

ESTUDO DE CONFIABILIDADE DO COMPONENTE *COOLING TURBINE* DO VC-97 BRASÍLIA

RELIABILITY STUDY OF THE COMPONENT *COOLING TURBINE* OF THE VC-97 BRASILIA

Leonardo Abreu dos Santos¹
Leila Scanfone²
Luciana Mesquita Monteiro³

RESUMO

Este trabalho aborda a questão da confiabilidade da *Cooling Turbine* da aeronave VC-97 Brasília. Tal abordagem se faz necessária devido ao impacto logístico causado pelo componente, seu alto custo de aquisição e reparo, bem como à ausência de uma gestão logística específica sobre o item. O objetivo deste estudo é identificar o comportamento atual da taxa de falha das *Cooling Turbines*, com o intuito de verificar a adequabilidade da política de manutenção atual e boas práticas de manutenção que possam prolongar a vida útil do componente. Esse propósito será alcançado através de uma pesquisa documental que contempla os dados de recolhimentos dos últimos 10 anos de operação da frota de VC-97 da FAB. A análise evidenciou que a taxa de falha do item segue um padrão de “mortalidade infantil”, com taxa de falha alta e decrescente logo após a instalação do item. Constatou-se, também, que o plano de manutenção vigente se adequa aos dados de recolhimento, o que suscitou a necessidade de implementar medidas destinadas a atenuar ou reduzir os impactos negativos decorrentes dos defeitos, como os testes de *burn-in* e de qualidade.

Palavras-chave: Confiabilidade. *Cooling Turbine*. VC-97.

ABSTRACT

This work addresses the issue of the reliability of the Cooling Turbine of the VC-97 Brasília aircraft. This approach is necessary due to the logistical impact caused by the component, its high acquisition and repair costs, as well as the absence of specific logistical management regarding the item. The aim of this study is to identify the current failure rate behavior of Cooling Turbines in order to assess the adequacy of the current maintenance policy and best maintenance practices that can extend the component's lifespan. This purpose will be achieved through a documentary research that encompasses the retrieval data from the last 10 years of operation of the FAB's VC-

¹¹ Graduado em Ciências Aeronáuticas e Administração Pública pela Academia da Força Aérea (AFA). Pós-graduação em Gestão de Pessoas pela IBRA Educacional. Pós-graduando em Logística Empresarial pelo Grupo Educacional UNIS. E-mail: abreulas@fab.mil.br.

²² Doutora em Administração pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professora do Grupo Educacional UNIS. E-mail: leila.scanfone@professor.unis.edu.br.

³³ Graduação em Engenharia Aeronáutica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Pós-graduação em Logística Empresarial pela Universidade Cruzeiro do Sul (UNICSUL). Mestrado em Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos pelo *Air Force Institute of Technology* (AFIT). E-mail: lucianamesquitallmm@gmail.com.

97 fleet. The analysis revealed that the item's failure rate follows a pattern of "infant mortality," with a high failure rate decreasing shortly after installation. It was also found that the existing maintenance plan aligns with the retrieval data, prompting the need to implement measures aimed at mitigating or reducing the negative impacts resulting from defects, such as burn-in and quality tests.

Keywords: Reliability. Cooling Turbine. VC-97.

1 INTRODUÇÃO

O modelo EMBRAER-120, também conhecido como VC-97 Brasília, foi desenvolvido e implantado na Força Aérea Brasileira (FAB), como plataforma militar da Aviação de Transporte, na década de 1980.

Após 40 anos de operação, com o envelhecimento da frota, aumento da obsolescência e quantidades cada vez maiores de falhas, é possível identificar quais itens se tornaram críticos, impactando gradativamente a disponibilidade e a operacionalidade das aeronaves, bem como no custo do suporte logístico da frota.

Este intento analisa as deficiências apresentadas pela *Cooling Turbine* com base nos princípios da Manutenção Centrada em Confiabilidade. Assim, este estudo de confiabilidade permitirá a identificação e análise do padrão atual da taxa de falha do item.

Tal abordagem se faz necessária, pois para avaliar a adequação do plano de manutenção e o gerenciamento de estoque de itens do projeto, é necessário mensurar o desempenho atual das taxas de falha dos componentes sensíveis à sua operação e, por conseguinte, otimizar sua gestão.

É importante ressaltar que o item foco deste estudo tem sido objeto de observação constante dos mantenedores, operadores e coordenadores do projeto, já que ele não tem oferecido aquilo que se espera em termos de qualidade e durabilidade de operação. É considerado um item crítico na frota devido seu elevado número de emergências, nem sempre atendidas por conta de problemas logísticos e econômicos.

Visto o histórico de impactos, bem como a falta de uma gestão específica sobre esse componente, o presente trabalho busca responder ao seguinte questionamento: Qual é o comportamento atual da taxa de falha das *Cooling Turbines* operadas na frota de VC-97 da FAB?

O objetivo deste trabalho é identificar o padrão de falha do componente analisado, checando a adequabilidade da política atual de manutenção e boas práticas de manutenção que amenizem os impactos causados pelos seus defeitos, corrigindo os elementos causadores de suas falhas.

Para atingir os objetivos desta pesquisa, pretende-se reunir os dados de recolhimento dos últimos 10 anos de operação da frota da FAB e, após o tratamento destes dados, busca-se calcular a taxa de falha atual da *Cooling Turbine*, por meio do programa *Reliasoft Weibull ++ 5.0*. Em seguida, os resultados obtidos serão analisados junto com as informações fornecidas pela oficina contratada, com o objetivo de identificar políticas que possam atenuar os impactos causados pelos defeitos relatados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AERONAVE VC-97 BRASILIA

O VC-97 Brasília é uma aeronave bimotor, turboélice e pressurizada, desenvolvida e fabricada pela Empresa Brasileira de Aviação (EMBRAER). Lançado na década de 1980, o EMB 120 (designação original da fabricante) tem capacidade para transportar até 30 passageiros, e continua sendo operado até hoje pela FAB, sendo um vetor crucial da aviação de transporte, cumprindo uma ampla gama de missões militares com versatilidade e flexibilidade (EMBRAER, 2023).

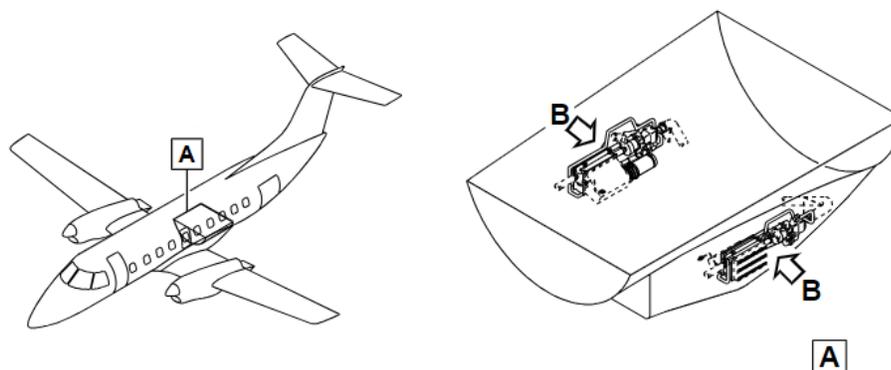
Este modelo é uma composição avançada de sistemas essenciais, incluindo motores, sistemas hidráulicos, elétricos, de navegação, comunicação, iluminação, abastecimento de combustível, alarmes, ar-condicionado e pressurização. Embora todos esses sistemas sejam fundamentais e comuns, é o sistema de ar-condicionado e pressurização que se destaca significativamente, devido à sua complexidade e singularidade (RESENDE, 2019).

Atualmente, a manutenção da frota de VC-97 da FAB é realizada por uma empresa especializada, por meio de um Contrato de Suporte Logístico (CSL) e o componente em questão segue a política de manutenção *On Condition*. As publicações que tratam sobre o assunto são o BT LS 18-490 C-97 001 (Programa de Manutenção) e o BT LS 19-499 C-97 003 (Itens Controlados), ambos emitidos pelo Parque de Material Aeronáutico de Lagoa Santa (PAMA-LS).

2.1.1 SISTEMA DE AR-CONDICIONADO E PRESSURIZAÇÃO

Conforme estabelecido por EMBRAER (1989), o Sistema de Ar-condicionado e Pressurização do EMB 120 é equipado com os subsistemas de sangria, unidade de controle ambiental (*Pack*), controle de temperatura e de distribuição de ar. As duas unidades de *Pack* ficam localizadas nas carenagens do bordo de fuga de cada asa do avião. Cada uma consiste em 1 trocador de calor de 2 estágios, 1 *Cooling Turbine*, 1 condensador e 1 separador de água, tal como evidenciado nas Figuras 1 e 2.

