

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**Matheus Severo de Abreu**

A IMPORTÂNCIA DO USO DA FERRAMENTA PREDITIVA HUMS  
EM AERONAVES DE ASA ROTATIVA, UTILIZANDO COMO BASE  
HELICÓPTEROS AW139

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RIO DE JANEIRO

2023

**Matheus Severo de Abreu**

**A IMPORTÂNCIA DO USO DA FERRAMENTA PREDITIVA HUMS  
EM AERONAVES DE ASA ROTATIVA, UTILIZANDO COMO BASE  
HELICÓPTEROS AW139**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Mecânica, do Departamento de Engenharia de Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Bernardo Gomes

**RIO DE JANEIRO**

**2023**

## Página destinada à inclusão da **Ficha Catalográfica**

Espaço destinado a elaboração da ficha catalográfica sob responsabilidade exclusiva da Biblioteca Central do CEFET/RJ.

Página destinada à inclusão dos **agradecimentos**, os quais serão adicionados após a apresentação e defesa do projeto.

## RESUMO

Os helicópteros possuem, além de suas asas rotativas, diversos outros componentes que, como outras máquinas rotativas, sofrem com problemas relacionados à vibração, que pode vir a prejudicar seu funcionamento com o passar do tempo. Com isso, são utilizados sistemas preditivos de acompanhamento dessa vibração, como é o caso do HUMS (*Health and Usage Monitoring System*), voltado especialmente para helicópteros. Este trabalho tem como objetivo explicar o funcionamento do sistema e sua importância para a segurança da aviação de asa rotativa, principalmente pela utilização desse sistema não ser obrigatória, ficando apenas como um requisito contratual, utilizado principalmente no ramo *offshore*. A pesquisa tem como foco as aeronaves AW139, do fabricante Leonardo Helicopters, e é baseada na utilização de materiais disponibilizados pelo fabricante e de estudos de caso reais que comprovam a importância do sistema para a segurança no ramo da aviação.

**Palavras-Chave:** Helicópteros, HUMS, AW139, Aviação, Segurança, Confiabilidade

# ABSTRACT

Helicopters have, in addition to their rotating wings, several other components that, like other rotating machines, suffer from vibration-related issues that can potentially affect their operation over time. Therefore, predictive monitoring systems are used, as the HUMS (Health and Usage Monitoring System), designed especially for helicopters. This article seeks to explain the system's functionality and its importance for the safety of rotary-wing aviation, mainly because the use of this system is not mandatory, but remains a contractual requirement, primarily in the offshore sector. The research focuses on AW139 aircraft, manufactured by Leonardo Helicopters, and is based on materials provided by the manufacturer and real case studies that confirm the system's importance for safety in the aviation sector.

**Keywords:** Helicopters, HUMS, AW139, Aviation, Safety, Reliability

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Leonardo AW139 (Fonte: Leonardo Helicopters) .....	25
Figura 2: Fuselagem do helicóptero e suas divisões (Fonte: Leonardo Helicopters) .....	26
Figura 3: Configuração Aeromédica (Fonte: O autor) .....	27
Figura 4: Configuração Cargueira (Fonte: O autor) .....	27
Figura 5: Configuração S.A.R. (Fonte: O autor) .....	28
Figura 6: Disposição dos acelerômetros na aeronave (Fonte: Software Heliwise) .....	30
Figura 7: Combined/Cockpit Voice and Flight Data Recorder (Fonte: Google) .....	31
Figura 8: Esquematização de sensor piezelétrico (Fonte: anuário da produção acadêmica docente – 2018) .....	32
Figura 9: Load Factor Sensor (Fonte: Leonardo Helicopters) .....	33
Figura 10: Tacômetro (Fonte: Leonardo Helicopters) .....	34
Figura 11: Data Acquisition Unit (Fonte: Leonardo Helicopters) .....	34
Figura 12: Modular Avionics Unit (MAU) (Fonte: Leonardo Helicopters) .....	35
Figura 13: Data Transfer Device (DTD) e Cockpit Display Unit/Data Transfer Unit (CDU/DTU) (Fonte: Leonardo Helicopters) .....	36
Figura 14: Tracker Camera (Fonte: Leonardo Helicopters) .....	38
Figura 15: Diagrama de Aquisição de Dados do HUMS (Fonte: O autor) .....	38
Figura 16: Interface inicial do Heliwise (Fonte: Software Heliwise) .....	40
Figura 17: Tendência de um certo componente e seus limites (Fonte: Software Heliwise) .....	40
Figura 18: Comportamento “Clear Rising Trend” (Fonte: Software Heliwise) .....	41
Figura 19: Comportamento “Instrumental” (Fonte: Software Heliwise) .....	41
Figura 20: Comportamento de “Step Change” (Fonte: Software Heliwise) .....	42
Figura 21: Diagrama do Tail Rotor Drive System (Fonte: Leonardo Helicopters) .....	47
Figura 22: Curva de Tendência da aquisição 079 do sensor A07 (Fonte: Heliwise) .....	48
Figura 23: Diagrama de um Pitch Control Lever .....	50
Figura 24: Esquematização da Main Rotor Head .....	52
Figura 25: Curva de Tendência da aquisição 013 do sensor A04 .....	53
Figura 26: Curvas de Tendência da aquisição 014 do sensor A05 .....	54
Figura 27: Curva de Tendência de Vibração do Main Rotor .....	54
Figura 28: Trinca no Pitch Control Lever .....	55
Figura 29: Fratura no Pitch Control Lever .....	56

# LISTA DE TABELAS

**Tabela 1: Lista de Acelerômetros do HUMS (Fonte: Software Heliwise).....44**  
**Tabela 2: Lista de Aquisições do HUMS.....45**

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 – TEMA.....	10
1.2 – JUSTIFICATIVA.....	10
1.3 – OBJETIVOS.....	11
<b>1.3.1 – Objetivo geral</b> .....	<b>11</b>
<b>1.3.2 – Objetivo específico</b> .....	<b>11</b>
1.4 – METODOLOGIA .....	12
1.5 – DESCRIÇÃO .....	12
<b>2. EMBASAMENTO TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
2.1 – CONCEITOS BÁSICOS.....	14
<b>2.1.1 – Manutenibilidade</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1.2 – Manutenção</b> .....	<b>14</b>
<b>2.1.3 – Confiabilidade</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1.4 – Disponibilidade</b> .....	<b>15</b>
2.2 – HISTÓRIA DA MANUTENÇÃO .....	15
2.3 – TIPOS DE MANUTENÇÃO.....	17
<b>2.3.1 – Manutenção Corretiva</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3.2 – Manutenção Preventiva</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3.3 – Manutenção Preditiva</b> .....	<b>18</b>
<b>2.3.4 – Manutenção Detectiva</b> .....	<b>18</b>
2.4 – INDÚSTRIA 4.0 E SEU IMPACTO .....	19
2.5 – VIBRAÇÕES.....	19
2.6 – HUMS .....	21
2.7 – CRITICIDADE .....	22
<b>3. DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>25</b>
3.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO .....	25
3.2 – AERONAVE.....	25
3.3 – MANUTENÇÃO DAS AERONAVES.....	28
3.4 – COMPONENTES CRÍTICOS.....	29
3.5 – PRINCIPAIS COMPONENTES DO HUMS.....	30
3.6 – DEMONSTRAÇÃO DO SOFTWARE E ANÁLISES GRÁFICAS .....	39
<b>4. ESTUDOS DE CASO</b> .....	<b>46</b>
4.1 – TAIL ROTOR DRIVE SHAFT FAILURE.....	46
<b>4.1.1 – Explicação do sistema</b> .....	<b>46</b>
<b>4.1.2 – Explicação do caso</b> .....	<b>48</b>
4.2 – PITCH CONTROL LEVER FAILURE.....	50
<b>4.2.1 – Explicação do sistema</b> .....	<b>50</b>
<b>4.2.2 – Explicação do caso</b> .....	<b>52</b>
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>60</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 – TEMA**

Devido ao crescimento da exploração de petróleo *offshore*, o número de funcionários em plataformas de exploração aumentou de forma considerável. Com isso, a NR-37 (Segurança e Saúde em Plataformas de Petróleo) definiu que o deslocamento de trabalhadores entre o continente e a plataforma ou entre plataformas deve ser realizado por meio de helicópteros, salvas algumas exceções. Dessa forma, o uso de helicópteros para transporte de civis da costa até a plataforma também sofreu um aumento significativo e, com esse aumento, as normas envolvendo segurança e confiabilidade das aeronaves também foram se tornando cada vez mais rigorosas.

Acompanhando o avanço dos padrões gerais de manutenção, as tecnologias foram evoluindo de forma que, hoje em dia, é possível acompanhar os principais componentes das aeronaves aplicando práticas de manutenção preditiva e detectiva, de forma que seja possível encontrar com mais precisão as causas de algumas panes e resolvê-las de forma mais rápida e segura tanto para o helicóptero quanto para a tripulação e os passageiros dentro dele.

É aí que entram os *Health and Usage Monitoring Systems – HUMS* (Sistemas de Monitoramento da Saúde e Uso) que, através de dados de vibração extraídos de diversos sensores e acelerômetros, geram indicadores e curvas de tendência de forma que se possa acompanhar o rendimento de cada um desses componentes e deduzir quando algo está fugindo do esperado, permitindo assim aplicar ações de manutenção antes da ocorrência falha e com maior precisão, em comparação com ações de manutenção corretivas e preventivas.

### **1.2 – JUSTIFICATIVA**

Em termos de operação *offshore*, o processo de manutenção de uma aeronave é altamente rigoroso e complexo, para que sejam mantidos altos padrões de segurança de voo, principalmente pelo fato de que, atualmente, é estipulado pela NR-37 que o transporte de trabalhadores do continente para as plataformas, e vice-versa, deve ser realizado através de helicópteros. Dessa

forma, muito tem-se avançado em relação a técnicas de manutenção dessas aeronaves. No entanto, a manutenção ainda passa por dificuldades, que podem ser causadas por conta da dificuldade de investimentos, ou talvez por desinformação. Além disso, para quem não está integrado ao meio, a aviação de asa rotativa ainda é muito restrita e não há muita informação disponível a respeito da manutenção de helicópteros, principalmente associando a aviação com manutenção preditiva. Essa carência por informações, se dá principalmente por conta de confidencialidades por parte dos próprios fabricantes em relação a projetos e por parte de operadores em relação à operação em si.

Apesar disso, a utilização de práticas de manutenção preditiva contribui para o aumento da disponibilidade, da confiabilidade e redução de custos. Esse trabalho se justifica justamente em trazer um pouco da importância da implementação de práticas de manutenção preditiva em aeronaves de asa rotativa, em especial os HUMS, para o meio acadêmico.

### **1.3 – OBJETIVOS**

#### **1.3.1 – Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é analisar as diferenças entre aeronaves que possuem o HUMS implementado e funcionando de forma plena com aeronaves que não estão nessas condições, de forma que sejam expostos comparados benefícios dessa prática de manutenção preditiva que demonstrem que, apesar de um certo investimento inicial, essas práticas valem a pena a médio e longo prazo, quando trazem melhorias em relação a redução de custos, maior disponibilidade e confiabilidade para as aeronaves e, conseqüentemente, para a empresa.

#### **1.3.2 – Objetivo específico**

Mostrar a ferramenta HUMS de forma completa, demonstrando o funcionamento dos equipamentos que geram informações dos componentes e suas localizações, além de mostrar quais dados são gerados, onde são armazenados e os softwares utilizados.

Demonstrar benefícios que a ferramenta traz ao operador, as empresas responsáveis pelo transporte dos passageiros, donos, locadores e locatários de helicópteros, de forma que indique o momento mais propício para que ele intervenha.

Fazer um levantamento a respeito contendo informações que destaquem a diferença entre aeronaves que utilizam o HUMS e aeronaves que não o utilizam.

#### **1.4 – METODOLOGIA**

Para a realização deste trabalho, a metodologia escolhida foi a que caracteriza a pesquisa descritiva, a qual, segundo MARCONI & LAKATOS (2003, p.186), “consistem em investigações de pesquisa empírica, cuja finalidade é o delineamento ou análise das características de fatos ou fenômenos, a avaliação de programas, ou o isolamento de variáveis principais ou chave.”

A pesquisa será realizada através de materiais disponibilizados por fabricantes ligados à aviação civil e com o apoio de livros, publicações, estudos de caso e artigos, de forma que seja possível relacionar a ferramenta HUMS com outras publicações feitas anteriormente.

Além disso, serão consideradas também informações obtidas através de análises dos dados gerados pelo sistema, a fim de demonstrar as melhorias que a ferramenta traz para as aeronaves.

#### **1.5 – DESCRIÇÃO**

O trabalho foi dividido em 4 capítulos, no qual o primeiro é a introdução, que é composta por Tema, Justificativa, Objetivos e Metodologia.

