maior confiabilidade dos componentes ou com o uso de redundância (projeto) e pela manutenção programada bem executada (SUWONDO, 2008).

### 3.2.2 Otimização do programa de manutenção

A manutenção programada é, geralmente, considerada um custo visível, porque pode ser estimada antes que ocorra. Este custo pode ser estimado pela demanda homem/hora para execução das tarefas de manutenção. Desta 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, o

escalonamento deve considerar o impacto na manutenção de não-rotina (reparos) e manutenção corretiva (SUWONDO, 2008).

As equações para os cálculos da economia, proporcionada pela otimização do programa de manutenção, são mostradas a seguir.

### Redução do número de checagem de tipo A:

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

em que:

- $N_{rch}$  = Número de checagem reduzido, [checagem / aeronave];
- $t_{oef}$  = 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

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

em que:

$A_{\text{dis}}$  = Aumento da disponibilidade da aeronave para voar, [h / aeronave];

$t_{\text{exchA}}$  = Tempo de execução da checagem tipo A, [h / checagem].

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

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

em que:

$R_{\text{op}}$  = Oportunidade de receita, [US\$ / aeronave];

$V_{\text{aer}}$  = Velocidade **média da aeronave por bloco** [km / h];

$R_{\text{pk}}$  = Receita por quilômetro, [US\$ / km];

$N_{\text{as}}$  = Número de assentos da aeronave, [adimensional];

$T_{\text{oc}}$  = Taxa percentual de ocupação, [adimensional].

### Estimativa do aumento de receita

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

em que:

$R_{\text{au}}$  = Aumento de receita, [US\$ / aeronave];

$T_{\text{lu}}$  = Percentual de lucro [adimensional].

### Estimativa da economia total por aeronave durante o período avaliado

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



### Estimativa da economia anual por aeronave

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

em que:

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

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

#### 3.2.3 Exemplo de otimização do programa de manutenção

A verificação (*check*) de tipo A de uma aeronave B747-400 deve ocorrer a cada 500 horas de voo (500 FH), baseado no documento elaborado pela Equipe de Revisão de Manutenção - *Maintenance Review Board (MRB)*. Por exemplo, se o intervalo de manutenção for escalonado em 10%, a economia obtida é calculada como a seguir (SUWONDO, 2008).

Para o cálculo da economia proporcionada pela otimização do programa de manutenção, fizeram-se as seguintes considerações:

- a) O número de horas de operação da aeronave anualmente é de 5500 horas de voo (5500 FH) ou uma média diária de 15 horas de voo (15 FH);
- b) O custo de manutenção para a verificação (*check*) de tipo A é de 45.000 dólares americanos por checagem (US\$ 45.000,00/check);
- c) O tempo de permanência da aeronave em solo para execução da verificação (*check*) de tipo A é de 55 horas;
- d) O tempo de operação (vida útil) da aeronave é cerca de 25 anos;
- e) O primeiro ano de operação é usado para experiência em serviço, portanto a avaliação é feita para os 24 anos restantes.

Considerando a verificação (*check*) de tipo A escalonada em 10%, obtém-se a redução do número de verificação (*check*) de tipo A em 24 anos:

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

$$N_{rch} = 24 \text{ ano} \left[ \frac{5500 \text{ h/ano}}{500 \text{ h/(checagem/aeronave)}} - \frac{5500 \text{ h/ano}}{(500 \text{ h/(checagem/aeronave))} (1 + 0,10)} \right]$$

$$N_{rch} = 24 \text{ checagem/aeronave}$$

A economia resultante desta redução do número de checagens em 24 anos de operação da aeronave representa a seguinte redução de custo:

$$C_{red} = N_{rch} C_{ch} = \left( 24 \frac{\text{checagem}}{\text{aeronave}} \right) \left( 45000 \frac{\text{US\$}}{\text{checagem}} \right) = \text{US\$} 1.080.000,00/\text{aeronave}$$

Aumento da disponibilidade da aeronave para voar:

$$A_{dis} = N_{rch} t_{exchA} = \left( 24 \frac{\text{checagem}}{\text{aeronave}} \right) \left( 55 \frac{\text{h}}{\text{checagem}} \right) = 1.320 \text{ h/aeronave}$$

Este aumento de disponibilidade da aeronave proporciona uma oportunidade de receita, calculada da seguinte maneira:

$$R_{op} = A_{dis} V_{aer} R_{pk} N_{as} T_{oc} = \left( 1320 \frac{\text{h}}{\text{aeronave}} \right) \left( 850 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \left( 0,13 \frac{\text{US\$}}{\text{km}} \right) (440) (0,70)$$

$$R_{op} = \text{US\$} 44.924.880,00/\text{aeronave} \approx \text{US\$} 44,92 \text{ milhões/aeronave}$$

Considerando uma margem de lucro de 6,5% (SUWONDO, 2008), o aumento de receita pode ser estimado:

$$R_{au} = T_{lu} R_{op} = (0,065) \left( 44.924.880,00 \frac{\text{US\$}}{\text{aeronave}} \right)$$

$$R_{au} = \text{US\$} 2.920.117,20/\text{aeronave} \approx \text{US\$} 2,92 \text{ milhões/aeronave}$$

Considerando a redução de custo e o aumento de receita combinados, supondo que o número de manutenções de não-rotina não irá aumentar, a economia total por aeronave no período de 24 anos avaliado pode ser estimada:

$$R_{\text{tau}} = C_{\text{red}} + R_{\text{au}} = 1.080.000,00 \frac{\text{US\$}}{\text{aeronave}} + 2.920.117,20 \frac{\text{US\$}}{\text{aeronave}}$$

$$R_{\text{tau}} = 4.000.117,20 \frac{\text{US\$}}{\text{aeronave}} \approx \text{US\$} 4 \text{ milhões/aeronave}$$

Portanto, a economia anual por aeronave é estimada em:

$$R_{\text{aae}} = \frac{R_{\text{tau}}}{N_{\text{ano}}} = \frac{4.000.117,20 (\text{US\$/aeronave})}{24 \text{ ano}} = \text{US\$} 166.671,55 / (\text{aeronave/ano})$$

$$R_{\text{aae}} \approx \text{US\$} 1,66 \text{ milhões}/(\text{aeronave/ano})$$