Figura 1 - Localização das Unidades de controle ambiental.



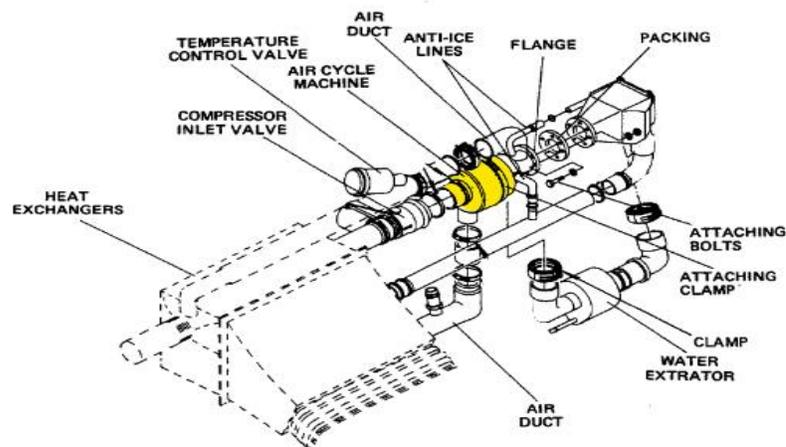
Fonte: (EMBRAER, 1989, p. 2-2).

Segundo EMBRAER (1989), todos esses componentes operam em conjunto para pressurizar o ar através do compressor da *Cooling Turbine*, assegurando que ele alcance um nível apropriado para avançar no sistema até, finalmente, chegar à turbina de expansão. Após ser

resfriado, pressurizado e seco, o ar continua em direção à turbina de expansão da *Cooling Turbine*, onde sua pressão e temperatura são drasticamente reduzidas. O ar resfriado é mesclado com ar quente proveniente de uma linha de desvio, atingindo, assim, os níveis de temperatura e pressurização adequados para a cabine. O diagrama do Anexo A ilustra esse sistema.

Até outubro de 2019, a manutenção da *Cooling Turbine* era regida pela IT AF 12-135 VC-97 007, que orientava e padronizava os procedimentos de inspeção no sistema de ar-condicionado e pressurização das aeronaves Brasília, visando, principalmente, a preservação das *Cooling Turbines*. Desde novembro de 2019, o componente em pauta não mais é considerado como “item controlado”, deixando de realizar tarefas de manutenção preventiva que preservem sua vida útil.

Figura 2 - Unidade de Controle Ambiental (*Pack*).



Fonte: Adaptado de EMBRAER (1989).

A *Cooling Turbine*, dessa forma, exerce um papel crucial no sistema de refrigeração e pressurização, pois tem dupla função: comprimir o ar sangrado, permitindo que ele percorra todos os componentes do sistema, e resfriá-lo, garantindo uma refrigeração suficiente para a cabine. Portanto, fica evidente a importância do MSI no desempenho do sistema em pauta, pois qualquer falha funcional resultaria em uma pressurização e refrigeração deficientes (EMBRAER, 1989).

2.2 MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) é um processo analítico que busca requisitos para otimizar os esforços de manutenção, direcionando-os de forma proativa para os itens que têm maior impacto na confiabilidade operacional. A MCC identifica a necessidade de ações que garantam a operação segura e efetiva de uma aeronave, em vez de se basear em cronogramas rígidos e periódicos. Dessa forma, há uma associação entre MCC e qualidade, visto que se almeja elevar a prontidão operacional e reduzir os custos de manutenção, assegurando a satisfação do usuário e preservando a segurança de voo (BRASIL, 2017).

Segundo Brasil (2017), a MSG-3, de significado “*Maintenance Steering Group*”, é uma metodologia que emprega três processos de manutenção distintos baseados no desempenho e na análise de dados: *Hard Time* (HT), *On Condition* (OC) e *Condition Monitoring* (CM). O primeiro é utilizado para componentes com um prazo máximo de utilização, definido como Tempo Limite de Vida (TLV) ou Revisão Geral (*Overhaul*). O segundo é aplicado a itens que não possuem tarefas periódicas de avaliação da condição, ou seja, nenhuma ação de manutenção é executada até a

ocorrência de uma falha. Já o último é empregado para realizar tarefas de acompanhamento periódico do desgaste do item. Isso permite que a manutenção ou a sua substituição seja realizada com base em uma previsão de falha, em virtude do estado atual de sua degradação funcional.

Assim, a MCC adota uma abordagem baseada no desempenho e na análise de dados, reconhecendo que diferentes componentes e sistemas têm diferentes padrões de falha e requerem estratégias de manutenção personalizadas. Essa estratégia fundamentada em análise de dados permite identificar os principais fatores de risco, antecipar falhas potenciais e realizar intervenções de manutenção de forma planejada e proativa (BRASIL, 2006).

Alguns componentes, quando falham, podem refletir significativamente na segurança e operação da aeronave, seja em solo ou em voo. É possível, ainda, que tais falhas sejam indetectáveis durante as operações, acarretando consequências relevantes em termos operacionais e econômicos. Esses itens, portanto, são conhecidos pelo acrônimo MSI, de significado “*Maintenance Significant Item*” (Item Significativo de Manutenção), também conhecido como Item Crítico. O MSI refere-se, então, às peças ou componentes essenciais que exercem um papel crítico na segurança, operacionalidade ou confiabilidade das aeronaves (TANG; QIU, 2014).

Conforme destacado por Moubray (1997), a confiabilidade é a capacidade de um sistema, equipamento ou processo de desempenhar suas funções de forma consistente e livre de falhas ao longo de um período, sob condições específicas de operação. Através de métodos estatísticos, é possível estimar a probabilidade de falha de itens e calcular suas confiabilidades, obtendo diversos parâmetros de interesse no planejamento das atividades de manutenção.

A confiabilidade é representada pela letra “R” do inglês *Reliability* e expressa a variação da probabilidade de uma falha não ocorrer até um determinado tempo “t” (BLANCHARD, 2014).

$$R(t) = P\{T > t\}, t \geq 0 \quad (1)$$

Onde:

T representa o tempo em que o item apresentou algum tipo de falha;

t representa o tempo escolhido para experimento do estado do item;

R(t) é a função de confiabilidade;

Por outro lado, a curva de falha expressa a variação de probabilidade de uma falha ocorrer até o tempo “t”.

$$F(t) = P\{T \leq t\}, t \geq 0 \quad (2)$$

Onde:

F(t) é a função acumulada de falha;

Dessa forma, torna-se evidente que:

$$R(t) = 1 - F(t), t \geq 0 \quad (3)$$

Para descrever completamente as variáveis que compõem a função confiabilidade, torna-se necessária elucidar a função acumulada de falha. Esta equação equivale à integral da função densidade de falha, cuja distribuição descreve a taxa de crescimento da probabilidade de uma falha ocorrer até um determinado tempo “t”.

$$F(T) = \int_0^t f(t)dt \quad (4)$$

Onde:

F(t) é a função distribuição acumulada de falhas;

T é a variável aleatória tempo até a falha;
 f(t) é a função densidade de probabilidade de falhas.

Relacionando-se a Equação (4) com a Equação (3) é possível corroborar a dependência da confiabilidade em relação ao tempo, tendendo à zero, ou seja, à falha do componente analisado.

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (5)$$

Conforme Dhillon (2006), o conceito de confiabilidade está relacionado ao termo “*Uptime*” cujo significado representa o tempo em que um componente ou sistema está disponível, ou seja, capaz de desempenhar sua função sem falhas. Já o conceito de *Mean Time Between Failure* (MTBF) tem a ver com o tempo médio de funcionamento entre falhas.

Por outro lado, o conceito de manutenibilidade ou mantabilidade corresponde ao termo “*Downtime*”, representando o tempo em que o componente ou sistema está indisponível, ou seja, incapaz de exercer sua função. Pode também ser retratado como *Mean Time to Repair* (MTTR), visto que é definido pelo tempo médio necessário para reparar determinado item, restabelecendo a plena capacidade de exercer sua atribuição novamente (ABNT, 1994).

Na análise de confiabilidade, são empregadas diversas distribuições estatísticas, como a normal, exponencial, lognormal, entre outras. Cada uma delas possui suas próprias características distintas e funções pré-estabelecidas, sendo desenvolvidas com o objetivo de modelar ou representar matematicamente o comportamento de um conjunto de dados.