Já o segundo capítulo é composto por todo o embasamento teórico, obtido através das referências bibliográficas, necessárias para que o trabalho pudesse ter sido desenvolvido mantendo-se a qualidade a partir de conhecimentos obtidos previamente.

No terceiro capítulo, será apresentado o desenvolvimento do trabalho no qual será demonstrado o sistema de forma aprofundada, com casos reais e os

dados obtidos através da ferramenta, de forma que sejam ressaltados os principais problemas encontrados no decorrer do estudo.

Para finalizar, no capítulo 4 serão levantadas todas as conclusões obtidas por meio do desenvolvimento deste estudo.

## **2. EMBASAMENTO TEÓRICO**

### **2.1 – CONCEITOS BÁSICOS**

#### **2.1.1 – Manutenibilidade**

Segundo a NBR 5462 de 1994, criada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o conceito de manutenibilidade é definido como:

“Capacidade de um item de ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos.” (NBR 5462, 1994, p.3)

#### **2.1.2 – Manutenção**

Em 1975, a ABNT, através da norma TB-116, definiu o termo manutenção como o conjunto de todas as ações necessárias para que um item possa permanecer de acordo com uma condição específica desejada. No entanto, a ABNT trouxe uma revisão do conceito, a NBR 5462 (1994, p. 6) passou a definir manutenção como “combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”.

De acordo com KARDEC & NASCIF (2009, p. 23), o conceito da manutenção é definido como “garantir a confiabilidade e a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou de serviço, com segurança, preservação do meio ambiente e custo adequados”. Para MONCHY (1989, p. 3) “o termo ‘manutenção’ teve sua origem no vocabulário militar, cujo sentido era ‘manter, nas unidades de combate, o efetivo e o material num nível constante’ “.

De fato, existem diversas definições para a manutenção, mas é importante notar que, recentemente, por conta do aumento da importância do setor da manutenção dentro das empresas e indústrias, passou-se a incluir aspectos humanos, de confiabilidade e custos em sua definição.

### **2.1.3 – Confiabilidade**

Segundo a NBR 5462 de 1994, criada pela ABNT, o conceito de confiabilidade é definido como capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.

Já FOGLIATTO & RIBEIRO (2011, p. 2) definem que “a confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente o seu propósito especificado, por um determinado período e sob condições ambientais predeterminadas”.

### **2.1.4 – Disponibilidade**

A NBR 5462 também define o conceito de disponibilidade como:

“Capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados.” (NBR 5462, 1994, p.2)

## **2.2 – HISTÓRIA DA MANUTENÇÃO**

Segundo KARDEC & NASCIF (2009), a manutenção evoluiu através de quatro gerações principais.

A primeira abrange o período antes da Segunda Guerra Mundial e consistia em consertar equipamentos após a falha, em um momento em que a produtividade não era prioritária e a visão em relação os equipamentos era que “todos os equipamentos se desgastam com o passar dos anos, vindo a sofrer falhas ou quebras”. Essa fase foi marcada pela manutenção corretiva.

A segunda geração ocorreu após a Segunda Guerra e foi marcada por um aumento da demanda por todo tipo de produtos, além da redução da mão de obra industrial e aumento da mecanização e da complexidade das instalações industriais. Como consequência, esse período começa a evidenciar a necessidade de maior disponibilidade e confiabilidade, esperando-se também que as falhas passassem a ser evitadas cada vez mais, trazendo o conceito de

manutenção preventiva, baseada em intervalos de tempo fixos. Além disso, os custos da manutenção começam a se elevar cada vez mais em relação a outros custos operacionais, o que traz um aumento dos sistemas de planejamento e controle da manutenção.

Na terceira geração, o processo de mudança nas indústrias foi acelerado ainda mais. Houve uma preocupação crescente em relação a paralisação da produção, a qual diminuía a capacidade de produção, aumentava os custos e afetava a qualidade dos produtos. O crescimento da automação indicou que a confiabilidade e disponibilidade começam a ser cada vez mais pontos-chave para a Manutenção. Com isso, reforça-se o conceito e a utilização de manutenção preditiva, na qual os equipamentos passaram a ser monitorados através de computadores e softwares mais potentes para que fosse possível definir de forma mais precisa quando um equipamento precisaria de manutenção, ou seja, reduziram-se desperdícios em relação a trocas preventivas prematuras e tornava-se possível traçar um planejamento mais preciso e eficaz. Apesar da confiabilidade ser cada vez mais exigida, nesse momento ainda faltava uma maior interação entre as áreas de engenharia, manutenção e operação, o que ainda trazia altas taxas de falhas prematuras.

Na geração quatro, algumas das expectativas em relação a terceira geração foram mantidas. A disponibilidade é uma das formas de medir performance mais importantes da manutenção, a confiabilidade dos equipamentos é um ponto de busca permanente da manutenção e, juntos com a manutenibilidade, esses se tornam os fatores que norteiam a Engenharia da Manutenção. Nessa fase, o maior desafio da manutenção é a minimização das falhas prematuras e, nesse sentido, a prática de análise de falhas se torna uma grande aliada, capaz de melhorar a performance dos equipamentos e, conseqüentemente, da empresa. Nessa etapa, as práticas de manutenção preditiva e monitoramento de condição de equipamentos são cada vez mais utilizadas. Ao mesmo tempo, há uma redução considerável na aplicação da manutenção preventiva, visto que a sua aplicação promove a paralisação de equipamentos e sistemas. Isso também ocorre em relação à manutenção corretiva, a qual passa a servir como indicador de ineficácia da manutenção.

## **2.3 – TIPOS DE MANUTENÇÃO**

### **2.3.1 – Manutenção Corretiva**

Segundo a NBR 5462 (1994) da ABNT, este tipo de manutenção define como manutenção efetuadas após a ocorrência de panes e é destinada a recolocar um item em condições de utilização novamente.

Em outras palavras, ALMEIDA, M. T. (2000) define a manutenção corretiva como uma técnica de gerência reativa, na qual as ações de manutenção são tomadas apenas após a falha de um equipamento e define também este método como a manutenção mais cara. Para complementar essa ideia, KARDEC & NASCIF (2009, p. 39) definem que a manutenção corretiva não planejada, termo utilizado por eles para definirem a manutenção feita apenas após a ocorrência da falha, “é a correção da FALHA de maneira ALEATÓRIA”.

### **2.3.2 – Manutenção Preventiva**

Existem muitas definições de manutenção preventiva, no entanto, todas são baseadas no tempo, a própria ABNT define esse tipo de manutenção como:

“Manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.” (NBR 5462, 1994, p. 7)

Seguindo essa mesma linha, KARDEC & NASCIF (2009, p. 42) descrevem esse tipo de manutenção como “a atuação realizada de forma a reduzir ou evitar a falha ou queda no desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em INTERVALOS definidos DE TEMPO.” Em seu artigo, ALMEIDA, M. T. (2000) cita a Curva do Tempo Médio para Falha (CTMF), conhecida também como “curva da banheira”, que indica que máquinas novas possuem altas chances de falha, causadas por problemas de montagem e instalação incorretas, fabricação ou componentes defeituosos, descrevendo que após esse período inicial, a probabilidade de falha é baixa por um período considerável e que, passado esse período, a probabilidade volta a aumentar com o tempo. Segundo o autor, os reparos da manutenção preventiva são programados conforme a estatística da CTMF.

### **2.3.3 – Manutenção Preditiva**

Diferentemente das manutenções corretivas, que buscam consertar itens apenas após a falha, e preventivas, que realizam ações de manutenção de acordo com períodos específicos, as manutenções preditivas, segundo ALMEIDA (2000), possuem uma premissa de que:

“o monitoramento regular da condição mecânica real, o rendimento operacional, e outros indicadores da condição operativa das máquinas e sistemas de processo fornecerão os dados necessários para assegurar o intervalo máximo entre os reparos” (ALMEIDA, 2000, p. 4)

Segundo a mesma premissa, KARDEC & NASCIF (2009, p. 44) definem a manutenção preditiva como “a atuação realizada com base na modificação de parâmetros de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática”.

Segundo a NBR 5462 (1994), a manutenção preditiva ou manutenção controlada, pode ser definida como:

“Manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva.” (ABNT NBR 5462, 1994, p. 7)

### **2.3.4 – Manutenção Detectiva**

Segundo KARDEC & NASCIF (2009), a manutenção detectiva:

“é a atuação efetuada em sistemas de proteção, comando e controle, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operações e manutenção” (KARDEC & NASCIF, 2009, p. 47)

Os autores completam dizendo que “tarefas executadas para verificar se um sistema de proteção ainda está funcionando representam a Manutenção Detectiva”. Botões de teste de lâmpadas e alarmes em painéis e as lâmpadas que ficam nos painéis dos carros que se acendem ao virar a chave para o primeiro estágio e se apagam para indicar que está tudo correto e que se pode dar partida no veículo são bons exemplos disso. Como o autor desta monografia tem podido observar durante suas atividades em empresas desse segmento, este tipo de ação é bem comum, inclusive, em aeronaves, tanto nas de asa rotativa, quanto nas de asa fixa.

## **2.4 – INDÚSTRIA 4.0 E SEU IMPACTO**

A chegada da quarta revolução industrial, trouxe o conceito de Indústria 4.0, o qual está diretamente ligado aos últimos avanços tecnológicos e ao crescimento da internet. Com isso, torna-se cada vez mais automática e imediata a interligação entre as mais diversas máquinas e sistemas de obtenção e transmissão de dados. No entanto, esse conceito ultrapassa as relações entre sistemas e máquinas inteligentes e conectadas. Segundo SCHWAB (2016), ondas de novas descobertas ocorrem simultaneamente nas mais diversas áreas e “o que torna a quarta revolução industrial fundamentalmente diferente das anteriores é a fusão dessas tecnologias e a interação entre os domínios físicos, digitais e biológicos”, completa. Outros dois conceitos criados que complementam muito o sentido de Indústria 4.0 são o conceito de Internet das Coisas (IoT) que, segundo a ORACLE, descreve “a rede de objetos físicos incorporados a sensores, softwares e outras tecnologias com o objetivo de conectar e trocar dados com outros dispositivos e sistemas pela internet” e o conceito de Big Data, que pode ser compreendido como uma consequência do IoT e, segundo a ORACLE, pode ser definido por “um conjunto de dados maior e mais complexo, especialmente de novas fontes de dados. Esses conjuntos de dados são tão volumosos que o software tradicional de processamento de dados simplesmente não consegue gerenciá-los. No entanto, esses grandes volumes de dados podem ser usados para resolver problemas de negócios que você não conseguiria resolver antes”.

## **2.5 – VIBRAÇÕES**

É possível afirmar que as vibrações são presentes em praticamente qualquer sistema, considerando que este esteja sujeito a uma excitação. Essa premissa é válida para eixos, asas de aeronaves, tanto de asa fixa quanto de asa rotatória, para molas e amortecedores, estruturas sujeitas à ação do vento e diversos outros sistemas.

De acordo com KARDEC & NASCIF (2009, p. 244), o acompanhamento e análise de vibrações está entre os mais importantes métodos de predição da indústria, principalmente quando se trata de equipamentos rotativos. Para isso, os parâmetros de vibração analisados referentes à máquinas rotativas são definidos como deslocamento, velocidade e aceleração, onde esses três parâmetros representam o quanto o equipamento vibra no momento da medição.

Essas variáveis podem ser expressas de acordo com as seguintes fórmulas:

$$\text{Deslocamento:} \quad x = A \text{ sen } \omega t \quad (1)$$

$$\text{Velocidade:} \quad v = A\omega \text{ cos } \omega t = dx/dt \quad (2)$$

$$\text{Aceleração:} \quad a = -A\omega^2 \text{ sen } \omega t = dv/dt \quad (3)$$

Onde,

A = Amplitude do vetor de zero a pico (em mm);

$\omega$  = Velocidade angular (em rad/seg);

t = tempo (em segundos).

Além disso, outras variáveis que precisam ser consideradas são a frequência, que ajuda a identificar o ponto de origem da vibração, o que facilita a identificação de onde está o problema, e a fase, que indica onde o ponto se encontra em relação ao sensor de vibração.

Como  $\omega = 2\pi f$ , onde  $f$  = frequência (em ciclos/segundo), ao substituir as fórmulas de deslocamento, velocidade e aceleração, verificamos que:

- A amplitude de deslocamento independe da frequência;
- A amplitude de velocidade é proporcional à frequência;
- A amplitude de aceleração é proporcional ao quadrado da frequência.

Sendo as últimas duas sentenças válidas para valores constantes de amplitude de aceleração.

## 2.6 – HUMS

A definição de *Health and Usage Monitoring System*, segundo a HeliOffshore, organização colaborativa centrada no compartilhamento de informações de boas práticas sobre transportes offshore, é que são sistemas baseados em sensores que medem o desempenho e a “saúde” de componentes considerados críticos.