### 3.2.4 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. Entretanto, para qualquer solicitação de modificação, devem ser avaliados os aspectos de segurança, técnico, de operação e econômico (SUWONDO, 2008). Neste contexto, existem quatro categorias principais de modificações das aeronaves:

**Modificações mandatórias** - São aquelas oriundas de Diretrizes de Aeronavegabilidade (DA) emitidas pelas autoridades aeronáuticas e possuem ações de impacto direto na segurança das aeronaves. Elas são analisadas pelo departamento de engenharia e possuem um prazo de implementação na frota, que irá depender da criticidade de cada ação a ser implementada. As ações de correção ou mitigação são implementadas normalmente por meio dos boletins de serviço, os quais possuem as instruções de implementação das modificações, que podem ter efeito na segurança, nos casos de diretrizes de aeronavegabilidade. Meios alternativos de cumprimento das diretrizes podem ser avaliados pelas autoridades aeronáutica local.

**Modificações oriundas internamente da experiência de cada operador** – Estas modificações devem ser avaliadas quanto à viabilidade técnica, aspecto econômico e validações junto ao fabricante ou autoridade local.

**Modificações oriundas de unidades relevantes como oficinas ou engenheiros de produção** – Estas modificações serão avaliadas junto ao departamento de engenharia do fabricante.

**Modificações de aspecto econômico** – Estas modificações reduzem o custo e, conseqüentemente, aumentam a oportunidade de receita do operador.

## **4 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.

### **4.1 Metodologia, com base na estatística, para otimizar as tarefas do programa de manutenção**

A função de um sistema é definida como a 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 a sua função, caracteriza a falha funcional, e existem normalmente três possibilidades de falhas (EMBRAER, 2017):

- a) a completa perda de função;
- b) a intermitência da função;
- c) 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. A causa da falha funcional é analisada por meio dos componentes e eventos relevantes, que podem causá-la.

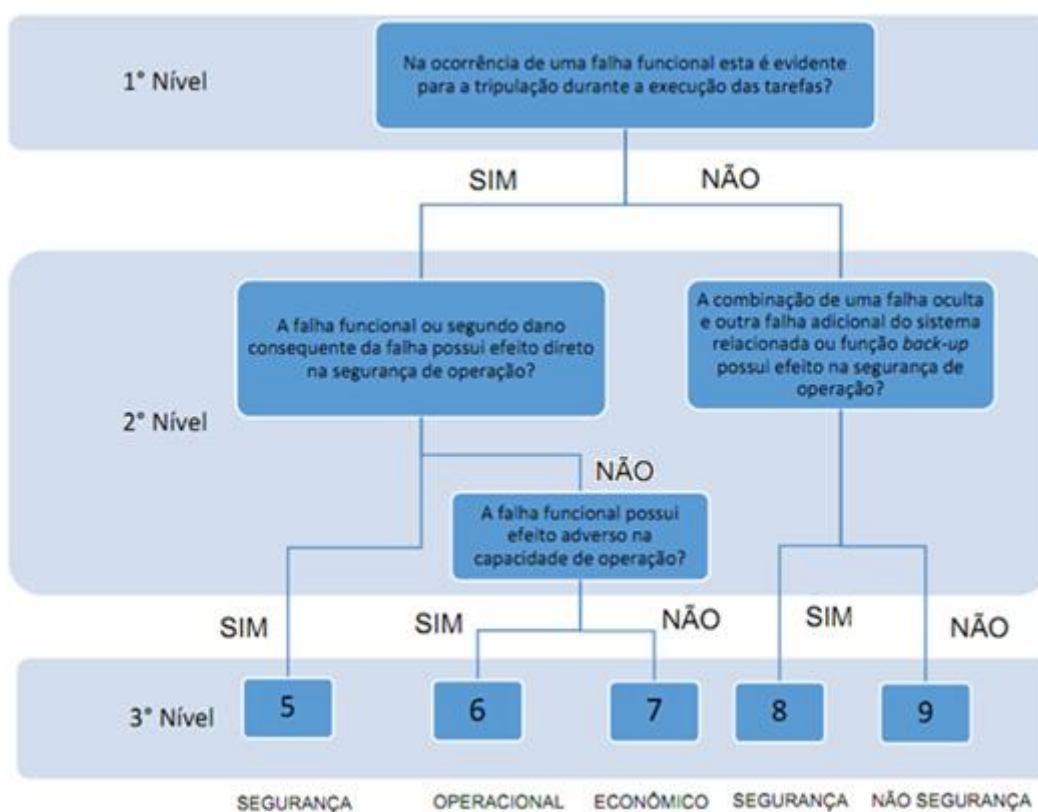
O procedimento usado para determinar um programa de manutenção de sistemas e motores aeronáuticos utiliza uma lógica de dois níveis. O primeiro nível de análise requer as avaliações das falhas funcionais para determinar a categoria do efeito da falha. O segundo nível de análise determina a tarefa de 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 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.

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. Para otimização das tarefas do programa de manutenção de sistemas e motores, as categorias das falhas do terceiro nível da lógica apresentada na Figura 3 é levada em consideração.

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



Dados referentes às tarefas são coletados em campo por meio amostragem, cujo tamanho é calculado estatisticamente a partir do tamanho da frota mundial, em função dos ciclos e horas voadas que representa 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.

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.

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. Para avaliação do escalonamento, as tarefas devem ser avaliadas se são candidatas ao Gerenciamento de Recursos Corporativos - *Corporate Resources Management (CRM)* e o valor máximo permitido pela árvore de falhas do fabricante da aeronave, que limita o escalonamento da tarefa. 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

<b>Categoria da Falha</b>	<b>Primeiro Nível de Análise</b>	<b>Segundo Nível de Análise</b>	<b>Conclusão</b>
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.

Para o escalonamento das tarefas relacionadas a estruturas da aeronave e ao Programa de Controle e Prevenção da Corrosão - *Corrosion Prevention and Control Program (CPCP)*, os critérios estão apresentados no Quadro 2. O Apêndice D contém informações complementares.