Uma distribuição amplamente utilizada para análise de confiabilidade é a distribuição *Weibull 2* parâmetros. Devido à sua notável flexibilidade, permitindo a mudança da forma e da escala, com base nos valores dos parâmetros “β” e “η”, respectivamente, este tipo de distribuição possibilita a modelagem de uma ampla variedade de dados de falha. As Equações 8, 9 e 10 retratam as expressões de sua função densidade de falha, confiabilidade e taxa de falha, nessa ordem.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (8)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (9)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (10)$$

Onde:

β é o fator de forma

η é o fator de escala

λ é a taxa de falha

O parâmetro de forma (β) na distribuição de *Weibull* desempenha papel crucial na modelagem do comportamento da taxa de falha (λ) ao longo do tempo. Dependendo do valor do fator de forma (β), a taxa de falha pode ser crescente, constante ou decrescente, o que é útil para

analisar a confiabilidade e a vida útil de componentes em diversos contextos. Esta influência fica evidente na Tabela 1.

Tabela 1 - Variação do comportamento da taxa de falha em função do parâmetro de forma.

Valor	Comportamento da taxa de falha	Tipo de falha	Característica da falha
$0 < \beta < 1$	Decrescente	Prematura	Mortalidade infantil
$\beta = 1$	Constante	Aleatória	Vida útil
$\beta > 1$	Crescente	Desgaste	Degradação

Fonte: o autor.

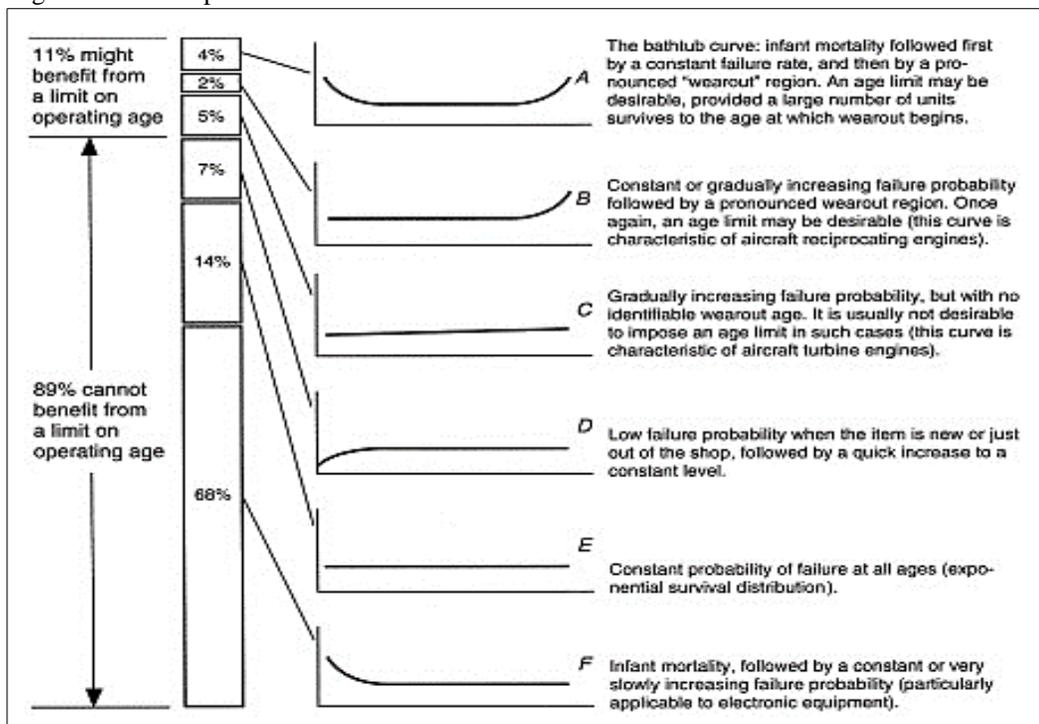
2.2.1 PADRÕES DE TAXA DE FALHA

Segundo Blanchard (2014), itens com características mecânicas tendem a seguir o perfil estabelecido na teoria clássica da Curva da Banheira, apresentando uma taxa de falha crescente quando na fase final de sua vida útil, o que é caracterizado como período de desgaste.

Moubray (1997) complementa a teoria supracitada e estabelece outros 5 padrões de falha diferentes, nomeando-os de “A” a “F”, sendo o padrão “A” a bem conhecida Curva da Banheira.

Cada modelo representa características de itens distintos, porém é interessante perceber a probabilidade de enquadramento dos itens a partir de estudos feitos na aviação civil. Contatou-se que não menos que 68% dos itens obedecem ao padrão “F”, o qual representa a região de falhas prematuras (ou mortalidade infantil).

Figura 3 - Os seis padrões de falha.



Fonte: Adaptado de MOUBRAY (1997).

Essas descobertas contradizem a crença de que sempre há uma conexão entre confiabilidade e idade operacional, uma vez que quanto mais complexo for o equipamento em análise, maiores as chances de predominância dos padrões “E” e “F” (MOUBRAY, 1997).

Moubray (1997) ressalta que sistemas ou componentes complexos são desenvolvidos com o objetivo de aprimorar a segurança ou o desempenho para os quais foram concebidos. A realização desses objetivos é alcançada por meio da incorporação de uma maior quantidade de componentes tecnológicos e com maiores interações entre si. Conseqüentemente, o aumento da complexidade resulta em um maior potencial para ocorrência de falhas, bem como uma ampliação da variabilidade em que essas falhas podem se manifestar. Portanto, sugere-se que itens de maior complexidade estejam sujeitos a um maior risco de falhas imprevisíveis em comparação com itens mais simples.

De acordo com Moubray (1997), problemas de mortalidade infantil são solucionados com ações pontuais de manutenção ou com a aplicação de *On Condition Tasks* (ações de manutenção preditiva, onde busca-se acompanhar o nível de degradação do item e prever quando ele irá falhar, para programar sua troca em momento oportuno).

Por fim, Moubray (1997) também aponta os principais problemas que, se corrigidos, podem amenizar os impactos causados pelo alto índice de falhas observados na região de falhas prematuras, sendo eles: *design* ruim; fabricação de má qualidade; instalação incorreta; operação inadequada; manutenção invasiva ou desnecessária; mau acabamento.

Para amenizar as conseqüências adversas supracitadas, O'Connor e Kleyner (2012) mencionam os testes de *burn-in* como solução para componentes que apresentam perfil de falha prematura. Esses testes, visando uma melhoria na confiabilidade, buscam fazer com que os itens operem sob condições de estresse para identificar e eliminar componentes defeituosos, antes que eles sejam entregues ao cliente ou implantados em sistemas críticos.

Burn-in é um processo de envelhecimento acelerado, no qual os componentes ou sistemas são submetidos a condições operacionais rigorosas, como tensões elétricas, temperaturas elevadas e ciclos de funcionamento intensivos, por um período prolongado. A ideia é que, durante esse período, os componentes com defeito ou que estão propensos a falhar apresentem problemas, permitindo que sejam identificados e substituídos antes que o produto seja disponibilizado (O'CONNOR; KLEYNER, 2012).

Do mesmo modo, Juran e Godfrey (1999) reportam o papel crucial desempenhado pelos testes de qualidade na elevação da confiabilidade de componentes e sistemas. De acordo com o autor, a importância desses testes está relacionada a diversos fatores que contribuem para a melhoria da confiabilidade, como: identificação de problemas iniciais, garantia de conformidade, prevenção de falhas prematuras e aumento da vida útil.

Os testes de qualidade são procedimentos ou avaliações realizados em produtos, componentes, sistemas ou processos para determinar se eles atendem aos padrões de qualidade estabelecidos. Esses critérios podem incluir especificações técnicas, requisitos de desempenho, normas da indústria, expectativas do cliente e outros critérios pertinentes (JURAN; GODFREY, 1999).

3 MATERIAL E MÉTODO

Segundo Gil (2008), a pesquisa pura busca o progresso da ciência e o desenvolvimento dos conhecimentos científicos. Este trabalho, portanto, caracteriza-se como uma pesquisa básica ou pura, por buscar conhecimento científico útil à gestão da manutenção da FAB, mediante análise dos resultados obtidos.

De maneira exploratória, este trabalho adota uma abordagem quantitativa, investigando dados numéricos e gerando hipóteses relacionadas ao tempo de vida dos itens. Isso se traduz em uma tentativa de aprofundar a compreensão de um tópico de alta complexidade (MARTINS, 2002).