Em adição, segundo BARBOSA, GAMA & ALBERNAZ (2018), a ferramenta parte do princípio da manutenção preditiva, possui o objetivo de reduzir custos de manutenção e promover melhorias consideráveis em relação à confiabilidade de equipamentos, tornando a operação aérea mais segura. E completam dizendo que o monitoramento é feito através de análises comparativas do comportamento vibratório de cada componente com índices considerados satisfatórios para tais componentes, além de dados da operação ao longo do voo e diagnósticos de comportamento.

Atualmente é notável que existe uma grande busca por automatizar os processos e tornar a transferência de dados cada vez mais rápida, buscando até a disseminação de informações em tempo real. Para o sistema HUMS isso não é diferente e hoje em dia, há inclusive o que o mercado chama de Real-Time HUMS, que se baseia no envio de dados coletados pelo HUMS aos sistemas de análise de dados, para que sejam acompanhados em tempo real, aumentando dessa forma a segurança e confiabilidade das aeronaves, de forma que seja possível acompanhar os indicadores de funcionamento dos helicópteros para que seja possível uma tomada de decisão com um tempo de resposta mais rápido e preciso.

## 2.7 – CRITICIDADE

Uma das formas para definir quais componentes devem ser acompanhados é o da “Críticidade”. Trata-se de um indicador que classifica os riscos e efeitos da perda da correta funcionalidade de uma máquina específica ou, no caso de helicópteros, de um de seus componentes. A análise da criticidade se dá de acordo com a relação entre o método quantitativo que, de acordo com a ENGEMAN, refere-se à “obtenção de números críticos e confiáveis com base nas taxas de falha”, e o método qualitativo, que se trata de uma classificação de forma subjetiva, baseada no conhecimento da equipe, já que não existe uma ciência exata para se analisar nesse sentido.

Um dos métodos mais utilizados para medir a criticidade é a classificação ABC, que se baseia em perguntas e respostas a respeito do componente para informar seu nível de criticidade. Essa classificação é feita com base em seis fatores (Segurança, Qualidade do produto, Impacto na produção, Confiabilidade do componente (MTBF), Tempo de reparo (MTTR) e Custo de manutenção), onde cada um deles vai servir como suporte para classificar um componente nas categorias de criticidade A (máxima), B (média) ou C (baixa). A análise dos seis fatores pode ser feita seguindo o fluxograma abaixo:

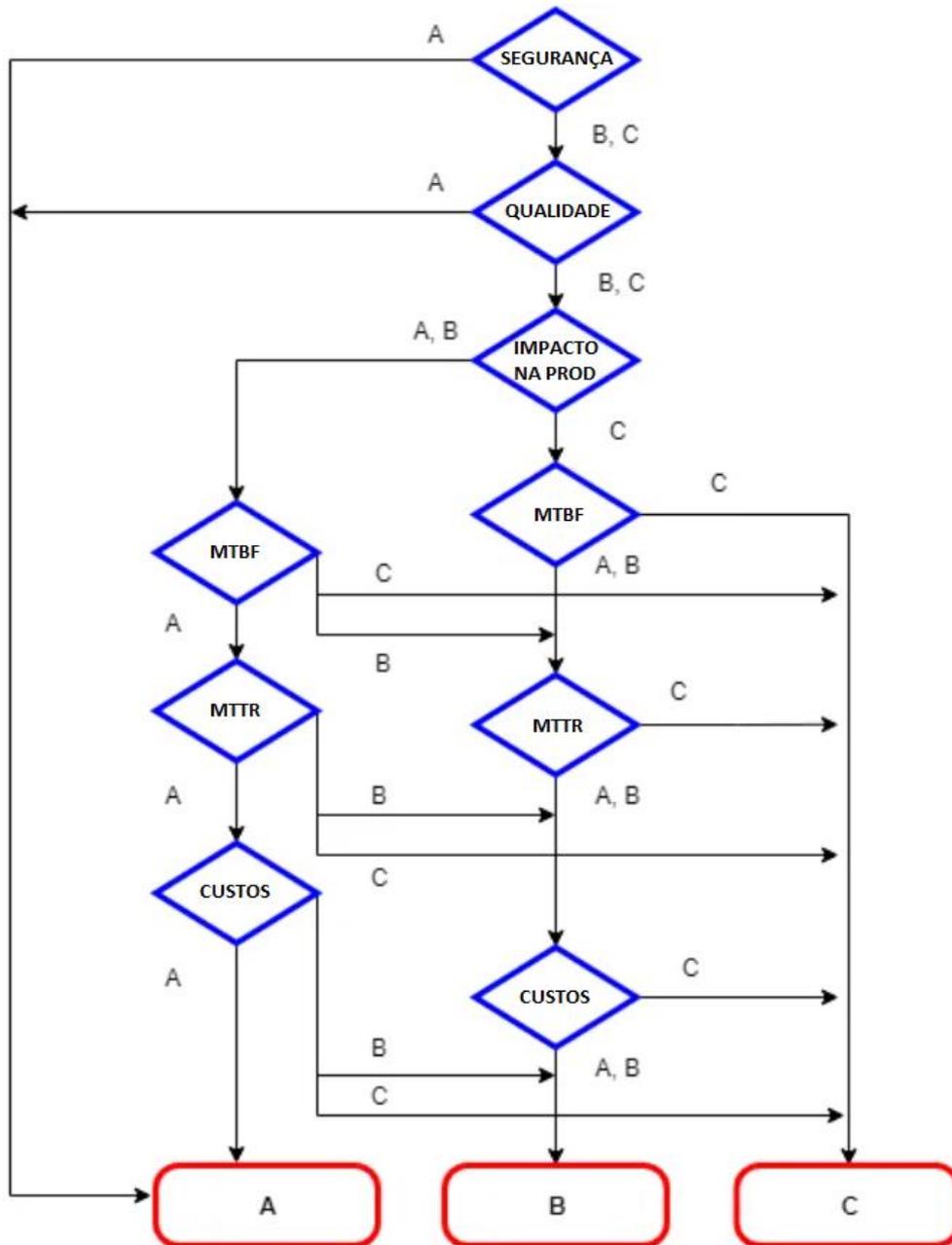


Figura 1: Fluxograma de análise dos fatores de criticidade (Fonte autoral)

Para calcular o MTBF (Tempo Médio entre Falhas) e o MTTR (Tempo Médio para Reparo), são utilizadas as seguintes fórmulas:

$$MTBF = \frac{(TD - TM)}{P} \quad (4)$$

$$MTTR = \frac{TM}{P} \quad (5)$$

Onde “TD” (Tempo Total de Disponibilidade) é o tempo total que a máquina ou componente permaneceu funcionando ativamente, “TM” (Tempo Total de Manutenção) corresponde ao tempo em que o equipamento precisou ficar parado por conta de uma manutenção ou reparo e “P” é o número de paradas por conta de reparos.

Além do método ABC, também podem ser utilizados outros métodos para medição de criticidade de equipamentos, como a matriz GUT, o RCM (Manutenção Centrada na Confiabilidade) e o FMEA (Análises de Efeito e Modo de Falha).

Tendo definida a criticidade, é possível otimizar o tempo de uso dos equipamentos ou componentes, trazendo maior produtividade, já que se torna possível montar um plano de manutenção envolvendo manutenções corretivas, preventivas e preditivas de forma a impactar positivamente na disponibilidade e produtividade da máquina.

### 3. DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

A principal aeronave que será tratada neste trabalho será o AW139, aeronave de asa rotativa da empresa italiana Leonardo Helicopters, que fabrica aeronaves para uso tanto OnShore quanto OffShore, para dar suporte a diversos segmentos, como Petróleo e Gás, Civil, Militar, além de operações de busca e resgate, médicas e cargueiras. Neste trabalho, o segmento que servirá de base será o de Petróleo e Gás, no qual muitas empresas petrolíferas exigem, através de contrato, a utilização da ferramenta de análise preditiva HUMS para aumento da confiabilidade do veículo, visando mais segurança aos funcionários e à própria operação offshore.

#### 3.2 – AERONAVE

O AW139, mostrado na figura 1, é um helicóptero bimotor multifuncional que se enquadra na categoria de helicópteros médios e, de acordo com o tipo de operação a qual for designada, alguns de seus sistemas e equipamentos são adicionados ou removidos.



*Figura 1: Leonardo AW139 (Fonte: Leonardo Helicopters)*

A fuselagem do helicóptero, conforme figura 2, pode ser dividida em duas partes principais, a seção dianteira e a seção de cauda. A seção dianteira inclui nariz, que conta com uma baia para equipamentos aviônicos, como é chamada

a parte eletrônica do helicóptero, *cockpit*, cabine, que vai variar de acordo com a configuração na qual o helicóptero se encontrar, compartimento do tanque de combustível e baia para bagagens e mais equipamentos aviônicos. Na parte superior da fuselagem dianteira, há o deck superior, que conta com o agrupamento do rotor principal, a caixa de transmissão principal e seus acessórios, além de dois motores e os dutos de exaustão. Já a seção de cauda conta com o *tail boom*, estabilizador vertical e estabilizadores de cauda, além do conjunto do rotor de cauda.

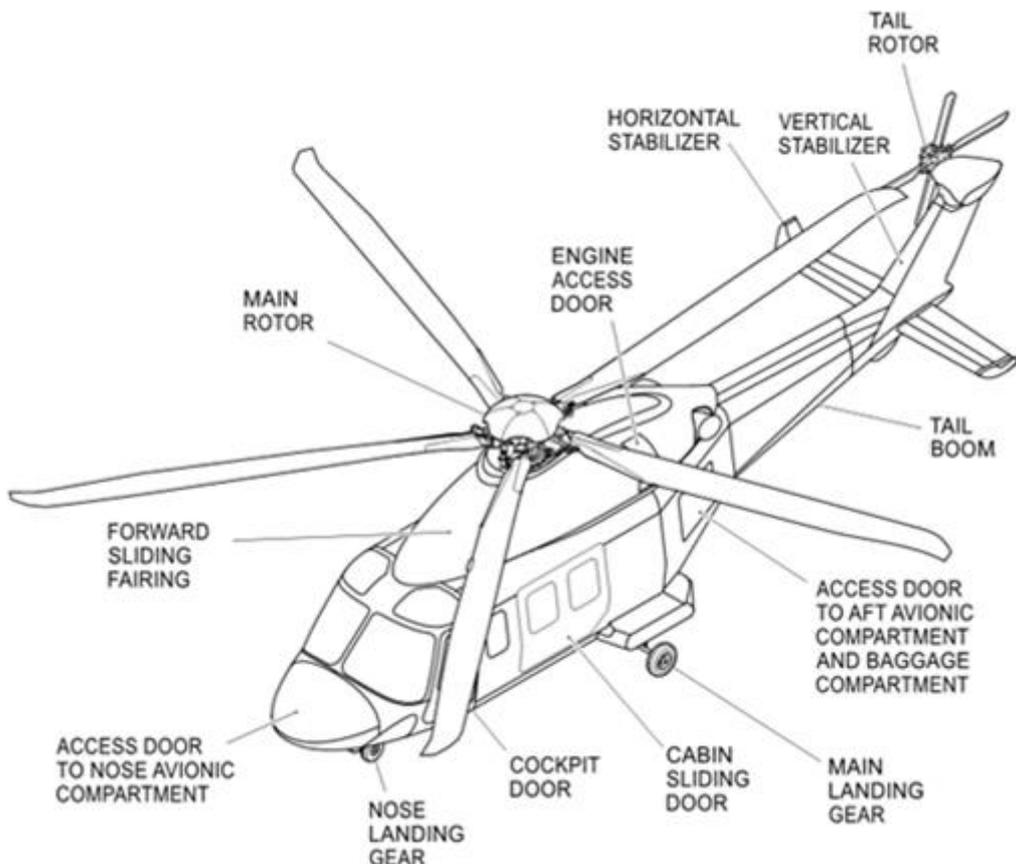


Figura 2: Fuselagem do helicóptero e suas divisões (Fonte: Leonardo Helicopters)

Para as funcionalidades, o helicóptero AW139 pode ser encontrado na configuração de transporte de passageiros, onde pode conter desde configurações com poucos assentos (seja atuando como uma classe executiva, mais luxuosa, ou com uma configuração mista, mesclando diversas configurações), até configurações para quinze passageiros, voltada exclusivamente para otimização do **transporte várias** pessoas por missão.

Além disso, pode-se encontrar aeronaves AW139 na configuração “aeromédica” (na qual conta com macas e equipamentos médicos, inclusive com

equipamentos que demandam disponibilidade de energia elétrica, conforme figura 3), voltada para resgate e suporte médico imediato, caso necessário, como no caso de tripulantes de plataformas que se acidentem ou passem mal e necessitem de encaminhamento a um hospital.