Quadro 2 – Definição dos critérios para análise de dados do Programa de Controle e Prevenção da Corrosão

Fonte	Análise	Conclusão
Estruturas/Programa de Controle e Prevenção da Corrosão  E = 5%	p ≥ 80%	A tarefa é candidata ao escalonamento conforme proposta inicial.
	p < 80%	Realizar uma análise adicional para refinar os dados analisados e garantir que os danos ou falhas encontradas tenham relação com a tarefa a ser analisada.  Depois do refinamento dos dados, a taxa de sucesso deve ser igual ou maior que 80%.

Fonte: EMBRAER, 2017.

Com o advento da interconexão dos circuitos elétricos dos sistemas e seus regulamentos de certificação, com o objetivo de reduzir o acúmulo de materiais combustíveis dentro de determinada zona da aeronave, as zonas das aeronaves foram revisadas e tarefas de inspeção foram designadas devido a este novo requerimento. Os critérios para o escalonamento destas tarefas encontram-se no Quadro 3.

O nível de relevância das tarefas é obtido usando a taxa de importância da análise zonal padrão e o potencial de fogo de acordo com a análise zonal intensificada do Programa Avançado de análise Zonal – *Enhanced Zonal Analysis Program (EZAP)*, conforme consta no Quadro 4.

Para as tarefas relacionadas a campos de alta intensidade de radiação ou iluminação, para a realização do escalonamento, estas tarefas são divididas em nível A e nível B, conforme especificados no Quadro 4. O nível A representa sistemas onde a interferência provocada por radiação ou iluminação pode causar ou contribuir para falha de função, resultando em uma condição de falha catastrófica da aeronave. O nível B representa sistemas onde a interferência provocada por radiação ou iluminação pode causar ou contribuir para falha de função resultando em uma condição de falha perigosa da aeronave.

Quadro 3 – Definição dos critérios para análise de dados do escalonamento das tarefas do Novo Programa de Inspeção

Nível de Relevância	Análise	Conclusão
Alto E = 4%	$p \geq 80\%$	A tarefa é candidata ao escalonamento conforme proposta inicial.
	$p < 80\%$	A realização de uma análise adicional profunda dos dados encontrados é requerida. Caso a taxa de sucesso de 80% ou maior seja atingida, a tarefa é candidata ao escalonamento, caso contrário, uma análise do programa zonal de manutenção será necessária.
Médio E = 5%	$p \geq 70\%$	A tarefa é candidata ao escalonamento conforme proposta inicial.
	$p < 70\%$	A realização de uma análise adicional profunda dos dados encontrados é requerida. Caso a taxa de sucesso de 80% ou maior seja atingida, a tarefa é candidata ao escalonamento, caso contrário, uma análise do programa zonal de manutenção será necessária.
Baixo E = 6%	$p \geq 60\%$	A tarefa é candidata ao escalonamento conforme proposta inicial.
	$p < 60\%$	A realização de uma análise adicional profunda dos dados encontrados é requerida. Caso a taxa de sucesso de 80% ou maior seja atingida, a tarefa é candidata ao escalonamento, caso contrário, uma análise do programa zonal de manutenção será necessária.

Fonte: EMBRAER, 2017.

Quadro 4 – Definição dos critérios para análise de dados do escalonamento das tarefas do Novo Programa de Inspeção

Importância da Análise Zonal Padrão	Programa Avançado de análise Zonal (EZAP)			
	Potencial de Fogo			N/A
	Baixa	Média	Alta	
Alta	M	A	A	M
Moderada	B	M	A	B
Baixa	B	B	M	B
Muito baixa	B	B	M	B

Fonte: EMBRAER, 2017.

Os critérios para o escalonamento das tarefas relacionadas a campos de alta intensidade causado por radiação ou iluminação encontram-se no Quadro 5.

Quadro 5 – Critérios para o escalonamento de tarefas relacionadas a campos de alta intensidade

Sistemas	Análise	Conclusão
Nível A E = 4%	$p \geq 90\%$	A tarefa é candidata ao escalonamento conforme proposta inicial.
	$p < 90\%$	Análise do programa de manutenção de campos de alta intensidade causados por radiação ou iluminação será necessária.
Nível B E = 5%	$p \geq 80\%$	A tarefa é candidata ao escalonamento conforme proposta inicial.
	$p < 80\%$	Análise do programa de manutenção de campos de alta intensidade causados por radiação ou iluminação será necessária.

Fonte: EMBRAER, 2017.

Um histórico geral da análise do ciclo de vida é apresentado no Apêndice A. Um panorama mundial da análise do custo de ciclo de vida é apresentado no Apêndice B e um panorama da análise do ciclo de vida no Brasil encontra-se no Apêndice C.

#### 4.2 Análise dos custos com base na otimização do programa de manutenção

Depois da otimização do programa de manutenção por meio do escalonamento das tarefas do programa de manutenção, a análise de custo/benefício foi realizada usando a planilha eletrônica *Microsoft Excel*.

A análise de custo/benefício contempla os custos das melhorias dos sistemas, propostas pelos fabricantes, por meio de dados técnicos e escalonamento dos intervalos das tarefas de manutenção. O objetivo desta 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 destas aeronaves ao longo do tempo em que elas permanecem em operação.

A análise de otimização é baseada nos investimentos, alterações do custo de manutenção, alterações na oportunidade de receita e período de estudo.

Para testar a validade das análises, foi elaborado um modelo matemático/algébrico programado no *Microsoft Excel*. O teste do modelo 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 projetado 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, custos de locação (*leasing*) e 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.

O custo de operação direta - *Direct Operation Cost (DOC)* é composto de investimentos relacionados a custos como estoque, ferramentas, combustível, taxas, tripulação e o custo de manutenção direta - *Direct Maintenance Cost (DMC)*. No caso de uma aeronave, o custo de manutenção é composto dos seguintes itens:

- a) **custo direto de manutenção** – custo das partes e trabalho efetivo gasto na manutenção da aeronave com todos seus componentes, conforme o programa de manutenção do fabricante da aeronave e/ou operador, aceitos pela autoridade aeronáutica local;
- b) **custo indireto de manutenção** – custo de gerenciamento, preparação, estrutura, equipamentos de manutenção, limpeza das aeronaves, seguros, logística, estoque de partes, ferramentas, dentre outros.