Esta tarefa envolve a coleta, análise e interpretação de informações a partir de dados documentais existentes, tendo como fonte livros, relatórios, banco de dados e registros históricos. Por conta disso, é caracterizado como pesquisa documental. Trata-se de uma pesquisa de campo, uma vez que a coleta dos dados ocorreu no ambiente real de aplicação e utilização (GIL, 2008).

Para atingir os objetivos deste trabalho, foi realizada uma análise de dados de defeito do MSI, utilizando as Fichas de Coleta de Dados de Defeito (FCDD), através da tela ENG0312P, registradas na base de dados da plataforma SILOMS 11G. A coleta dos dados de recolhimentos do item estudado, foi realizada através das telas CTR6229P (Análises de Recolhimento de Equipamentos) e CTR0125P (Relatório de Grupo Material) do SILOMS 11G, de onde foi possível obter o exato momento das falhas, bem como identificar dados censurados, que ocorrem quando o momento da falha não pode ser determinado.

A frota de aeronaves VC-97 possui 4 tipos de *Part-Number* (PN) cadastrados no SILOMS para a mesma função dentro do sistema em foco, sendo eles: 2204540-1, 2204540-2, 2204540-4 e 2204540-5. Destes itens, o primeiro não possui nenhuma emergência ou dados de instalação e consumo, sendo desconsiderado neste estudo por falta de dados.

Todos os dados analisados e considerados neste estudo estão compreendidos no período entre 01/06/2013 e 01/06/2023, ou seja, dos 10 últimos anos de operação do projeto, e foram compilados em uma planilha exposta no Apêndice A.

Para preservar a veracidade e a legitimidade deste estudo, foram consideradas algumas premissas para tratamento e análises dos dados, como: as FCDD com status “cancelada” por parte da coordenação do projeto, bem como os dados duplicados foram desprezados; as FCDD com informações incompletas, ou seja, cujos registros que não continham valor de TSN (*Time Since New*) foram desconsideradas de algumas análises; os dados filtrados para análise são considerados confiáveis e verdadeiros, isto é, suas datas de lançamentos, relatos de falha e as horas de voo refletem a realidade dos fatos; e o tipo de operação da aeronave, tal como as características das missões realizadas são considerados como inalterados ao longo de todo o período estudado.

Passado o processo de filtragem, os dados foram inseridos no programa *Weibull ++ 5.0*, onde foram processados os cálculos de regressão pertinentes, visando o cálculo da Confiabilidade, Probabilidade de Falha e Taxa de Falha. Através da utilização dessa ferramenta, cujo enfoque é a análise de dados de vida de equipamentos e sistemas, os cálculos foram realizados de forma ágil e intuitiva, levando em consideração períodos que também permitam análises posteriores.

Com o objetivo de avaliar os impactos e apresentar sugestões de aprimoramento à gestão da frota de Brasília, foram coletadas informações adicionais relevantes junto à empresa contratada. Estas incluem assessorias técnicas realizadas pelos operadores, o histórico recente da quantidade de itens encaminhados para reparo em oficina contratada e os valores estimados para o reparo dos componentes defeituosos.

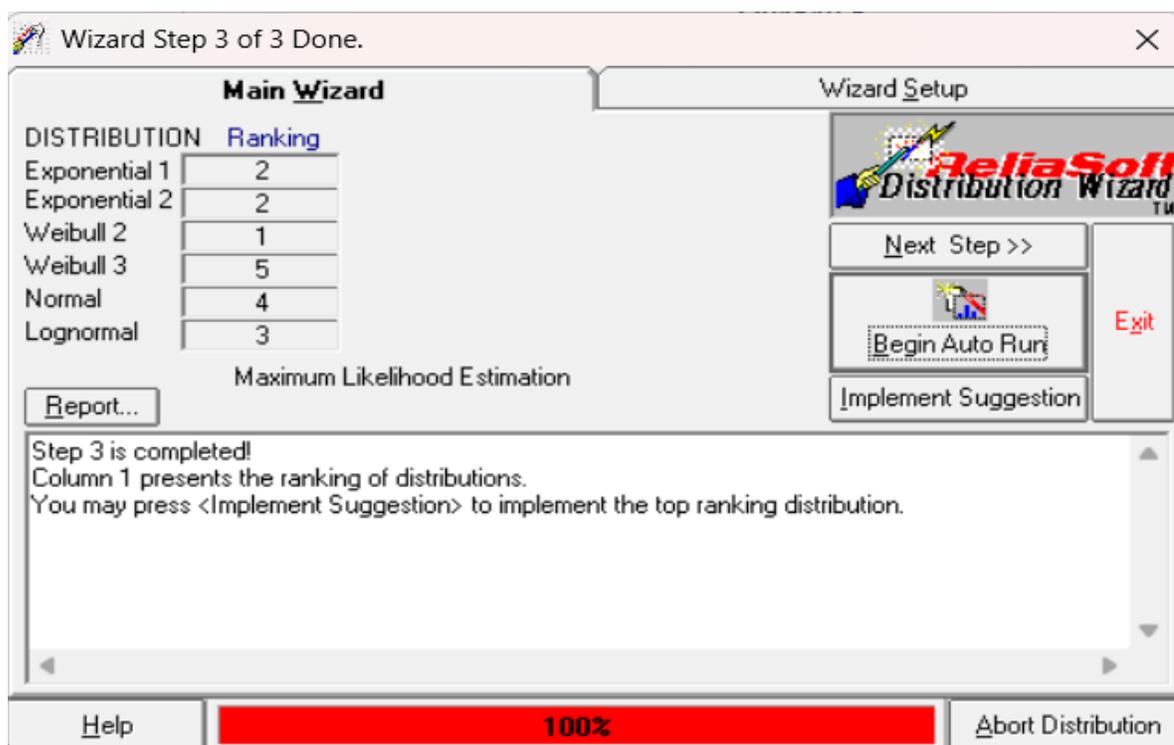
4 RESULTADO E DISCUSSÃO

A amostra filtrada totalizou 73 eventos de falha e 22 dados em suspensão a serem inseridos no programa *Weibull ++ 5.0*. O método de interação utilizado foi a *Maximum Likelihood*

Estimation (MLE), ou Estimação de Máxima Verossimilhança (em português), por conta da ampla gama de amostras de falhas, tal como a presença razoável de dados censurados.

Após a definição pelo método MLE, o *software* utilizado se encarregou de realizar os testes de aderência para escolha da melhor curva de confiabilidade consoante aos dados obtidos. Dentre as curvas de distribuições disponíveis no programa (*Weibull 2P*, *Weibull 3P*, Lognormal, Normal e Exponencial), o teste realizado no *software* mostrou a curva *Weibull 2P* como sendo a mais indicada para representar os dados de falha, conforme mostra a Figura 4.

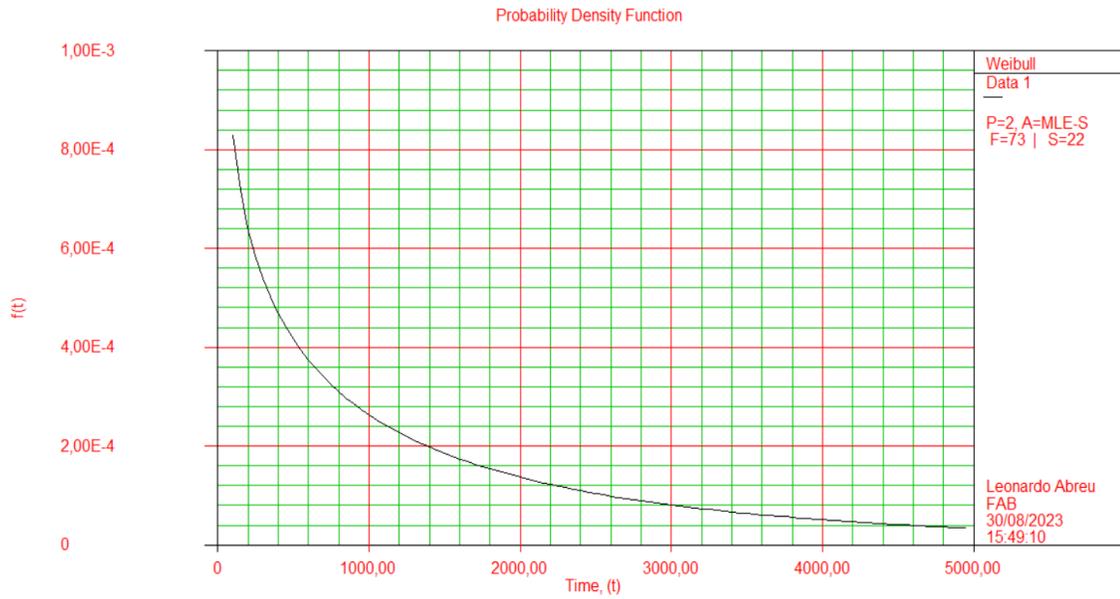
Figura 4 - Teste de aderência realizado no *Weibull ++ 5.0*.