Figura 3: Configuração Aeromédica (Fonte: O autor)

Outra configuração bastante utilizada no meio *offshore* é a cargueira, conforme figura 4, na qual todos os assentos são removidos e substituídos por uma rede de carga utilizada para fixar a carga transportada e assegurar que ela seja mantida na área delimitada.



Figura 4: Configuração Cargueira (Fonte: O autor)

Uma quarta configuração bastante utilizada nessas aeronaves é a chamada S.A.R. (*Search and Rescue* – Busca e Resgate, conforme figura 5),

utilizada em ambientes mais rigorosos, como florestas densas, ou em missões específicas de busca, nos mais diversos ambientes e biomas. Nessa configuração, a aeronave é equipada com maca, *hoist* (que se trata de um guincho utilizado para rapel e içamento de pessoas, especialmente em ambientes nos quais o pouso é difícil ou impossível), e com equipamentos de iluminação especiais utilizados para auxiliar nas buscas e operações em geral.



Figura 5: Configuração S.A.R. (Fonte: O autor)

### 3.3 – MANUTENÇÃO DAS AERONAVES

A manutenção de helicópteros, em geral, é determinada pelos fabricantes em intervalos de tempo e/ou horas de voo, devido a seus altos níveis de vibração e a sua complexidade. Esses intervalos podem ser alterados, de forma a ficarem mais restritivos do que o estipulado pelos manuais, principalmente no meio de óleo e gás, onde as plataformas operadas podem se localizar muito distantes do continente e em ar extremamente salino, que ocasiona uma aceleração no desgaste de componentes, obrigando a manutenção a ser feita em intervalos ainda menores.

Os manuais são divididos pelo sistema “ATA 100”, que é um sistema padrão planejado para minimizar custos e esforços de empresas, fabricantes e operadores aéreos, de forma a facilitar o entrosamento entre essas partes. Nesse sistema, as aeronaves são divididas de forma funcional, onde cada capítulo, com seus subcapítulos, se refere a uma parte específica da aeronave, como, por exemplo, a ATA 21, que trata de “Sistema de Ar-Condicionado e

Controle do Ambiente”, ou então a ATA 32, “Trens de Pouso”, ou até mesmo a ATA 62, “Rotor Principal”.

Esses manuais de manutenção indicam dois tipos de tarefas definidas pelos fabricantes. Um deles se encontra no capítulo quatro, onde são definidas as limitações de aeronavegabilidade (*Airworthiness Limitations*), que é o plano que define as tarefas que não podem receber extensão no seu intervalo de execução, e que deve ser executada dentro do tempo limite estipulado, e caso não seja, a aeronave deve permanecer inoperante até que a ação de manutenção seja executada. O outro se trata do capítulo cinco, que define as tarefas programadas, mas com uma flexibilidade maior em sua execução. Com esses dois capítulos, é criado um PMA (Programa de Manutenção de Aeronaves), que deve ser rigorosamente seguido, sendo possíveis apenas algumas exceções que devem ser autorizadas previamente pela ANAC – Agência Nacional de Aviação. Isso tudo só é permitido caso se tenha a homologação de acordo com o RBAC (Regulamento Brasileiro de Aviação Civil) 145 – Organizações de Manutenção de Produto Aeronáutico, sem ele, as empresas não podem legalmente realizar a manutenção em aeronaves, independentemente do tipo da manutenção ou modelo e tamanho da aeronave.

### **3.4 – COMPONENTES CRÍTICOS**

Como outras aeronaves voltadas ao mercado offshore, os AW139 são bimotores, com diversos componentes considerados críticos, que são componentes que em caso de falhas, seja operando em solo ou em voo, podem causar efeitos catastróficos ao helicóptero. Alguns desses componentes críticos são até apresentados com redundância, como no caso de motores, sistemas hidráulicos e de controle de voo, para que se obtenha uma maior segurança em caso de algum tipo de pane e aumentando a confiabilidade para as aeronaves. Dentre os componentes críticos, pode-se observar também os controles acionados pelos pilotos, tanto coletivo quanto cíclico, as caixas de transmissão, eixos de transmissão, entre outros componentes.

Desses componentes críticos, alguns são monitorados pelo HUMS, através de acelerômetros, sendo alguns componentes controlados por mais de um, como ilustrado na figura 6:

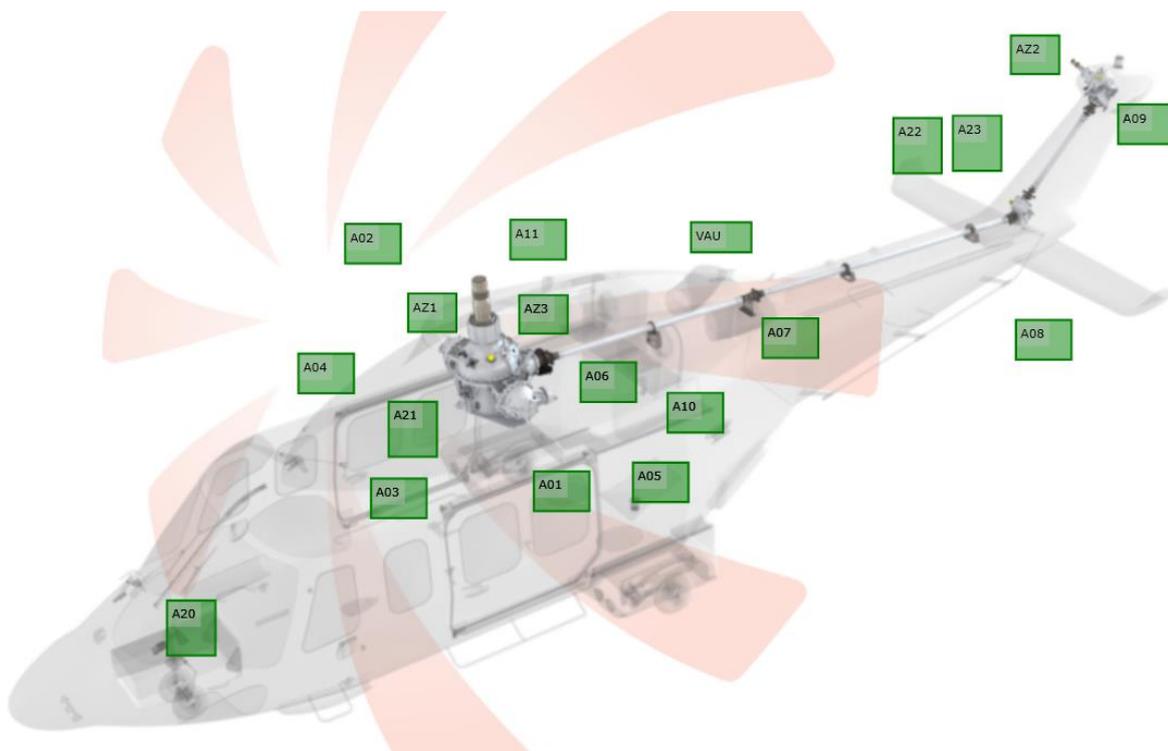


Figura 6: Disposição dos acelerômetros na aeronave (Fonte: Software Heliwise)

### 3.5 – PRINCIPAIS COMPONENTES DO HUMS

O *Health and Usage Monitoring System* (HUMS) tem por função primordial o gerenciamento da saúde e o estado operacional dos componentes e da aeronave, elevando a segurança de voo e reduzindo os custos, tanto de manutenção quanto de operação, de forma que a aeronave sendo acompanhada de forma preditiva, são reduzidos os momentos de parada para manutenção não programadas de forma mais precisa, apenas quando realmente necessário e já tendo uma noção mais direta de onde a causa do problema pode estar. O sistema pode ser dividido em duas partes principais, a parte da saúde e a parte do uso, sendo a parte da saúde voltada para o monitoramento das condições de componentes como engrenagens, rolamentos e eixos através das leituras de vibração desses componentes, e a parte do uso acompanha informações obtidas durante partidas de motores, velocidade, decolagem, entre outros, como tempo de operação, tempo de voo e outros parâmetros monitorados continuamente.

Esses dados são baixados ao final de cada voo para computadores denominados *Ground Stations* para serem armazenados e analisados de forma que seja possível acompanhar tendências dos componentes e da aeronave de forma detalhada.

Nas aeronaves AW139, de acordo com a 42ª edição do AMP do fabricante Leonardo Helicopters, o sistema HUMS é composto por vários tacômetros e acelerômetros, uma *Tracker Camera*, unidades de aquisição de dados, como a *Data Acquisition Unit (DAU)*, uma tela no *cockpit (Cockpit Display Unit – CDU)*, uma Unidade de Transferência de Dados (DTU) e um Cartão de Memória. Além disso, também conta com um *Cockpit Voice Recorder (CVR)*, um *Flight Data Recorder (FDR)* – ou até mesmo um *Combined/Cockpit Voice and Flight Data Recorder (CVFDR)*, conforme figura 7, componente que serve como substituto dos anteriores – que são componentes que equivalem a Caixa-Preta de aviões.



Figura 7: *Combined/Cockpit Voice and Flight Data Recorder* (Fonte: Google)

Para a aquisição de dados, são usados diversos sensores espalhados pelo helicóptero de forma a fazerem a leitura da vibração de alguns componentes críticos. Esses sensores não são todos iguais, tendo cada um a sua aplicação buscando leituras mais precisa e mais completa dessa vibração para que seja possível um acompanhamento de forma adequada. Dentre os sensores mais utilizados do mercado, estão os sensores eletromagnéticos e capacitivos, os sensores eletrodinâmicos de velocidade e os acelerômetros, sendo estes últimos, por sua vez, os utilizados em aeronaves de asa rotativa para a medição das vibrações.

Os acelerômetros, conforme figura 8, são designados para a parte de saúde do sistema e servem para aquisição de dados em relação à balanceamento, alinhamento, além de informações a respeito de engrenagens, bombas, pinhões, coroas e rolamentos, podendo cada um deles, fornecer até mais de dez aquisições de dados distintos e, conforme dito anteriormente, eles podem ser encontrados junto aos principais componentes mecânicos da aeronave. Inclusive, de acordo com o fabricante Leonardo Helicopters, em seu Aircraft Maintenance Publication, edição 42, é descrito que há um componente que contém mais de um acelerômetro, a Caixa de Transmissão Principal (MGB – *Main Gearbox*), que contém diversos acelerômetros instalados, para que seja possível obter o máximo de informação a respeito de sua vibração em várias direções. Seu funcionamento é baseado na ciência do sensor piezoelétrico, que são instrumentos sísmicos, dedicados a medição de vibrações absolutas em partes rígidas, tais como as carcaças dos mancais de máquinas. Em geral, são envolvidos com uma capsula protetora de metal, onde uma massa muito pequena é montada em cima de um cristal piezoelétrico, que age de forma análoga a uma mola. Dessa forma, quando o acelerômetro está sujeito a vibração, a massa exerce uma força variante no tempo sobre o cristal piezoelétrico, dando origem a uma carga elétrica, que pode ser medida em Picocoulombs ( $pC$ ), proporcional a força de excitação, o que significa que ela também é proporcional a aceleração do corpo a ser medido. Em geral, os acelerômetros possuem também amplificadores de carga, que podem ser internos ou externos, dedicados a conversão do sinal de saída do cristal piezoelétrico em uma tensão elétrica, em geral é em ordem de milivolts ( $mV$ ), que é a informação lida pelas unidades de aquisição de dados.

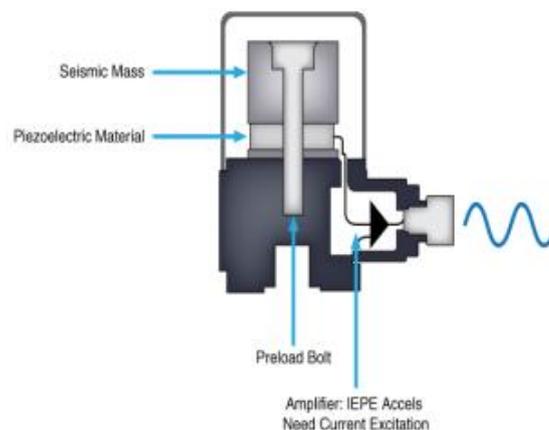


Figura 8: Esquematização de sensor piezoelétrico (Fonte: Anuário da produção acadêmica docente - 2018)

Dentre os sensores, pode-se observar diferentes tipos, para diferentes finalidades. O HUMS utiliza 11 acelerômetros, conhecidos como *Transmission Vibration Monitoring (TVM) accelerometers*, para auxiliar no monitoramento da vibração das transmissões e dos motores. O sistema também conta com 4 acelerômetros voltados a Rotor Track and Balance (RTB), que são utilizados para dar suporte a medições de vibração relacionadas a ajuste, balanceamento e rastreamento dos rotores, tanto principal quanto de cauda. Além disso, conta com um Load Factor Sensor e 3 tacômetros.