O modelo foi testado e validado para o escalonamento do programa de manutenção da frota de aeronaves do modelo ATR 72-600, com propulsão turbo-hélice, de fabricação francesa. A análise foi baseada na redução dos custos diretos de manutenção, com a análise de escalonamento das tarefas do programa de manutenção da aeronave.

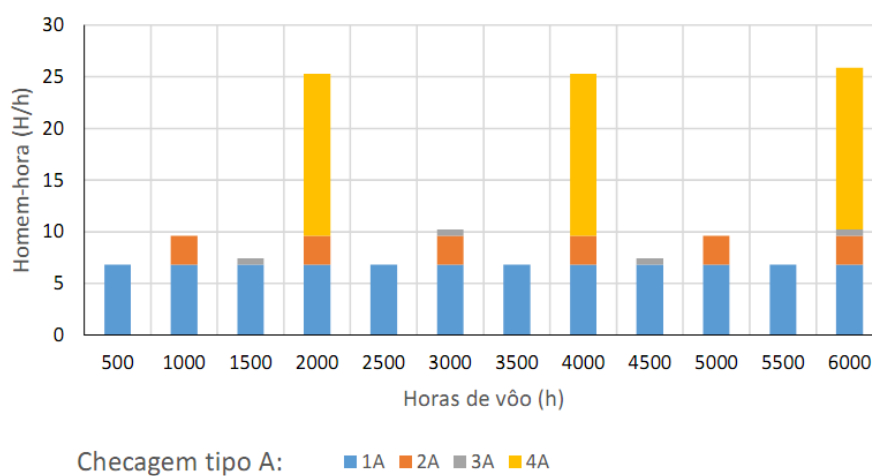
O programa de manutenção da frota ATR 72-600 é composto, basicamente, dos seguintes tipos de checagem (*checking*):

- a) **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;
- b) **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;
- c) **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;
- d) **checagens estruturais** – programa de controle e prevenção da corrosão 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. 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) **inspeções dos componentes** – estas inspeções incluem: (1) A monitoração da condição do motor – (*Engine on Condition Monitoring*) com relação à sua condição e o seu nível de degradação, para avaliar a necessidade de revisão; (2) Inspeção dos cubos e 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.

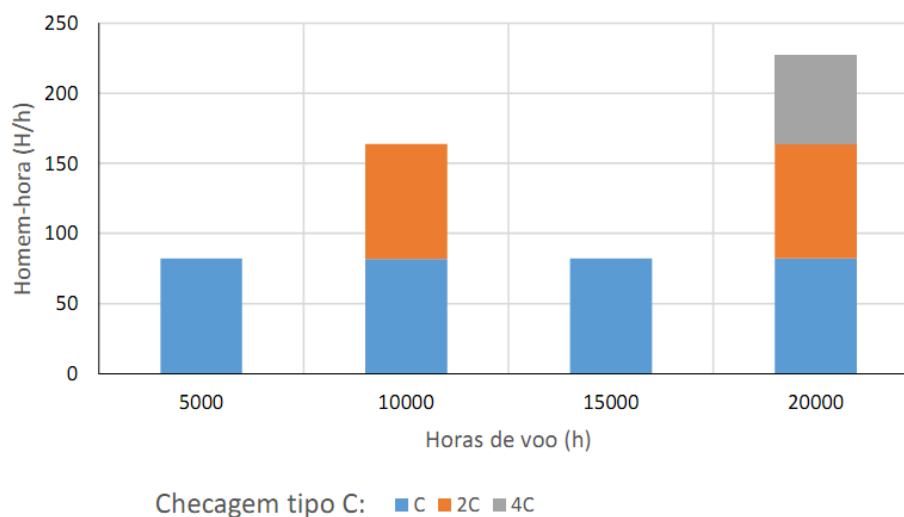
A análise dos custos operacionais de uma frota de aeronaves, com base na otimização do programa de manutenção destas, foi realizada com base nas equações desenvolvidas e apresentadas na sequência (Equações de 10 a 15).

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 pelo autor).

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 pelo autor).

*Receita por quilômetro de voo*

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

em que:

$R_{pk}$  = Receita por quilômetro de voo, [(US\$/passageiro)/km];

$R_b$  = Receita bruta por voo, [US\$];

$N_{pas}$  = Número de passageiros por voo, [passageiro];

$D_{voo}$  = Distância percorrida em cada etapa de voo, [km].

*Custo de mão-de-obra*

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

em que:

$C_{mo}$  = Custo de mão-de-obra, [US\$];

$V_{ht}$  = Custo de uma hora de trabalho de um homem, [US\$/h];

$I_c$  = Intervalo entre as inspeções em horas de voo, [h];

$m_i$  = Índice monetário da mão-de-obra interna por hora de voo, [h/h].

*Custo de material*

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

em que:

$C_{ma}$  = Custo de material, [US\$];

$m_{ai}$  = Índice monetário do material por hora de voo, [US\$/h].

*Custo total anual*

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

em que:

$CT_a$  = Custo total anual, [US\$];

$B_h$  = Tempo da aeronave em voo mais o tempo de taxiamento, [h];

$F_{vd}$  = Frequência de voos por dia, [1/dia];

$T_o$  = Tempo de operação da frota por ano, [dia].

*Tempo total anual*

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

em que:

$TT_a$  = 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\$].



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Escalonamento das tarefas do programa de manutenção

Seguindo a metodologia descrita na Seção 4.1, 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 repetitividade de execução destas, ao longo do ciclo de vida da aeronave.