Fonte: o autor.

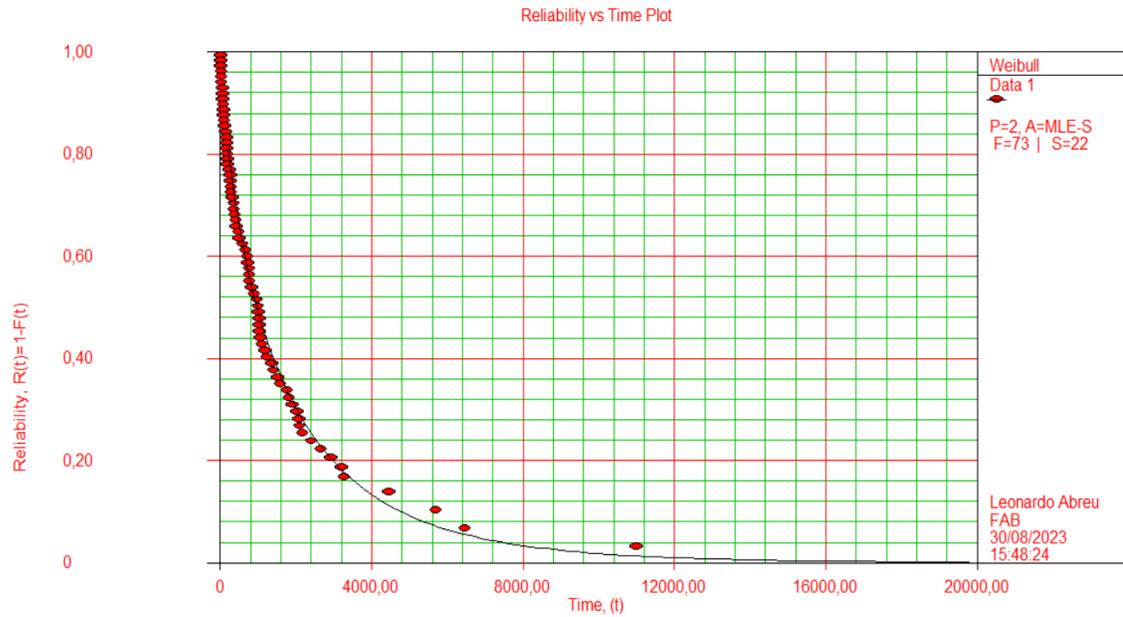
Diante do modelo adotado, alguns resultados gráficos foram extraídos, permitindo uma análise mais aprofundada acerca da confiabilidade das *Cooling Turbines* do VC-97 da FAB. Os resultados gráficos foram os seguintes, considerando um intervalo de 90% de confiança.

Gráfico 1 - Função densidade de probabilidade de falha.



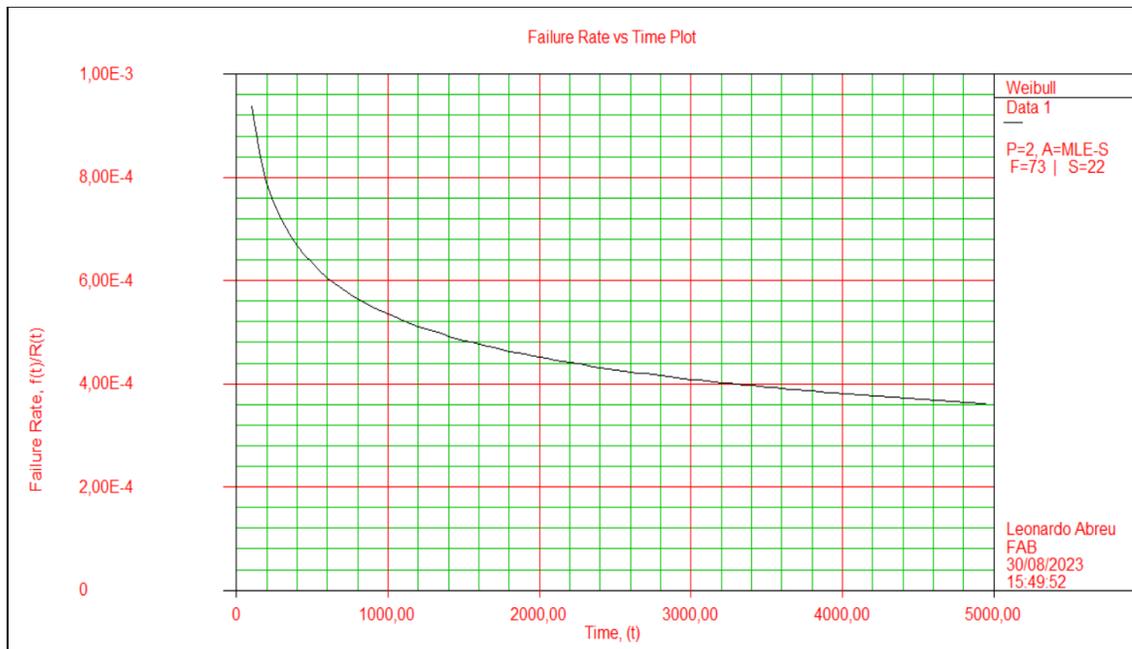
Fonte: o autor.

Gráfico 2 - Função Confiabilidade.



Fonte: o autor.

Gráfico 3 - Função Taxa de falha.



Fonte: o autor.

Os resultados obtidos no programa *Weibull ++ 5.0* foram compilados na Tabela 2, de forma a facilitar as análises subsequentes.

Tabela 2 – Relatório simplificado dos resultados obtidos.

Descrição MSI	<i>Cooling Turbine / Air Cycle Machine</i>
Part Number	2204540-2 / 2204540-4 / 2204540-5
Fabricante	Honeywell International Inc.
Tipo de Relatório	Resultados <i>Weibull ++ 5.0</i>
Distribuição	<i>Weibull 2P</i>
Análise	MLE
Beta (β)	0,7558
Eta (η)	1581,9187
F / S	73 / 22
MTBF	1871

Fonte: o autor.

Conforme indicado no Gráfico 3 e na Tabela 2, o MSI apresenta uma taxa de falha decrescente, com Beta igual a 0,76, caracterizando-se como falhas prematuras ($\beta < 1$). Este tipo de falha é, normalmente, atrelado a itens que estão no início da vida útil, apresentando falhas iniciais devido a possíveis problemas de fabricação, ajustes ou acomodação.

Para tanto, há uma ampla gama de políticas de manutenção projetadas para atenuar essa tendência e amenizar os efeitos negativos causados por componentes com defeitos precoces. Uma dessas abordagens são os testes de *burn-in*, citados no referencial teórico deste estudo.

Fica constatado, com os resultados extraídos do *Weibull*, a importância de submeter os itens que sofreram algum tipo de reparo à testes que identifiquem e eliminem defeitos antes da instalação na aeronave. Esses procedimentos, conforme apresentado no referencial teórico deste trabalho, devem expor as *Cooling Turbines* reparadas a condições operacionais rigorosas, acelerando o

processo de envelhecimento e, assim, agilizando a transição do item para uma fase posterior de seu ciclo de vida, na qual a probabilidade de falhas é significativamente menor.

A empresa responsável pela manutenção executa o reparo do MSI conforme estabelece o manual de manutenção do fabricante, ou seja, ela recebe o item em pane e executa as etapas de desmontagem, inspeção de avarias nos subitens internos e substituição das partes danificadas.

Os registros de falha coletados relatam as principais discrepâncias como danos estruturais internos, ineficácia parcial e total falha funcional do componente. Todas as discrepâncias apontadas, mesmo que individualmente, inabilitam a função do MSI e, por conta do seu papel fundamental na pressurização e refrigeração do ar, indisponibiliza o sistema como um todo.