O Acelerômetro de Fator de Carga (Load Factor Sensor, conforme figura 9), que é instalado no piso da cabine para medir a aceleração vertical, a fim de que seja feito um monitoramento de uso estrutural.

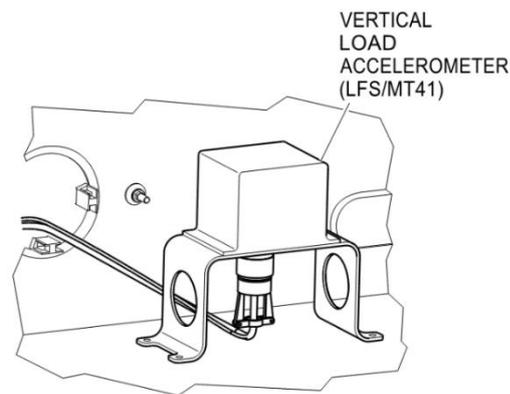


Figura 9: Load Factor Sensor (Fonte: Leonardo Helicopters)

Já os tacômetros, ilustrados na figura 10, medem a frequência dos rotores e da transmissão principal e seu funcionamento se baseia na ideia do *Magnetic Pick Up*, sendo um sensor constituído por um ímã e uma bobina que geram um campo magnético e, ao passar um objeto metálico próximo ao sensor, o campo magnético é alterado e assim se conta uma rotação. Existe um tacômetro localizado no rotor principal, um no rotor de cauda e um no eixo que sai da caixa de transmissão principal, que são utilizados para leituras de rotações por minuto. A título de curiosidade, as rotações dos componentes dos helicópteros tendem a se manter constantes em certas faixas de rotação e não é a elevação de rotação do rotor principal que faz o helicóptero subir, e sim a posição das pás, a inclinação e mudança de passo das pás que faz com que o helicóptero se movimente em qualquer direção.

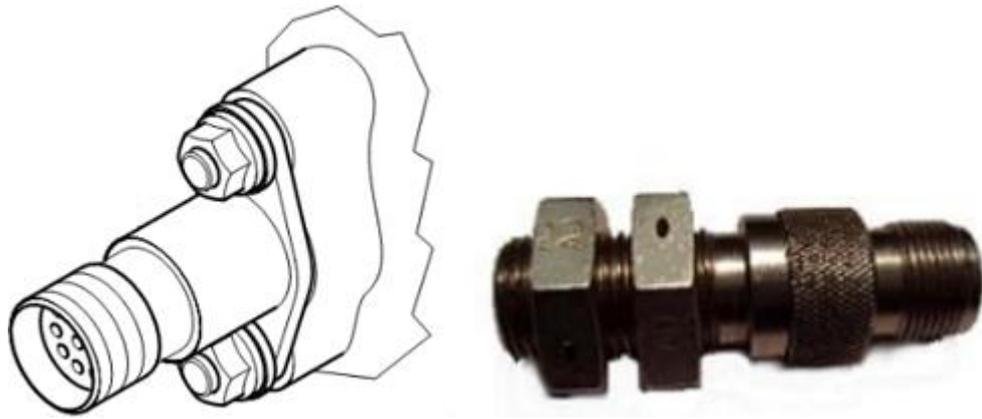


Figura 10: Tacômetro (Fonte: Leonardo Helicopters)

Conforme explicado no Aircraft Maintenance Publication (AMP), da empresa Leonardo Helicopters, em aeronaves AW139, o HUMS conta com a chamada Data Acquisition Unit (DAU), conforme figura 11, que é responsável por fazer a interface entre os sensores e o sistema do HUMS. A DAU executa todas as funções de controle e monitoramento internos do HUMS.

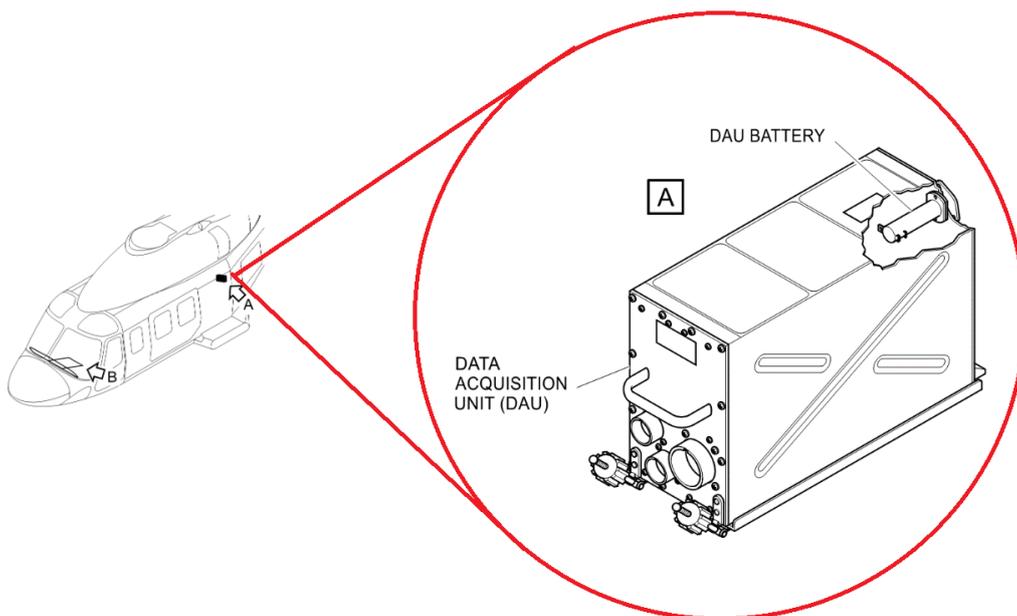


Figura 11: Data Acquisition Unit (Fonte: Leonardo Helicopters)

A DAU é composta por três subconjuntos funcionais principais. O primeiro é a Unidade Aprimorada de Processamento de Dados (*Enhanced Data Processing Unit – EDPU*), responsável por executar toda a aquisição e processamento de dados não relacionados à vibração e fornece comando e controle de todos os outros componentes do HUMS. O segundo é a Unidade de Aquisição de Vibração (*Vibration Acquisition Unit – VAU*), que executa toda a

aquisição e processamento de dados relacionados à vibração e fornece polarização para todos os acelerômetros. Já o terceiro é a Fonte de Alimentação do Rastreador e da Aquisição Auxiliar (*Auxiliary Acquisition and Tracker Power supply – AATPS*), que tem a função de adquirir sinais do Sensor de Fator de Carga, que mede e monitora as forças gravitacionais aplicadas à aeronave em diferentes situações de voo, especialmente durante manobras e mudanças bruscas de altitude, o que permite o monitoramento dos limites estruturais da aeronave.

A EDPU processará, exibirá e/ou armazenará dados conforme orientado por seu software interno e pela configuração selecionada pelo operador. Essa unidade transmite e recebe dados de e para a Unidade Aviônica Modular (MAU) da aeronave, ilustrada na figura 12.

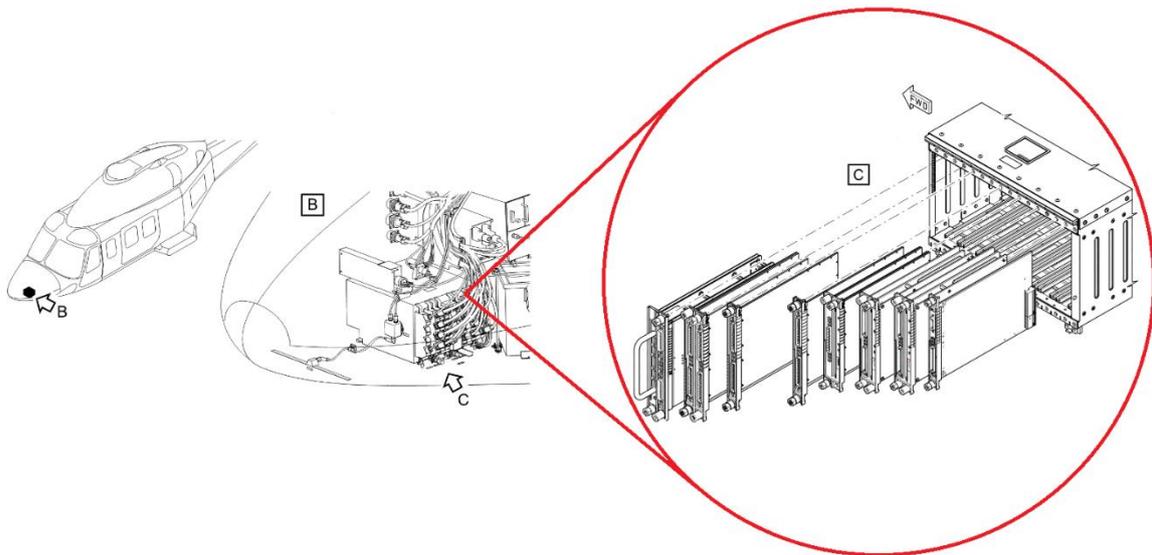


Figura 12: Modular Avionics Unit (MAU) (Fonte: Leonardo Helicopters)

A DAU processa as informações recebidas e executa as análises necessárias com base na execução de programas e dados de configuração inseridos pela estação terrestre, conhecida como Ground Station.

Por meio do Cockpit Display Unit (CDU), a DAU utiliza a EDPU para receber entradas do operador e fornecer informações visuais de volta para ele, que são gravadas pela Data Transfer Unit (DTU) no Data Transfer Device (DTD) instalado na DTU, ilustrado na figura 13.

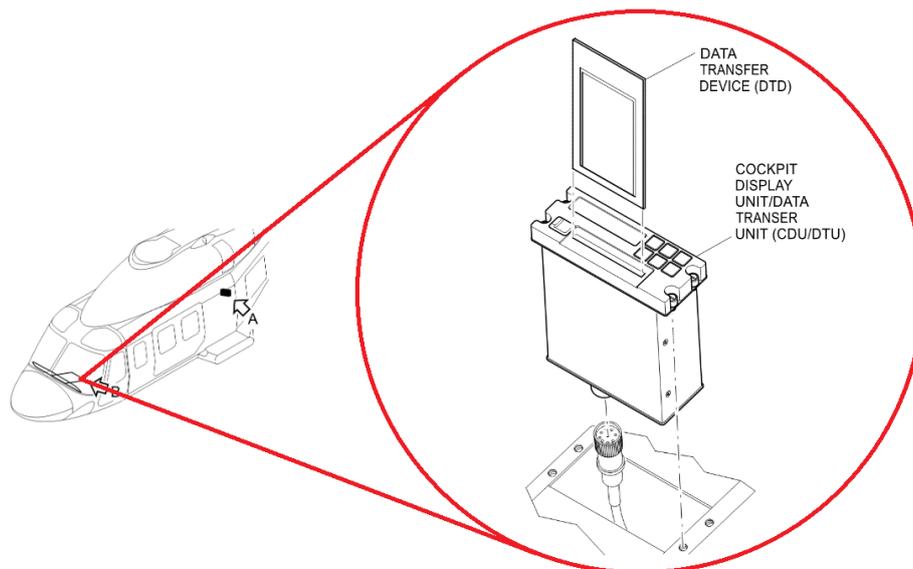


Figura 13: Data Transfer Device (DTD) e Cockpit Display Unit/Data Transfer Unit (CDU/DTU)  
(Fonte: Leonardo Helicopters)

O conjunto da VAU recebe e processa informações de frequência de vibração de transmissão e fuselagem e de velocidade. Essas informações são usadas no processamento de dados de saúde, uso e manutenção do HUMS. Se um Rotor Track and Balance (RTB) estiver instalado, a VAU também receberá essas informações e processará esses dados para operações de ajuste do rotor.

O RTB é um sistema utilizado em helicópteros para medir e corrigir o balanceamento e vibração dos rotores, que podem causar desconforto aos passageiros e tripulantes e prejudicar o desempenho da aeronave. O RTB no AW139 utiliza sensores para medir as vibrações do rotor e um software para analisar essas medições e determinar as correções necessárias.

Conforme descrito na 42ª edição do AMP do fabricante Leonardo Helicopters, o processo de RTB começa com a coleta de dados de vibração durante o voo, que é realizada por meio de sensores instalados no helicóptero. Esses sensores medem as vibrações em três eixos diferentes e os dados são transmitidos para um computador a bordo do helicóptero. O software processa esses dados e fornece informações sobre amplitude, frequência e fase das vibrações. Com base nesses dados, o software determina as correções necessárias para equilibrar o rotor. Isso pode incluir a adição ou remoção de pesos nos braços do rotor ou a mudança da inclinação das lâminas do rotor. O mecânico de manutenção responsável pelo RTB realiza essas correções e, em

seguida, o processo de medição e análise é repetido para verificar se as vibrações foram reduzidas para níveis aceitáveis.