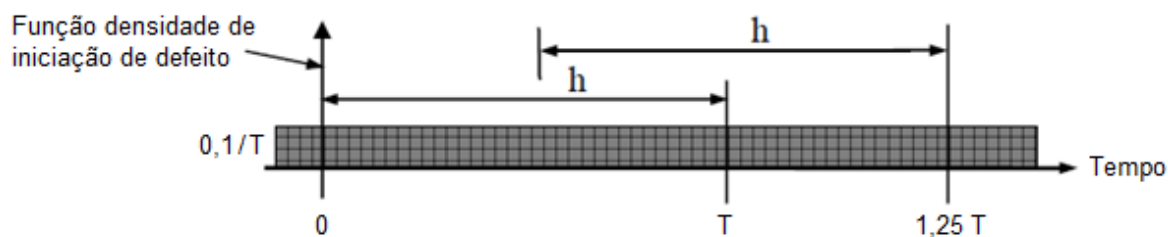
Para análise do tempo de permanência da aeronave em solo para execução das tarefas, as inspeções dos tipos A e C foram equalizadas, de forma a equilibrar o tempo de parada das aeronaves, evitando longos períodos de execução nas inspeções maiores.

Para a análise do escalonamento das tarefas de sistemas em 25%, uma probabilidade de sucesso de 90 % ( $p = 0,9$ ) foi considerada, conforme metodologia definida para as tarefas de sistemas para validação do escalonamento. Isto significa que a razão entre número de discrepâncias encontradas e número de inspeções seja igual a 10 % do atual intervalo do programa de manutenção. Para um escalonamento de 25 % do intervalo de inspeção ( $T$ ), tem-se uma probabilidade de sucesso ( $p$ ) de detecção de falha de 80 % durante o intervalo igual a  $1,25 T$  e uma probabilidade de não sucesso ( $q$ ), ou de manutenção não programada, igual a 20 %, conforme calculado a seguir, e ilustrado na Figura 6.

$$p = \frac{T}{1,25T} = \frac{1,00}{1,25} = 0,80 \text{ ou } 80\%$$

$$q = \frac{(1,25T - T)}{1,25T} = \frac{0,25}{1,25} = 0,20 \text{ ou } 20\%$$

Figura 6 – Análise do escalonamento das tarefas de sistemas em 25 % para as tarefas de checagem do tipo A e C da frota de aeronaves ATR 72-600



Fonte: SUWONDO, 2008. (Adaptado pelo autor).

## 5.2 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 diário	5 voos por dia
Capacidade de lotação de ocupação da aeronave	70 passageiros
Taxa de ocupação	0,79

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Tabela 4 – Dados das operações realizadas pela frota de aeronaves ATR 72-600 no ano de 2015

<b>Características da operação</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Número de passageiros transportados	---	20.177.711
Distância média voada por etapa	km	694
Receita anual	US\$	2.000.000.000
Receita por quilômetro	US\$/passageiro	0,14

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

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

<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
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: Elaborado pelo autor, 2017.

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.

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 encontram-se na Tabela 7.

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

Tarefas por hora de voo	Mão de obra interna (h/h)	Material (US\$/h)	Total (US\$/h)
Inspeções de linha e serviço	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: Elaborado pelo autor, 2017.

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 <sub>mo</sub> (US\$)	C <sub>ma</sub> (US\$)	T <sub>s</sub> (h)	I <sub>c</sub> (h)	CT <sub>a</sub> (US\$)	CT <sub>10</sub> (US\$)	TT <sub>a</sub> (h)	TT <sub>10</sub> (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
<b>Custos/Tempo Total</b>						<b>411.382,83</b>		<b>1.052,88</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

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. Neste 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 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	C <sub>mo</sub> (US\$)	C <sub>ma</sub> (US\$)	T <sub>s</sub> (h)	I <sub>c</sub> (h)	CT <sub>a</sub> (US\$)	CT <sub>10</sub> (US\$)	TT <sub>a</sub> (h)	TT <sub>10</sub> (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
<b>Custos/Tempo Total</b>						<b>329.106,26</b>		<b>842,31</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Com base nos resultados contidos na Tabela 8, para a 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. Neste 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 US\$ 935.848,31, e para as inspeções do tipo C a oportunidade de receita é igual a US\$ 1.040.663,32.

Para estimar o custo total de análise do problema em pauta e desenvolvimento de um modelo de aplicação com base nos custos da mão-de-obra de engenharia e de manutenção requeridos para coleta de dados foi considerado um tempo necessário para coleta de dados de 960 h, um tempo para análise do problema de 430 h, um tempo para desenvolvimento de aplicativo de 430 h e um tempo para suporte de manutenção de 960 h. Os custos para execução destas tarefas encontram-se na Tabela 9.

O custo das modificações, baseadas nos boletins de serviço, e do aumento no valor de revenda das aeronaves, foi considerado nulo, devido às limitações para quantificar estes valores monetariamente. Além disto, adotou-se um procedimento conservativo

em relação aos valores de custo de manutenção não programada, redução do custo dos componentes e outras reduções anuais que possam ocorrer, devido à limitação do projeto para ter acesso a estes dados.

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

<b>Descrição das tarefas</b>	<b>Custos (US\$)</b>
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
<b>Custo Total de Análise</b>	<b>813.000,00</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Os resultados dos custos das modificações e do aumento no valor de revenda das aeronaves, adotando-se um procedimento conservativo, encontram-se na Tabela 10.

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

<b>Descrição dos custos</b>	<b>Custos (US\$)</b>
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: Elaborado pelo autor, 2017.

O valor médio da economia anual obtida com a manutenção direta, no período de 10 anos de operação, se refere 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.

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).

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.