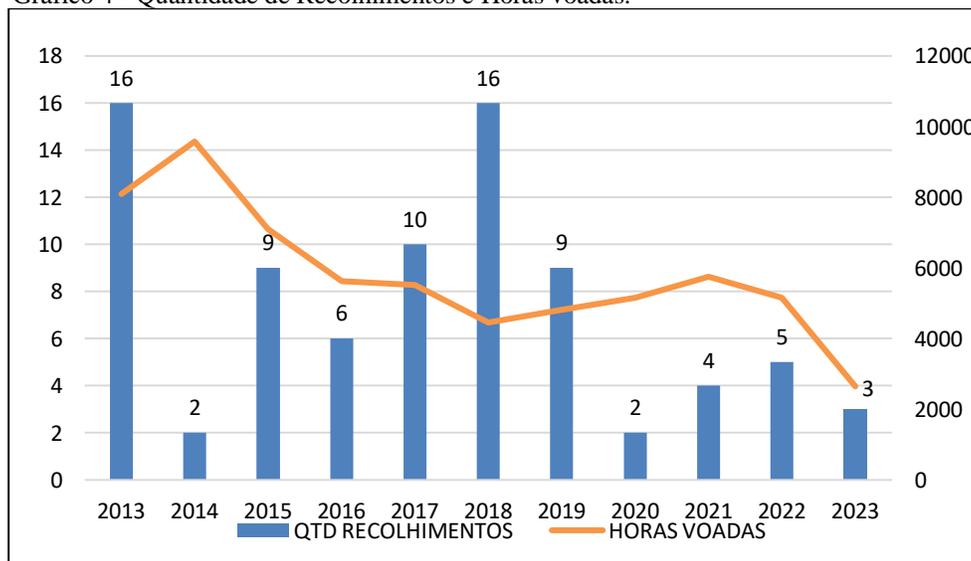
Em virtude de o item em questão não ser reparado pela FAB, é preciso uma análise mais aprofundada junto à oficina reparadora, a fim de determinar quais são os principais modos de falha existentes e, desta maneira, viabilizar a aplicação de alguma ação de manutenção ou estudos de viabilidade para que a durabilidade do MSI seja aprimorada.

Nesse contexto, de acordo com a fundamentação apresentada no capítulo 2, a adoção de testes de qualidade após o reparo de componentes defeituosos também se mostra como um fator contribuinte para a diminuição das falhas prematuras. Caso esses procedimentos sejam adequadamente conduzidos pela empresa contratada, eles irão assegurar que a manutenção tenha sido realizada de forma apropriada, por meio da condução de testes de aceitação ou de desempenho logo após o recebimento do item restaurado.

No que concerne à adequação do regime de manutenção aplicado ao componente em análise, todo o embasamento teórico deste estudo reforça a política de manutenção *On Condition* como a mais apropriada para itens que evidenciam taxa de falha decrescente. Isso se deve ao fato de que não faz sentido restaurar um item a uma condição mais propensa a defeitos. Nesse sentido, o plano de manutenção atual da *Cooling Turbine* (BT LS 19-499 C-97 003) está em consonância com o referencial teórico.

O gráfico abaixo demonstra o crescimento recente da quantidade de recolhimentos comparado à redução constante das horas de voo. Ao longo dos últimos 5 anos de operação, foi registrada uma média anual de 4,6 itens coletados devido a falhas. No entanto, nos primeiros 6 meses de 2023, já ocorreram 3 recolhimentos.

Gráfico 4 - Quantidade de Recolhimentos e Horas voadas.



Fonte: o autor.

De acordo com a empresa contratada, há um conjunto de componentes internos em que regularmente são encontradas avarias após a desmontagem do MSI. A troca geral desses componentes encarece significativamente o seu reparo por completo.

Conforme a mesma fonte, os reparos estimados para esses incidentes variam entre 20 e 25 mil dólares, o que corresponde a cerca de R\$ 114.975,00, com base em uma taxa de câmbio média de 5,11 reais por dólar durante o primeiro semestre de 2023. Portanto, apenas no decorrer do primeiro semestre de 2023, esses incidentes resultam em um custo aproximado de 350 mil reais, exclusivamente direcionados ao componente em questão.

No Brasil, além da FAB, há somente mais um operador ativo do EMB 120, que é a própria EMBRAER, responsável pela fabricação da aeronave. Além da dissolução massiva de operadores nacionais da aeronave, outras variáveis podem influir para o custo de reparo do componente estar cada vez maior, tais como a falta de itens de reposição (*spare parts*), possível obsolescência do componente, escassez de mão de obra capacitada e poucas oficinas especializadas.

Apesar do perfil da taxa de falha obtido ser decrescente, há uma quantidade elevada de recolhimentos ao longo dos anos e, dado que os custos de reparo são elevados, acaba gerando um impacto significativo na gestão da frota, por conta de o recurso financeiro ser um fator limitante permanente.

Os impactos relatados, além de representarem óbices logísticos e financeiros, podem afetar diretamente à segurança de voo, visto que na falta de itens de reposição, algumas aeronaves, segundo dados extraídos do SILOMS, operam na condição de “monopack” (com somente uma das unidades de controle ambiental operando) sob Assessoramento Técnico (AT) do PAMA-LS.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste momento, é oportuno retomar a questão central desta pesquisa, que é identificar o comportamento atual da taxa de falha das *Cooling Turbines* utilizadas nos VC-97 da frota da FAB. Para tanto, através deste estudo de confiabilidade, checkou-se que o perfil apresentado pela taxa de falha da *Cooling Turbine* caracteriza-se por falhas prematuras, ou seja, demonstra altas taxas de defeito logo após a instalação, seguida de decréscimo com o passar de sua utilização.

Com isso, concluiu-se que este perfil é incompatível com inspeções programadas, sendo plausível a adoção de outras medidas que prolonguem sua vida útil e reduzam os impactos causados por suas falhas, como os testes de *burn-in*.

É oportuno reiterar a coerência da alteração feita pelo BT LS 19-499 C-97 003, ao alocar o MSI abordado neste intento sob a política de manutenção *On Condition*, aplicando, adequadamente, somente ações de manutenção corretiva.

Além disso, constatou-se que a implementação de testes e procedimentos destinados a aprimorar a qualidade e a durabilidade dos itens reparados é de suma importância. A negligência quanto a essas medidas pode acarretar consequências adversas, tais como a necessidade de recolhimento precoce de peças, aumento significativo dos custos de manutenção e a redução do estoque de itens disponíveis.

Adicionalmente, apontou-se a necessidade de estudos de engenharia voltados à identificação dos fatores causadores dos efeitos de falhas relatados em FCDD. Este esforço proverá embasamento técnico para medidas logísticas que amenizarão os impactos causados pela baixa durabilidade do MSI.

Assim, a análise realizada cumpriu os objetivos do trabalho, pois corroborou a adequabilidade da política de manutenção do componente avaliado, ao determinar o

comportamento atual de sua taxa de falha e, além disso, elencou estratégias efetivas para atenuar os impactos resultantes e aprimorar a gestão do componente abordado.

Observa-se como fator limitante desta análise um maior aprofundamento técnico, no que tange a identificação dos fatores que causam os defeitos relatados, a fim de viabilizar ações de manutenção que previnam os principais tipos de falhas. Além disso, como sugestão de trabalhos futuros, recomenda-se um estudo de obsolescência, visando aprofundar a análise da eficiência funcional do MSI em relação às expectativas estabelecidas. É crucial que esse estudo investigue as dificuldades em relação à aquisição, manutenção ou atraso tecnológico, além de considerar a possibilidade de substituição deste componente por alternativas mais avançadas.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

BLANCHARD, B. S. **Logistics Engineering and Management**. 6. ed. Harlow: Pearson, 2014.

BRASIL. **MCA 400-15, Manual do Comando da Aeronáutica – Manutenção Centrada em Confiabilidade**. Comando da Aeronáutica. Estado Maior da Aeronáutica. Brasília, DF, 2006.

BRASIL. **MCA 66-7 Manual de Manutenção Doutrina, Processos e Documentação de Manutenção**. Comando da Aeronáutica. Estado Maior da Aeronáutica. Brasília, DF, 2017.

DHILLON, B. S. **Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers**. Boca Raton: Taylor & Francis. 2006.

EMBRAER. **Centro Histórico da Embraer**, 2023. Disponível em: www.historicalcenterembraer.com. Acesso em: 10 jun. 2023.

EMBRAER. Seção 6-12 do Manual de Operações do EMB 120: **Air Conditioning And Pressurization**. 1989. 28 páginas.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

JURAN, J. M; GODFREY, A. B. **Juran's Quality Handbook**. 5. ed. New York. McGraw-Hill, 1999.

MARTINS, G. A. **Manual para elaboração de monografias e dissertações**. São Paulo: Atlas, 2002.

MOUBRAY, J. **RCM II Reliability-Centered Maintenance II**. Oxford, UK: Industrial Press, 1997.

O'CONNOR, P. D.T.; KLEYNER, A. **Practical Reliability Engineering**. 5. ed. New Jersey. John Wiley & Sons, 2012.