O sistema RTB no AW139 é uma ferramenta importante para garantir a segurança e o conforto dos passageiros e tripulantes, além de ajudar a prolongar a vida útil dos componentes do rotor principal. O acompanhamento regular do balanceamento é uma prática recomendada pela fabricante do helicóptero e pelas autoridades reguladoras de aviação.

Para auxiliar no rastreamento e balanceamento dos rotores, o sistema HUMS conta ainda com a Tracker Camera, também conhecida como Enhanced Usage Tracking Camera (EUTC), que é um componente importante do sistema Health and Usage Monitoring System (HUMS) em aeronaves AW139 e funciona de forma fixa na aeronave, com três pulsos de gravação e sempre apontada para o céu. A partir disso, quando em um primeiro momento a pá da aeronave passa acima da Tracker Camera e bloqueia a luz solar, é contado um pulso e, a partir daí, o tempo que ela passa em relação a outra pá até o segundo pulso contar a desobstrução da luz solar, sabendo assim a distância entre as pás, denominado de avanço e recuo da pá. Além disso, é emitido um terceiro sinal no qual é refletido pela pá e calculada a distância que se encontra a pá, sabendo assim a diferença de altura entre elas. Vale lembrar que as pás não podem estar umas alinhadas com as outras, visto a geração de turbulência no ar, piorando assim a fluidez com que as asas rotativas permeiam o ar. A EUTC é uma câmera de alta resolução que é montada na fuselagem da aeronave e é capaz de emitir pulsos e capturar imagens de alta qualidade do rotor da aeronave durante rotação, inclusive com diferentes angulações e condições de iluminação, visto que é emitido um fecho que reflete nas pás e pode ser lido pela Tracker Camera. Esses pulsos e imagens são processados em tempo real por um software de análise de imagem integrado ao HUMS, que usa algoritmos de visão computacional para rastrear e medir com precisão o movimento das pás do rotor da aeronave. Além disso, a Tracker Camera também auxilia no cálculo de posição, velocidade e aceleração das pás do rotor. Com base nas informações coletadas pela EUTC e tratadas pelo software de análise de imagem, o sistema HUMS é capaz de monitorar continuamente a condição de balanceamento da aeronave.

No geral, a Tracker Camera (EUTC), ilustrada na figura 14, é uma ferramenta crucial para o HUMS, permitindo que os engenheiros e técnicos de manutenção monitorem a saúde e o uso de equipamentos rotativos de forma precisa e confiável, e tomem medidas e ações de manutenção preditivas minimizando o risco de falhas catastróficas e aumentando a segurança, a disponibilidade e a confiabilidade da aeronave.

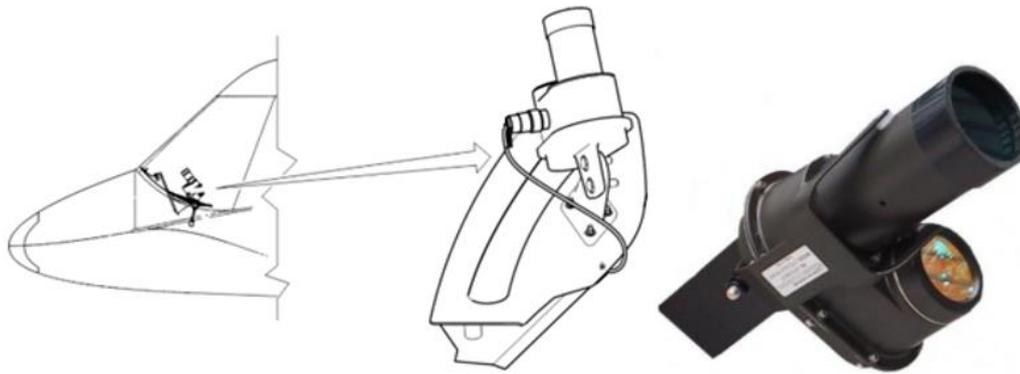


Figura 14: Tracker Camera (Fonte: Leonardo Helicopters)

Com base nas informações de descrição das partes do sistema conforme acima, é possível resumir o sistema através de um diagrama, para tornar a compreensão do sistema mais simples, conforme a figura 15 abaixo:

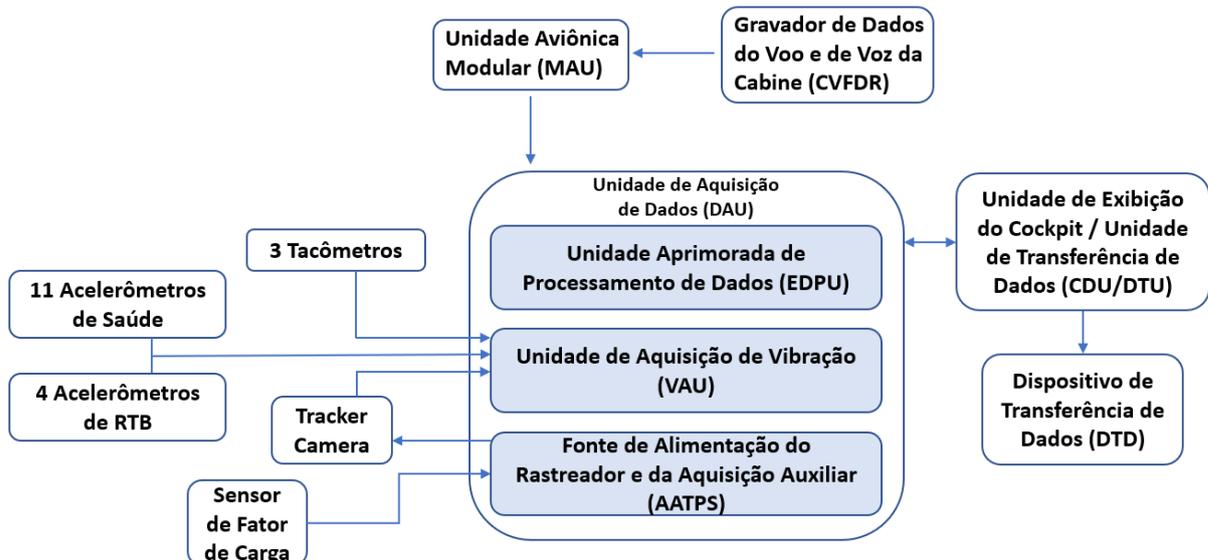


Figura 15: Diagrama de Aquisição de Dados do HUMS (Fonte: O autor)

### 3.6 – DEMONSTRAÇÃO DO SOFTWARE E ANÁLISES GRÁFICAS

O Heliwise é um software que fornece soluções para a análise de dados relacionados à manutenção e segurança de helicópteros. Este software usa algoritmos para analisar dados de sensores e registros de manutenção para identificar anomalias e prever possíveis falhas mecânicas.

O funcionamento do Heliwise começa com a coleta de dados de sensores instalados no helicóptero, que incluem informações sobre a temperatura, vibração, pressão, consumo de combustível e outros fatores importantes. Esses dados são enviados para o banco de dados, onde são armazenados e processados pelo software. Com base nesses dados, o Heliwise é capaz de prever possíveis falhas mecânicas e recomendar ações corretivas antes que um problema ocorra. Além disso, o software também é capaz de gerar relatórios de manutenção automatizados, que ajudam as equipes de manutenção a gerenciar o ciclo de vida do helicóptero com mais eficiência. Outra funcionalidade importante do Heliwise é a capacidade de integrar dados de várias fontes, incluindo dados de sensores de diferentes fabricantes, registros de manutenção e outras fontes de dados externas. Essa integração de dados permite que o Heliwise forneça insights mais precisos e relevantes para as equipes de manutenção.

Em resumo, o Heliwise é um software avançado utilizado para analisar dados de sensores e registros de manutenção de helicópteros, com o objetivo de identificar anomalias e prever possíveis falhas mecânicas. O software fornece insights valiosos para as equipes de manutenção, ajudando a maximizar a segurança e eficiência operacional dos helicópteros. Com isso, o software é uma ferramenta essencial para as operações de helicópteros, permitindo que as equipes de manutenção monitorem o desempenho dos equipamentos de forma mais eficiente, reduzindo o tempo de inatividade e aumentando a segurança.

A interface inicial do software, ilustrada na figura 16, se dá de forma a mostrar todas as aeronaves às quais são acompanhadas por ele, de forma a mostrar de forma simples se há alguma anomalia ou algo fora do normal, através de *flags* já nessa página inicial.

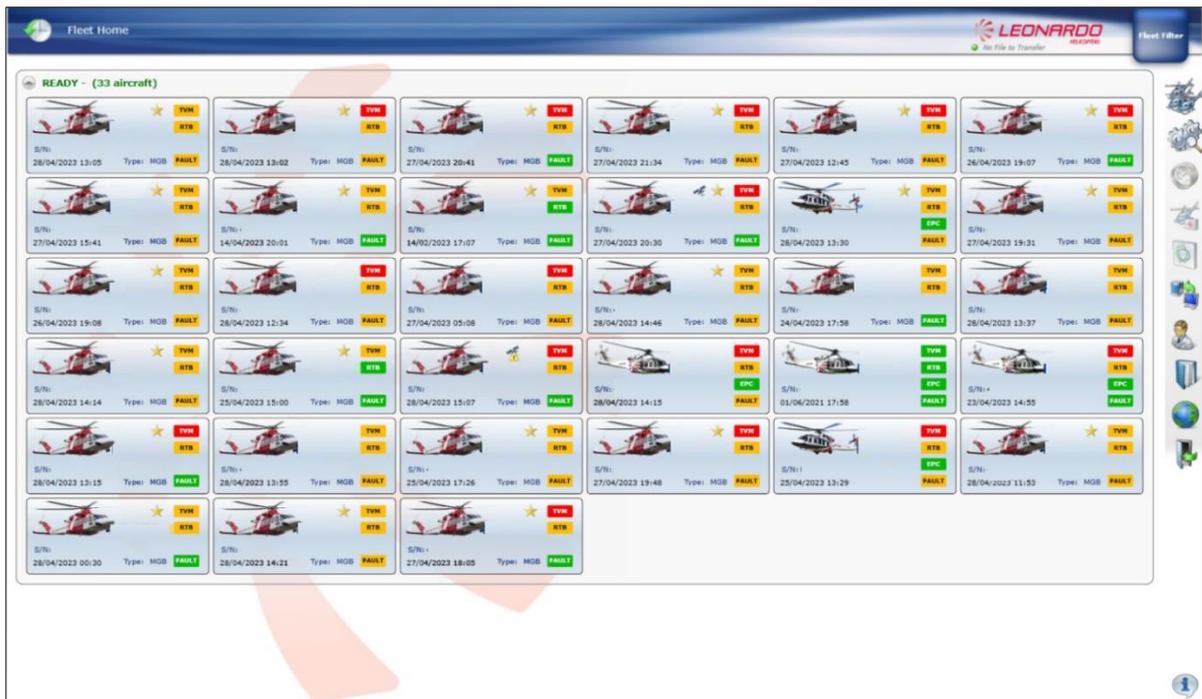


Figura 16: Interface inicial do Heliwise (Fonte: Software Heliwise)

No Heliwise é possível acompanhar a saúde das aeronaves através de gráficos de tendência de cada aquisição dos sensores do HUMS, de forma que se torna possível prever quando um componente está caminhando para uma falha. Os gráficos de tendência se dão conforme a figura 17:

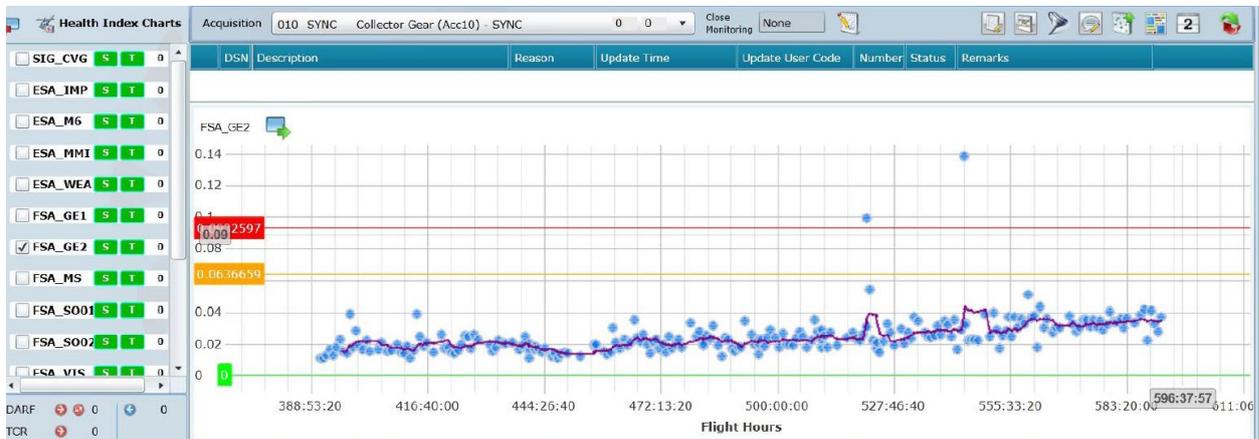


Figura 17: Tendência de um certo componente e seus limites (Fonte: Software Heliwise)

A imagem acima mostra um gráfico onde cada ponto é uma aquisição e existem as faixas de trabalho do componente onde abaixo da faixa âmbar, a aeronave está voando dentro de seus limites ideais de operação, entre a faixa âmbar e a vermelha começam a aparecer os chamados alertas âmbar, que são sinalizados pelas flags na página inicial do software, e, de acordo com os fabricantes, a aeronave pode decolar e operar sem problemas. Já acima da faixa

vermelha, por ordem dos fabricantes, a aeronave não pode decolar até que sejam tomadas ações para verificação e manutenção do componente que sofreu o alerta. Esses limites são denominados *thresholds*.