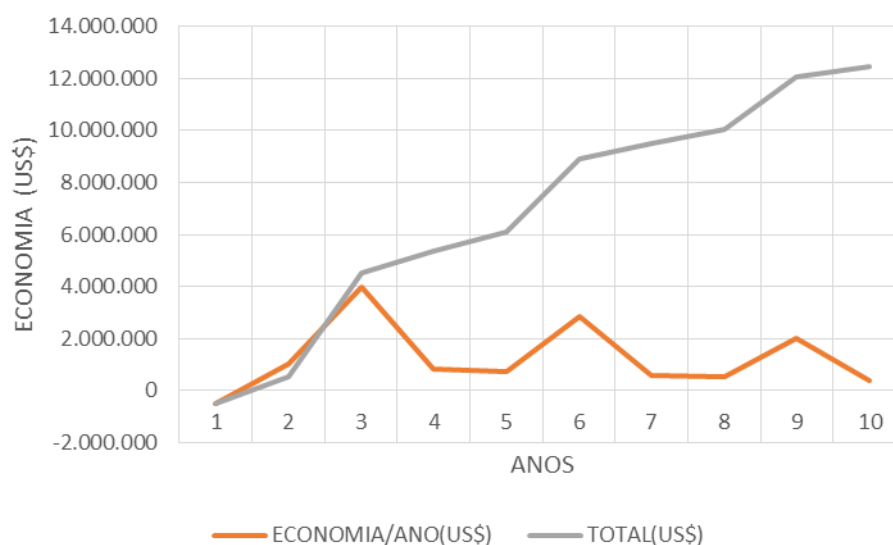
A análise do custo do ciclo de vida da aeronave em estudo encontra-se representada graficamente na Figura 7. Pode-se observar, nesta figura, o potencial de economia anual e de economia total em um período de 10 anos, com o escalonamento do programa de manutenção das aeronaves.

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
<b>Total</b>			<b>12.462.321,25</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 7 – Resultado da análise do custo do ciclo de vida da aeronave ATR 72-600



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.



Com base nos resultados obtidos, foi elaborada uma representação ilustrativa da linha do tempo para as inspeções do tipo A e do tipo C, considerando o intervalo de inspeção não escalonado (atual) e o escalonado para uma análise do programa de manutenção em um período de 10 anos de operação, mostrada na Figura 8.

Figura 8 – Representação ilustrativa da linha do tempo das inspeções (checks) do tipo A e C, para o intervalo de inspeção não escalonado e escalonado



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Conforme demonstrado na Figura 8, 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 desta aeronave.

## 6 CONCLUSÕES

A análise do custo de ciclo de vida é uma ferramenta importante para o gerenciamento dos custos e 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 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 estruturas aeronáuticas estão expostos, e que são utilizadas são diferenciadas podendo, desta 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 este 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 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, desta 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, conforme Diehl, Miotto e Souza (2010).

Sugere-se para estudos futuros, o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para análise do programa de manutenção e gestão estratégica operacional de aeronaves de forma global, com o objetivo de melhorar a confiabilidade da análise aqui proposta, utilizando análise por meio de dinâmica de sistemas, possibilitando a realização de simulações para obtenção de resultados otimizados.

## 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: **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.

DHILLON, B. S. **Life Cycling Costing Techniques, Models and Applications.** New York: Gordon and Breach and Science, 2009.

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](http://content.arma.org/IMM/Libraries/Sept-Oct_2011_PDFs/IMM_0911_RIM_fundamentals_records_life_cycle.sflb.ashx). Acesso em: 10 out. 2017.

KARI, E. **The relationship between life-cycle costing and performance: an exploratory analysis.** 2005. 89 f. Thesis (Master of Science) - Faculty of the Graduate School, Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, 2005.

RIECHI, J. L.; TORMOS, B.; HILLEBRAND, M. V. J. Otimização dos custos de frota urbana com uso de modelo combinado de life cycle cost e simulação de Monte Carlo. **Revista Produção Online**, Florianópolis, SC, v.17, n. 2, p. 667-691, 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. 410p.

## APÊNDICE A - Histórico da Análise do Custo de Ciclo de Vida

Em 1971 o departamento de defesa americano emitiu a diretiva 5000.1, que serviria de guia para as aquisições dos sistemas maiores de defesa. Esta diretiva estabelecia os requerimentos de custo do ciclo de vida, para as aquisições dos sistemas de defesa americano (DHILLON, 2009).

Em 1974, o estado da Florida adotou formalmente o custo do ciclo de vida e, em 1978, o congresso dos Estados Unidos estabeleceu a política nacional de conservação de energia, a qual estabelecia que todos os custos do ciclo de vida das novas construções federais fossem avaliados (DHILLON, 2009).

Em 1991, a aplicação do custo do ciclo de vida tornou-se mandatório para a construção de túneis, pontes e pavimentação pela lei americana *Intermodal Surface Transportation Efficiency Act*. O departamento de transporte americano, representado pelo *Federal Highway Administration*, tem estimulado os departamentos de transporte dos estados americanos a realizar uma análise do custo do ciclo de vida para todos os projetos de pavimento com custo acima de US\$ 25 milhões (BABASHAMSI *et al.*, 2016).

E desde então, muitos estados americanos têm adotado como obrigatório a análise do custo do ciclo de vida para planejamento, projetos e construções. Com o passar dos anos, muitos outros eventos têm sido desenvolvidos relacionados ao custo do ciclo de vida (DHILLON, 2009).

O departamento de defesa americano, no cenário pós-guerra do Iraque, sofreu uma pressão para controlar os seus custos e, para isto, o governo tem adotado a metodologia de análise do custo do ciclo de vida para seus projetos (KARI, 2005).

A análise do custo do ciclo de vida é uma ferramenta gerencial, a qual detalha os custos totais de determinado projeto, durante todo o seu ciclo de vida. O custo de um investimento, quando somente é analisado o projeto e a sua construção, leva a desprezar os custos de operação, manutenção e descarte dos materiais (BLANCHARD, 1991).

Para realizar a modelagem matemática de um sistema, os custos devem estar discriminados em um nível que possam fornecer um gerenciamento do cenário para a avaliação das diversas etapas como projeto, desenvolvimento, produção, operação e suporte (BLANCHARD, 1991).

Atualmente vários jornais, conferências, livros e artigos têm utilizado o tema do custo do ciclo de vida em diversas áreas do desenvolvimento. Dentre estas fontes, citam-se as seguintes:

Periódicos:

- a) International Journal of Production Research.
- b) Microelectronics and reliability.
- c) IEEE Transactions on Reliability.
- d) Defense Management Journal.