PARQUE DE MATERIAL AERONÁUTICO DE LAGOA SANTA – PAMA-LS. **BT LS 18-490 C-97 001 Programa de manutenção da Aeronave C-97.** Lagoa Santa, MG, 2018.

PARQUE DE MATERIAL AERONÁUTICO DE LAGOA SANTA – PAMA-LS. **BT LS 19-499 C-97 003 Itens Controlados da Aeronave C-97.** Lagoa Santa, MG, 2019.

PARQUE DE MATERIAL AERONÁUTICO DOS AFONSOS – PAMA-AF. **IT AF 12-135 VC-97 007 Inspeção do Sistema de Ar-Condicionado nas Aeronaves Brasília.** Rio de Janeiro, RJ, 2012.

RELIASOFT BRASIL. **Reliasoft's Weibull ++ 5.0 32 Bit (Pro).** São Paulo – SP. 1998.

RESENDE, M. Embraer 120 Brasília. **Folha de São Paulo Online**, 2019. Disponível em: https://www1.folha.uol.com.br/folha/turismo/preparese/aviao-embraer_brasilia.shtml. Acesso em: 10 jun. 2023.

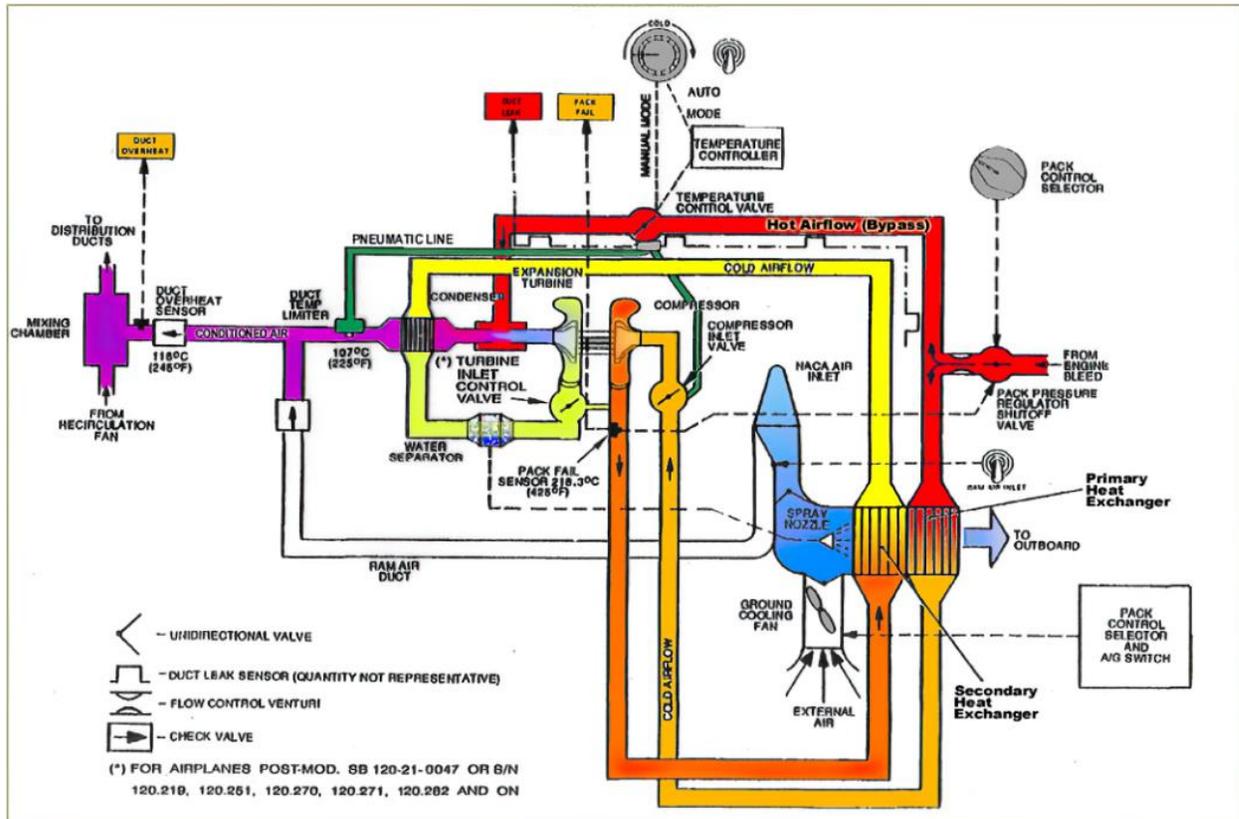
TANG, J.; QIU, H. **Optimization on spare parts allocation for aircraft maintenance significant items.** Mathematical Problems in Engineering, v. 2014, 2014.