A partir desse gráfico de aquisições, é possível observar alguns tipos de comportamentos de tendência fora do comum, que são comportamentos que necessitam de acompanhamento. O primeiro deles é o chamado “*Clear Rising Trend*”, que é quando há uma tendência de subida no gráfico e, ilustrado na figura 18, normalmente, indica que algum componente está com baixa eficiência ou até mesmo com a perda de sua função. O segundo tipo é o conhecido como “*Instrumental*”, que ocorre, geralmente, por conta de problemas de fixação dos acelerômetros ou problemas em suas cablagens e, nesse tipo de gráfico, conforme ilustrado na figura 19, o problema é de fácil resolução. Já o terceiro tipo é o denominado “*Step Change*”, observado na figura 20, que, na maioria das vezes em que esse comportamento é observado, trata-se de alguma substituição de componente, que ocasionou em um novo padrão de comportamento.

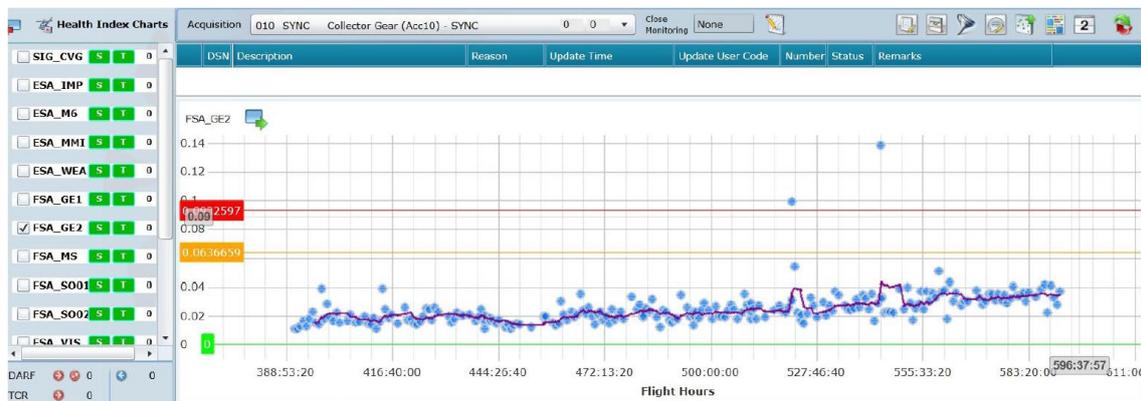


Figura 18: Comportamento “*Clear Rising Trend*” (Fonte: Software Heliwise)



Figura 19: Comportamento “*Instrumental*” (Fonte: Software Heliwise)

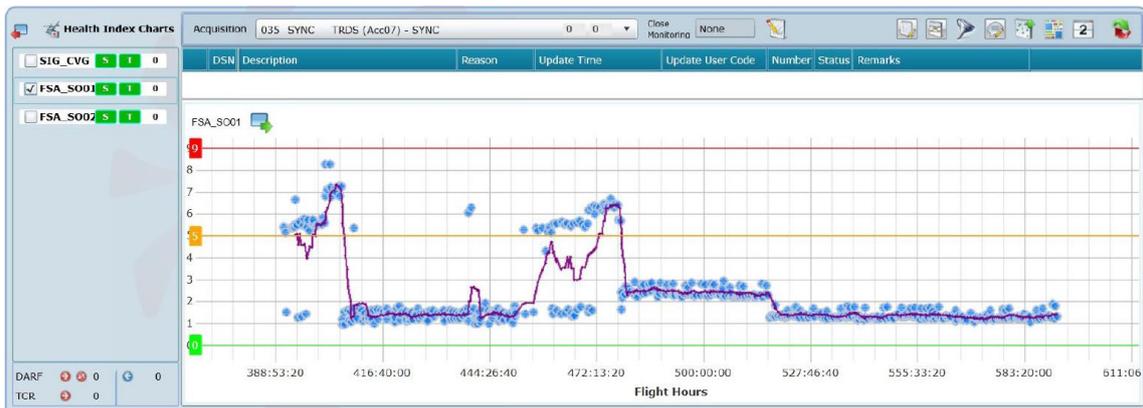
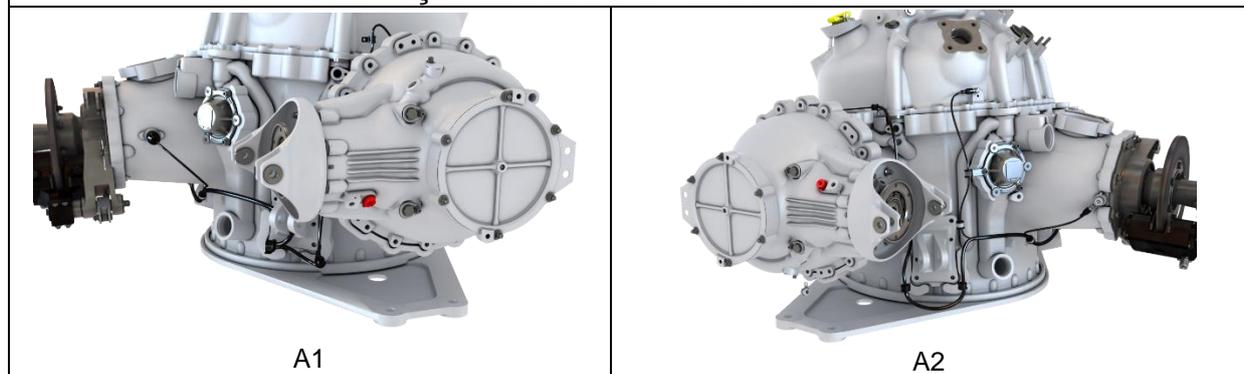


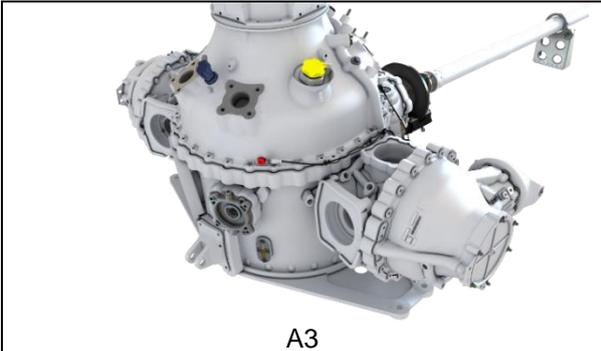
Figura 20: Comportamento de “Step Change” (Fonte: Software Heliwise)

A partir dessas indicações e com informações padrão de medidas e rotações de cada componente, é possível fazer a identificação do componente ou área está sendo monitorada de acordo com o acelerômetro, utilizando a frequência de trabalho específica, que é pré-configurada na Unidade de Aquisição de Dados (DAU) pelo próprio fabricante da ferramenta. Abaixo, nas tabelas 1 e 2, estão listados todos os acelerômetros, com sua localização e função, e todas as aquisições acompanhadas em aeronaves AW139:

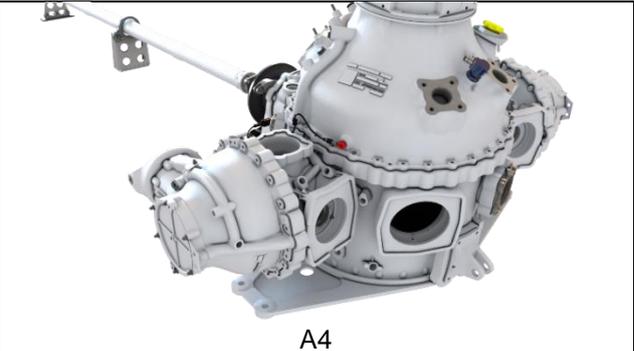
Acelerômetro	Localização	Função
A1	Motor #1	Transmission Vibration Monitoring
A2	Motor #2	Transmission Vibration Monitoring
A3	Frente da Annulus Gear	Transmission Vibration Monitoring
A4	Direita da Annulus Gear	Transmission Vibration Monitoring
A5	Traseira da Annulus Gear	Transmission Vibration Monitoring
A6	Saída do Tail Drive Shaft	Transmission Vibration Monitoring
A7	Rolamento do Tail Drive Shaft	Transmission Vibration Monitoring
A8	Caixa de Transmissão Intermediária	Transmission Vibration Monitoring
A9	Caixa de Transmissão de Cauda	Transmission Vibration Monitoring
A10	2º estágio do Motor #1	Transmission Vibration Monitoring
A11	2º estágio do Motor #2	Transmission Vibration Monitoring
A20	Abaixo do piso do Cockpit	Rotor Track & Balance
A21	Lateral da Main Gearbox	Rotor Track & Balance
A22	Tail Rotor Radial	Rotor Track & Balance
A23	Tail Rotor Axial	Rotor Track & Balance