Conferências:

- a) Annual Reliability and Maintainability Symposium, USA.
- b) Annual International Reliability, Availability, and Maintainability (Inter-RAM) Conference for Electric Power Industry.
- c) Annual American Society for Quality Control (ASQC) conference

## APÊNDICE B - Panorama Mundial da Análise do Custo de Ciclo de Vida

A análise do custo do ciclo de vida tem sido adotada desde 1974 pelos Estados Unidos da América para planejamento, projetos e construções (DHILLON, 2009). A Europa tem desenvolvido modelos para análise de ciclo de vida para pavimentações de rodovias, desde 1997, na Finlândia, Alemanha, França, Dinamarca, Suíça e Inglaterra, por meio do projeto PAV-ECO – *Economic Evaluation of Pavement Maintenance* (BABASHAMSI *et al.*, 2016). Em alguns outros países, como Romênia, a análise do custo do ciclo de vida é pouco conhecida ou utilizada (TODOR; HORNET; IORDAN, 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 do ar (TODOR; HORNET; IORDAN, 2016).

No caso da Romênia, os projetos atualmente são conduzidos em etapas. Os arquitetos elaboram o projeto, que é transferido aos projetistas para o cálculo estrutural, e as instalações são executadas ao final. Este tipo de processo, na maioria dos casos, não permite a implementação de soluções ótimas, especialmente em termos de instalações e de consumo de energia, o que no final, compromete as opções de otimização, junto aos engenheiros (TODOR; HORNET; IORDAN, 2016).

A Comissão Europeia pretende desenvolver uma metodologia comum para o custo do ciclo de vida na construção civil. O objetivo principal deste processo é de examinar as possíveis maneiras de aumentar a competitividade do setor de construção, com ênfase na necessidade de implementação do custo do ciclo de vida em todas as etapas da construção e planejamento (TODOR; HORNET; IORDAN, 2016).

Os maiores problemas que podem ocorrer com o processo convencional de projeto é o limitado uso de vantagens potenciais, o não uso de luz natural, exposição a altas cargas térmicas no verão e pequenas no inverno, e ultimamente tudo isto conduz a altos custos durante a fase operacional. Neste contexto, os principais objetivos do processo integrado no projeto da construção são:



- a) Acessibilidade: Características relacionadas ao acesso de pessoas com deficiências ou mobilidade reduzida.
- b) Funcionalidade: Requisitos de espaço e necessidades funcionais, desempenho de sistemas, durabilidade e eficiência de manutenção.
- c) Eficiência financeira: Seleção do custo do ciclo de vida, custo estimado e controle de orçamento.
- d) Produtividade: Assegurar o conforto do ocupante, como ventilação, iluminação, sistemas e tecnologias.
- e) Sustentabilidade: Assegurar a manutenção do meio ambiente.

O ciclo de vida da construção se refere à toda sua vida, não se limitando à operação, mas levando em consideração o projeto, construção, operação, demolição e descarte. É benéfico quando já se antecipa a melhora das características operacionais da construção, as quais são relacionadas com os aspectos de como a construção foi projetada, por exemplo, a conservação de energia (TODOR; HORNET; IORDAN, 2016).

Na maioria dos casos, o esforço na fase de projeto para uso eficiente de energia é insuficiente, levando a altas cargas de energia durante a operação e o custo para remediação, na maioria das vezes, é extremamente alto e virtualmente irrecuperável no tempo (TODOR; HORNET; IORDAN, 2016). De acordo com estes aspectos, as fases principais para o ciclo de vida na construção são:

- a) Manufatura dos materiais da construção: exploração dos materiais junto ao solo, transporte, processamento, manufatura final, embalagem e distribuição. Todas estas etapas consomem energia e geram custos.
- b) Edificação: representa todas as atividades relacionadas à implementação do projeto.
- c) Operação e manutenção: Energia consumida pela utilização do edifício, água consumida, lixo, montagens, reparos de sistemas e substituições, transporte de equipamento.
- d) Demolição: Refere à energia produzida pela demolição e energia necessária para o transporte do descarte e operações de reciclagem.

A parte mais complexa da análise de custo do ciclo de vida é determinar os efeitos do projeto e quantificar estes efeitos monetariamente (TODOR; HORNET; IORDAN, 2016).

Para análise do custo do ciclo de vida de edificações deve-se levar em consideração as seguintes etapas:

- a) Estabelecer objetivos claros de análise.
- b) Determinar o critério exato para avaliação das alternativas.
- c) Identificar e desenvolver as alternativas de projeto. As alternativas devem ser desenvolvidas em um nível de detalhamento suficiente de forma a levar a uma estimativa precisa e assertiva do custo e benefício.
- d) Coletar as informações relacionadas a custo, que podem ser adquiridas de várias fontes, como consultores, peritos, empreiteiros, varejistas, projetistas, especialistas em demolição, etc.
- e) Desenvolver a análise do custo do ciclo de vida para todas as alternativas. Realizar cálculos dos custos totais e escolher as alternativas com menor custo.

O Departamento de Transporte Americano, representado pela *Federal Highway Administration*, realiza sua análise usando modelos matemáticos envolvendo a relação custo-eficiência dos projetos de restauração dos pavimentos das estradas. O modelo avalia a condição do pavimento, manutenção adequada e restauração, analisando os custos e benefícios por meio das aproximações calculadas. O menor custo do ciclo de vida não significa o ideal, desde que existam outros fatores que devem ser considerados, como orçamento, risco, política e meio ambiente (BABASHAMSI *et al.*, 2016).

As autoridades americanas têm sido solicitadas para focar na diminuição dos custos e melhorar a eficiência, haja vista que os custos de manutenção constituem uma grande parte dos gastos em infraestrutura das rodovias anualmente. As autoridades de infraestrutura rodoviária, em nível mundial, somente podem absorver novos projetos de rodovias e manter adequadamente as atuais com a diminuição dos custos e melhorando a eficiência, para que os gastos com infraestrutura rodoviária diminuam continuamente (BABASHAMSI *et al.*, 2016).

## **APÊNDICE C - Panorama da Análise do Ciclo de Vida no Brasil**

No Brasil, a análise do ciclo de vida não é comumente utilizada para os processos de construções de edifícios, estradas ou projetos em geral. Alguns estudos existem relacionados à análise de custo para alguns projetos, como evaporadores para usinas de açúcar no Brasil, no qual uma avaliação ambiental e financeira dos materiais dos tubos foi realizada. Para avaliação ambiental, foi utilizada a avaliação do ciclo de vida, que mostrou que os aços inoxidáveis são ambientalmente mais eficientes (RIECHI; TORMOS; HILDEBRAND, 2010).