APÊNDICE A – Planilha de dados coletados

DATA	SN ITEM DEFEITUOSO	TSN	TSN CORRIGIDO	ORIGEM	S / F	TSNA	PN ITEM DEFEITUOSO	DATA	SN ITEM DEFEITUOSO	TSN	TSN CORRIGIDO	ORIGEM	S / F	TSNA	PN ITEM DEFEITUOSO
12/03/2013	127-1353	360.45	360.45	fodd	F	360,75	2204540-2	16/01/2019	31-544R	978.30	978.30	fodd	F	978,50	2204540-4
06/05/2013	EP215037	278.00	287.00:00	fodd	F	287,00	2204540-2	17/01/2019	CMF3118	1066.35	1066.35	fodd	F	1066,58	2204540-4
12/06/2013	67A10-4	254.30	254.30	fodd	F	254,50	2204540-2	20/03/2019	920196	404.55	204.55:00	fodd	F	204,92	2204540-4
19/09/2013	582282	163.20	163.20	fodd	F	163,33	2204540-4	26/03/2019	88-405	1040.05	1040.05	fodd	F	1040,08	2204540-2
25/10/2013	NTE0057	271.50	271.50	fodd	F	271,83	2204540-2	22/05/2019	101	2180.40	2180.40	fodd	F	2180,67	2204540-5
31/10/2013	ATM2156	66.25	66.25	fodd	F	66,42	2204540-4	22/05/2019	2008	1073.05	176.30:00	fodd	F	176,50	2204540-4
26/11/2013	117-4355	4460.45	4460.45:00	fodd	F	4460,75	2204540-2	02/12/2020	899092-17	379.25	95.10:00	fodd	F	95,17	2204540-2
13/12/2013	896175-3	70.10	70.10	fodd	F	70,17	2204540-2	22/01/2021	9/3CNGLO161	814.00	82.40:00	fodd	F	82,67	2204540-4
18/12/2013	104735	6460.05	6460.05	fodd	F	6460,08	2204540-2	11/05/2021	896175-1	772.40	772.40	fodd	F	772,67	2204540-2
04/06/2014	53	600.35	600.35	fodd	F	600,58	2204540-2	27/05/2021	8805	2665.50	2665.50	fodd	F	2665,83	2204540-4
26/11/2014	55-118	767.40	767.40	fodd	F	767,67	2204540-4	29/12/2021	157	5694.10	5694.10	fodd	F	5694,17	2204540-5
30/03/2015	PL-304	20.25	20.25	fodd	F	20,42	2204540-2	25/01/2022	167	2933.20	2933.20	fodd	F	2933,33	2204540-5
01/04/2015	2008	180.00	180.00	fodd	F	180,00	2204540-4	10/05/2022	1100J03D	3490.15	1588.20:00	fodd	F	1588,33	2204540-4
13/04/2015	P52019	901.10	901.10	fodd	F	901,17	2204540-2	28/09/2022	.0053	19.00	19.00	fodd	F	19	2204540-4
18/08/2015	LP530	1236.30	1236.30	fodd	F	1236,50	2204540-2	11/05/2023	w49851	30.55	30.55	fodd	F	30,92	2204540-2
11/01/2016	1100J03D	1901.55	1901.55	fodd	F	1901,92	2204540-4	19/05/2023	9INGLO267	153.25	153.25	fodd	F	153,42	2204540-2
24/02/2016	124-D16	21.20	21.20	fodd	F	21,33	2204540-4	17/12/2013	487537-6	837.15	837.15	manut	F	837,25	2204540-4
07/11/2016	15	388.10	388.10	fodd	F	388,17	2204540-2	04/11/2015	78-380	26.30	26.30	manut	F	26,50	2204540-2
07/11/2016	127-1353	1393.40	1032.55:00	fodd	F	1032,92	2204540-2	07/11/2016	920196	200.00	200.00	manut	F	200,00	2204540-4
08/11/2016	CMF2941	2095.35	2095.35	fodd	F	2095,58	2204540-2	29/11/2016	w49852	26.30	26.30	manut	F	26,50	2204540-4
01/02/2017	E005	1762.10	1762.10	fodd	F	1762,17	2204540-2	07/12/2016	ATM-2160	1018.10	1018.10	manut	F	1018,17	2204540-4
21/03/2017	CMF3117	64.55	64.55	fodd	F	64,92	2204540-2	24/05/2017	899092-17	284.15	284.15	manut	F	284,25	2204540-2
03/04/2017	43-636R	411.55	411.55	fodd	F	411,92	2204540-4	05/10/2017	CMF3116	174.15	174.15	manut	F	174,25	2204540-2
03/04/2017	67A10-4	1031.35	777.05:00	fodd	F	777,08	2204540-2	17/05/2021	CMF3116	670.10	495.55:00	manut	F	495,92	2204540-2
03/04/2017	AKC122204	422.45	422.45	fodd	F	422,75	2204540-2	17/05/2021	NA2275W	99.50	99.50	manut	F	99,83	2204540-4
11/04/2017	68-1961K	1003.00	1003.00	fodd	F	1003,00	2204540-2	09/03/2022	114	1820.20	1820.20	manut	F	1820,33	2204540-5
17/05/2017	2008	896.35	716.35:00	fodd	F	716,58	2204540-4	28/09/2022	114	1923.25	103.05:00	manut	F	103,08	2204540-5
18/07/2017	69093R	127.55	127.55	fodd	F	127,92	2204540-4	01/06/2023	111	3068.25:00	3068.25:00	utiliz	S	3068,42	2204540-5
03/08/2017	10226	10993.20	10993.20	fodd	F	10993,34	2204540-2	01/06/2023	112	4064.35:00	4064.35:00	utiliz	S	4064,58	2204540-5
31/01/2018	w49653	1519.55	1519.55	fodd	F	1519,92	2204540-2	01/06/2023	113	2064.20:00	2064.20:00	utiliz	S	2064,33	2204540-5
06/02/2018	CMF3119	676.00	676.00	fodd	F	676,00	2204540-4	01/06/2023	133	1752.55:00	1752.55:00	utiliz	S	1752,92	2204540-5
13/03/2018	513542-12	2037.45	2037.45	fodd	F	2037,75	2204540-2	01/06/2023	152	3545.20:00	3545.20:00	utiliz	S	3545,33	2204540-5
15/03/2018	9/3CNGLO161	731.20	731.20	fodd	F	731,33	2204540-4	01/06/2023	167	3427.55:00	494.35:00	utiliz	S	494,58	2204540-5
17/04/2018	EP215037	2683.10	2405.10:00	fodd	F	2405,17	2204540-2	01/06/2023	934	4003.10:00	4003.10:00	utiliz	S	4003,17	2204540-2
07/06/2018	53	1974.50	1374.15:00	fodd	F	1374,25	2204540-2	01/06/2023	.0053	71.45:00	52.45:00	utiliz	S	52,75	2204540-4
07/06/2018	79925	503.25	503.25	fodd	F	503,42	2204540-2	01/06/2023	108-906A	2813.55:00	2813.55:00	utiliz	S	2813,92	2204540-4
07/06/2018	67-293	1196.40	1196.40	fodd	F	1196,67	2204540-2	01/06/2023	11/30NGL0211	430.00:00	430.00:00	utiliz	S	430,00	2204540-4
16/07/2018	ATM2156	1101.30	1035.05:00	fodd	F	1035,08	2204540-4	01/06/2023	31-542R	289.00:00	289.00:00	utiliz	S	289,00	2204540-2
01/08/2018	16-168	3214.45	3214.45	fodd	F	3214,75	2204540-2	01/06/2023	513543-2	419.50:00	419.50:00	utiliz	S	419,83	2204540-2
01/08/2018	P5702	353.35	353.35	fodd	F	353,58	2204540-2	01/06/2023	74-174	556.35:00	556.35:00	utiliz	S	556,58	2204540-2
03/09/2018	74-715A	3277.05	3277.05	fodd	F	3277,08	2204540-2	01/06/2023	7-9INGBL0276	545.40:00	545.40:00	utiliz	S	545,67	2204540-4
02/10/2018	74-715	1093.05	1093.05	fodd	F	1093,08	2204540-2	01/06/2023	899092-23	17.55	17.55	utiliz	S	17,92	2204540-4
12/11/2018	124-D16	341.30	320.10:00	fodd	F	320,17	2204540-4	01/06/2023	899092-9	5159.40:00	5159.40:00	utiliz	S	5159,67	2204540-4
07/01/2019	AST-1036	2087.35	2087.35	fodd	F	2087,58	2204540-2	01/06/2023	AST-1036	2369.50:00	282.15:00	utiliz	S	282,25	2204540-2
09/01/2019	180	1409.40	1409.40	fodd	F	1409,67	2204540-5	01/06/2023	ATM2156	2210.00:00	1108.30:00	utiliz	S	1108,50	2204540-4
15/01/2019	136	280.05	280.05	fodd	F	280,08	2204540-5	01/06/2023	EP215037	3566.35:00	883.25:00	utiliz	S	883,42	2204540-4
01/06/2023	SL-015	2236.50:00	2236.50:00	utiliz	S	2236,83	2204540-2	01/06/2023	LP530	4109.15:00	2872.45:00	utiliz	S	2872,75	2204540-2
01/06/2023	w58462	1281.40:00	1281.40:00	utiliz	S	1281,67	2204540-4								

Fonte: o autor.

ANEXO A – Diagrama da Unidade de controle ambiental do VC-97



Fonte: (EMBRAER, 1989, p. 6-9).

ANEXO B – Exemplo de FCDD

 SISTEMA INTEGRADO DE LOGÍSTICA DE MATERIAL E DE SERVIÇOS BASE AÉREA DE NATAL		Pag.: 1 de 2
		Data: 14/09/2023
		Hora: 14:23:19
		EN000328 v.10.19
FICHA DE COLETA DE DADOS DE DEFEITO		
Identificação		Ocorrência
OM : FANAL9	Nº FCDD: 10353	Data: 11/04/2023
Categ. : Outros Casos		Status: Aberto
		Hora: 14:31
Item Defeituoso		
PN : 2204540-2	Instalado em CJM? N	
Nomenclatura: MACHINP, ATR CYCLR	Matricula :	
CODEMP : 70210	Instalação:	Remoção :
Nome Empresa: HONEYWELL INTERNATIONAL INC.	Projeto : C-97	Qtde Item: 1
SN : 899092-12	Dt. Mnt. :	Nº Lote :
Controle : HORAS DE VÔO	TSN	TGO :
TMC : B - MNT NÃO-PROGRAMADA OU CORRECTIVA	Recolhimento : 3040086812	Solicitação:
WDC : 24 - MANUTENÇÃO NÃO PROGRAMADA	Tipo Defeito : Primário	
SIST/WUC : 0 / 000 - GENERALIDADES	Pub Defeituosa:	
Relator : IS VALDIR LEITE	CODEMP :	
Discrepância: ITEM FOT DEVOLVIDO DA ATM NO ESTADO		
Observação : (PRD0055P v.11.4B)		
PN LHA		PN CJM
PN :		PN :
CODEMP :		CODEMP:
SN :	Matricula:	SN :
WUC :		Matricula
Posição:		
Dados da Missão		
Missão :	Fator de Carga :	
Fase :	Altitude:	Velocidade
Atitude:	Meteor. :	
Análise de Oficina		
Nº O.S. :	St. O.S.:	Setor:
Resp. Oficina :		Data:
ATC :		Garantia: 8
Coment. :	WUC: 0 / 000 - GENERALIDADES	
 SISTEMA INTEGRADO DE LOGÍSTICA DE MATERIAL E DE SERVIÇOS BASE AÉREA DE NATAL		Pag.: 2 de 2
		Data: 14/09/2023
		Hora: 14:23:19
		EN000328 v.10.19
FICHA DE COLETA DE DADOS DE DEFEITO		
Identificação		Ocorrência
OM : FANAL9	Nº FCDD: 10353	Data: 11/04/2023
Categ. : Outros Casos		Status: Aberto
		Hora: 14:31
Parecer Engenharia		
Resp. :		
Coment.:		
Provid.:		
Dados do Bélico		
Medida Estocagem:	Fabricação: 01/01/2011	Validade:
Local Última revisão :		Qtde. Estoque:
Defeito Lançador		
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> Nº Tubo Nº Lancto Tubo </div>		
Defeito HMC		
HMC		

Fonte: Adaptado de SILOMS.