Como é extensa a aplicação da análise do custo do ciclo de vida em vários setores do conhecimento e produção, sendo o Brasil um país em expansão, existe um grande potencial de desenvolvimento e pesquisa com base na análise do ciclo de vida em todos os segmentos da produção, com o objetivo na melhoria dos projetos.

## APÊNDICE D - Informações Complementares

A otimização de tarefas do programa de manutenção pode ser realizada pelo fabricante da aeronave em conjunto com operadores, autoridades aeronáuticas e seus representantes, por meio de inspeção visual geral. Uma tarefa de inspeção visual geral (GVI) dos compartimentos da carga da aeronave. A Inspeção Visual Geral (*General Visual Inspection - GVI*) é um exame visual do interior de determinada área, instalação ou conjunto, para detectar um dano óbvio, falha ou irregularidade (EMBRAER, 2017). A falha ou mau funcionamento deste compartimento durante a operação não é evidente para a tripulação, sendo esta falha considerada oculta e possui efeito adverso na segurança de operação, sendo classificada como categoria 8, conforme ilustrado na Figura 2, página 19, desta dissertação.

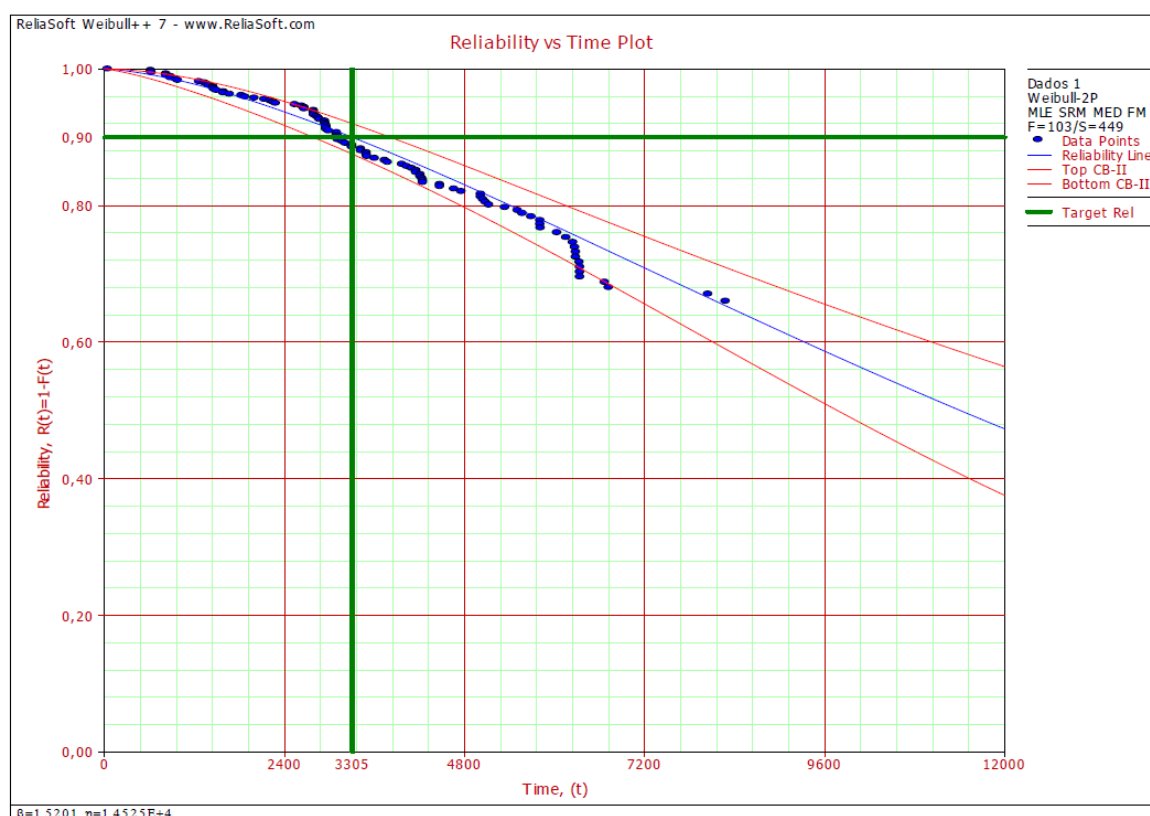
No caso avaliado neste trabalho foi proposto, inicialmente, um escalonamento em cerca de 10% das 3000 horas de voos iniciais do intervalo de inspeção, o que representa cerca de 300 horas de voo. Para tarefas de categoria 8, o intervalo de confiança é de 4% e a taxa de sucesso das amostras analisadas devem ser maiores que 90% para o primeiro e segundo níveis de análise, conforme Quadro 1, página 31. Para a tarefa em questão, o espaço amostral é representado por cerca de 943 tarefas executadas mundialmente durante um período de cerca de seis anos de operação da aeronave, conforme informação do fabricante. Para validação do escalonamento desta tarefa, uma amostra de 176 tarefas para análise dos resultados é necessária (ver Equação 8).

Ao todo, foram coletados dados de 570 tarefas executadas de 16 operadores mundiais com uma taxa de sucesso de 90,2% (9,8% de não sucesso ou falha encontrada). Com uma taxa de sucesso acima de 90% já seria o suficiente para a tarefa ser passível de escalonamento. Um segundo nível de análise foi realizado, utilizando a confiabilidade dos resultados usando uma distribuição de Weibull, para uma probabilidade de sucesso de 90%, conforme mostrado na Figura D1.

Conforme pode ser observado na Figura D1, para uma taxa de sucesso de 90%, um intervalo de 3305 horas de voo é o considerado o intervalo otimizado, melhorando a

análise de primeiro nível e a proposta inicial de escalonamento de 10% do intervalo da inspeção.

Figura D1 – Análise de segundo nível de falha utilizando a confiabilidade dos resultados por meio da distribuição de Weibull, para uma probabilidade de sucesso de 90%



Fonte: EMBRAER, 2017.