#### Localização dos acelerômetros na Aeronave

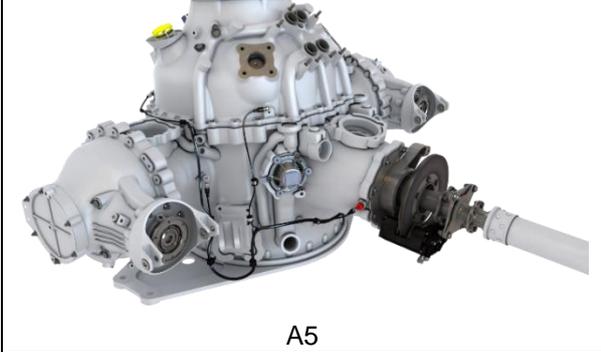




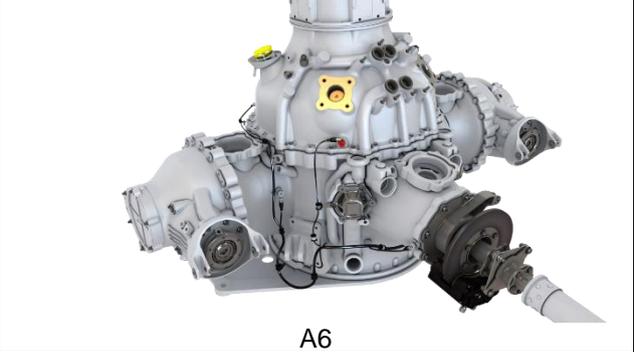
A3



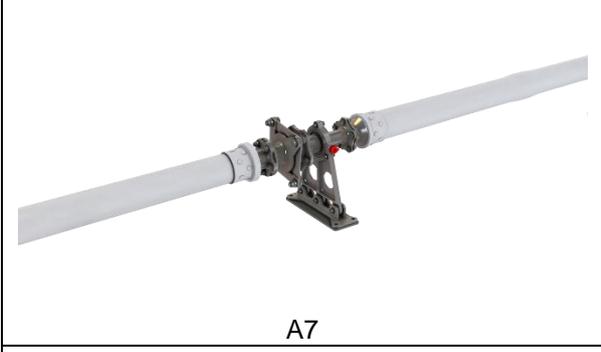
A4



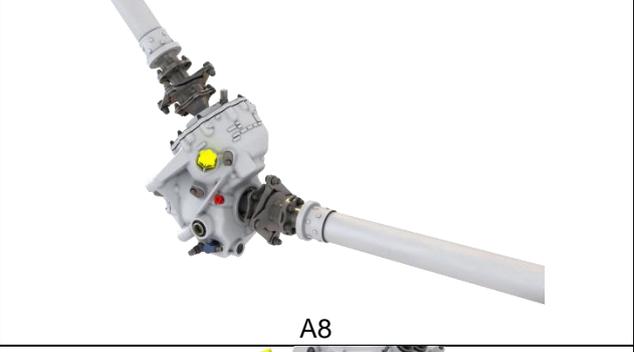
A5



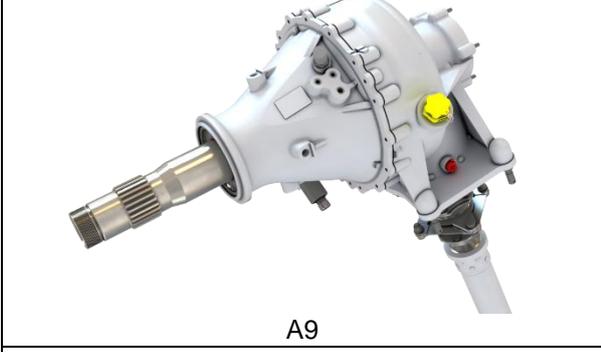
A6



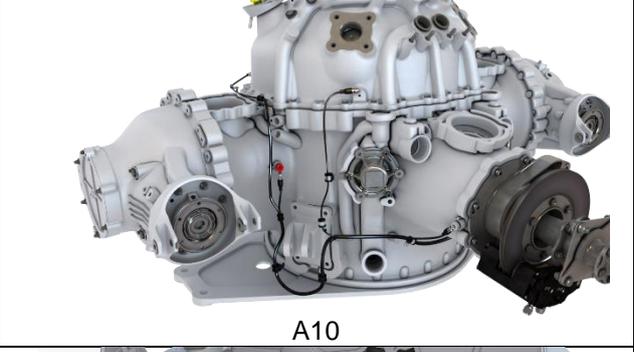
A7



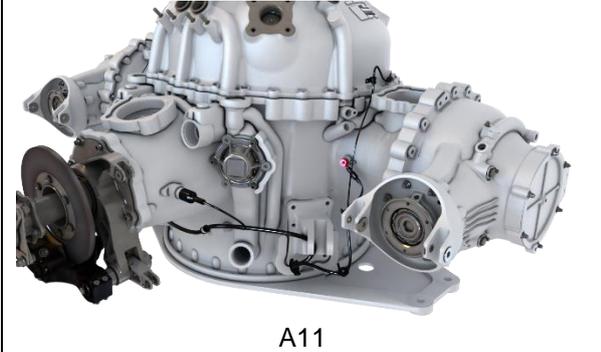
A8



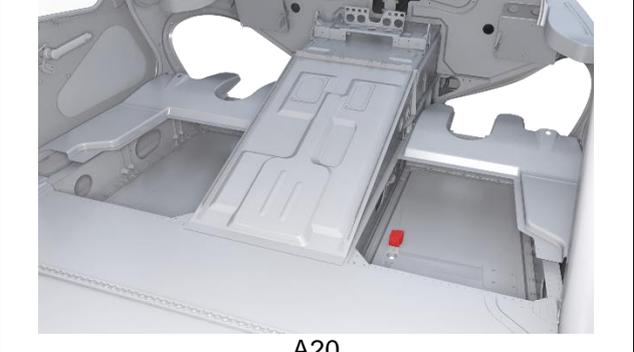
A9



A10



A11



A20

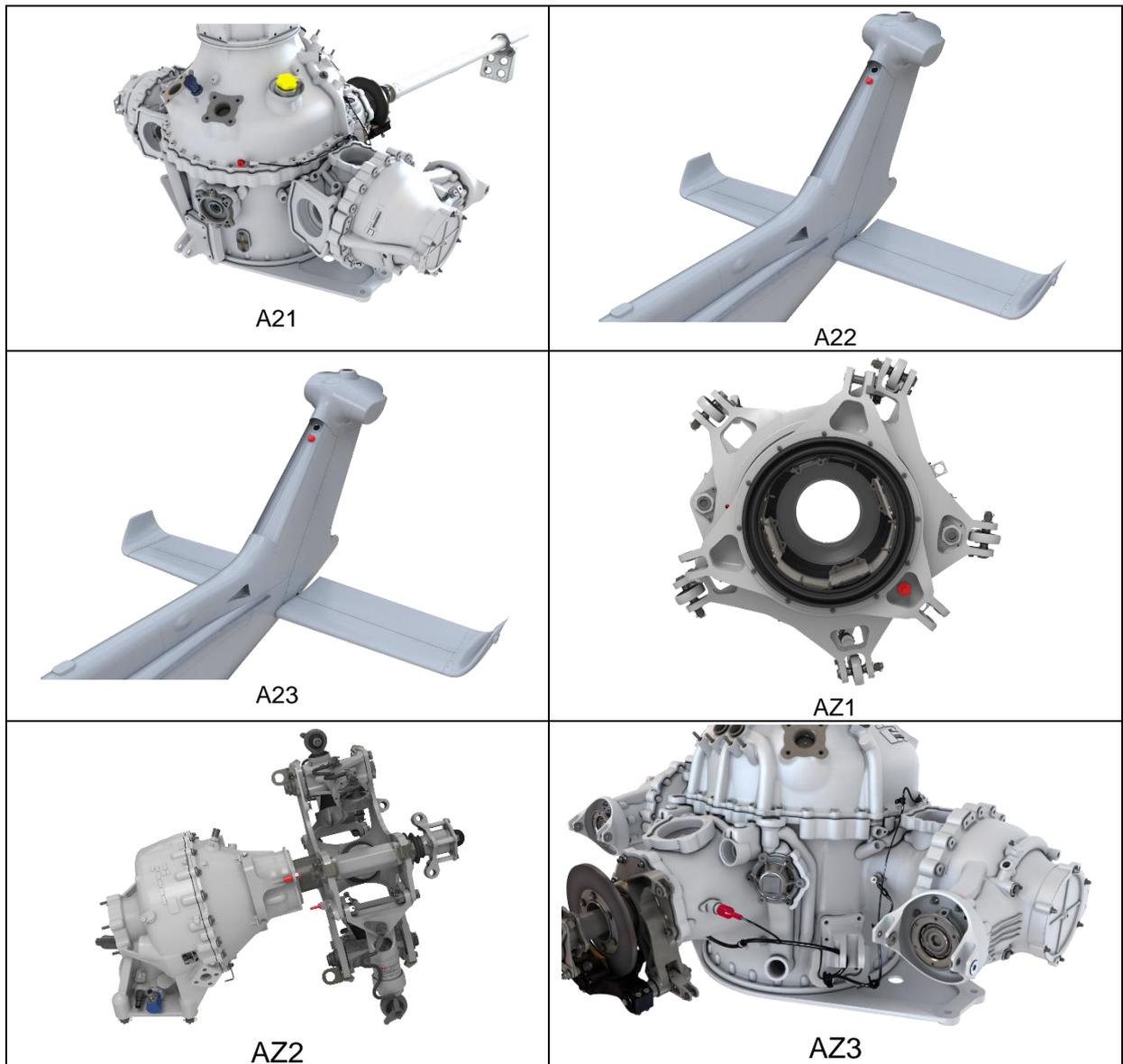


Tabela 1: Lista de Acelerômetros do HUMS (Fonte: Software Heliwise)

Aqc	Identificação	Acc	Aqc	Identificação	Acc	Aqc	Identificação	Acc	Aqc	Identificação	Acc
1	1ª Stg Pin LH	1	39	IGB Gear	9	86	Hyd Pump 2 Brg	11	137	M/R Mast SNFA Ball Brg	3
2	1ª Stg Gear LH	1	40	Hyd Pump/Alt Pin 1	10	87	Ac Generator 2 Brg	11	138	M/R Mast Roller Brg	3
3	2ª Stg Ping LH	10	41	Hyd Pump Gear 1	10	93	Hyd Pump 3 Brg	3	139	M/R Mast SKF Ball Brg	4
4	1ª Stg Pin RH	2	42	Alternator Gear	10	94	E.C.S Brg	3	140	M/R Mast SNFA Ball Brg	4
5	1ª Stg Gear RH	2	43	Hyd Pump/Alt Pin 2	11	95	Oil Cooler Brgs	6	141	M/R Mast Roller Brg	4
6	2ª Stg Ping RH	11	44	Hyd Pump Gear 2	11	96	1ª Stg Pin LH Dupler Brg	1	142	M/R Mast SKF Ball Brg	5
10	Collector Gear	10	45	Alternator Gear 2	11	97	1ª Stg Pin LH Roller Brg	1	143	M/R Mast SNFA Ball Brg	5
11	Collector Gear	11	55	Lub Pump Gear 1	10	98	1ª Stg Gear LH Ball Brg	1	144	M/R Mast Roller Brg	5
12	Anunulus Gear	3	56	Lub Pump Gear 2	11	99	1ª Stg Gear LH Roller Brg	1	145	TTO Pin SKF Ball Brg	6
13	Anunulus Gear	4	57	Hyd Pump Gear 3	3	100	Freewheel Ball LH Brg 1	1	146	TTO Pin SNFA Ball Brg	6
14	Anunulus Gear	5	58	E.C.S Spare Gear	3	101	Freewheel Ball LH Brg 2	1	147	TTO Pin Roller Brg	7
15	Sun Gear	3	59	Oil Cooler Pin	6	102	2ª Stg Pin LH SKF Tplx Brg	10	148	Hangar Ball Brg	8
16	Sun Gear	4	60	Oil Cooler Gear	6	103	2ª Stg Pin LH SNFA Tplx Brg	10	149	IGB Pin Duplex Brg	8
17	Sun Gear	5	61	1ª Stg Pin LH Brgs	1	104	2ª Stg Pin LH Roller Brg	10	150	IGB Pin Roller Brg	8
18	Planet Gear 1	3	62	1ª Stg Gear LH Brgs	1	105	1ª Stg Pin RH Duplex Brg	2	151	IGB Gear Duplex Brg	8
19	Planet Gear 1	4	63	2ª Stg Pin LH Brgs	10	106	1ª Stg Pin RH Roller Brg	2	152	IGB Gear Roller Brg	8
20	Planet Gear 1	5	64	1ª Stg Pin RH Brgs	2	107	1ª Stg Gear RH Ball Brg	2	153	TGB Pin Duplex Brg	9
21	Planet Gear 2	3	65	1ª Stg Gear RH Brgs	2	108	1ª Stg Gear RH Roller Brg	2	154	TGB Pin Roller Brg	9
22	Planet Gear 2	4	66	2ª Stg Pin Rh Brgs	11	109	Freewheel Ball RH Brg 1	2	155	TGB Gear Duplex Brg	9
23	Planet Gear 2	5	70	Collector Gear Brgs	10	110	Freewheel Ball RH Brg 2	2	156	TGB Gear Roller Brg	9
24	Planet Gear 3	3	71	Collector Gear Brgs	11	111	2ª Stg Pin RH SKF Tplx Brg	11	157	Hyd Pump 1 SKF Duplex Brg	10
25	Planet Gear 3	4	72	Planet Gear Brgs	3	112	2ª Stg Pin RH SNFA Ball Brg	11	158	Hyd Pump 1 SNFA Duplex Brg	10
26	Planet Gear 3	5	73	Planet Gear Brgs	4	113	2ª Stg Pin RH Roller Brg	11	159	AC Generator 1 SKF Duplex Brg	10
27	Planet Gear 4	3	74	Planet Gear Brgs	5	125	Collector Gear SKF Ball Brg	10	160	AC Generator 1 SNFA Duplex Brg	10
28	Planet Gear 4	4	75	M/R Mast Brgs	3	126	Collector Gear SNFA Ball Brg	10	161	Hyd Pump 2 SKF Duplex Brg	11
29	Planet Gear 4	5	76	M/R Mast Brgs	4	127	Collector Gear SKF Roller Brg	10	162	Hyd Pump 2 SNFA Duplex Brg	11
30	Planet Gear 5	3	77	M/R Mast Brgs	5	128	Collector Gear SNFA Roller Brg	10	163	AC Generator 2 SKF Duplex Brg	11
31	Planet Gear 5	4	78	TTO Pin Brgs	6	129	Collector Gear SKF Ball Brg	11	164	AC Generator 2 SNFA Duplex Brg	11
32	Planet Gear 5	5	79	Hangar Ball Brg	7	130	Collector Gear SNFA Roller Brg	11	182	Hyd Pump 3 SKF Duplex Brg	3
33	Collector Gear	6	80	IGB Pin Brgs	8	131	Collector Gear SKF Roller Brg	11	183	Hyd Pump 3 SNFA Duplex Brg	3
34	TTO Pinion	6	81	IGB Gear Brgs	8	132	Collector Gear SNFA Roller Brg	11	184	E.C.S SKF Duplex Brg	3
35	TRDS	7	82	TGB Pin Brgs	9	133	Planet Gear Brg	3	185	E.C.S SNFA Duplex Brg	3
36	IGB Pin	8	83	TGB Gear Brgs	9	134	Planet Gear Brg	4	186	Oil Cooler SKF Duplex Brg	6
37	IGB Gear	8	84	Hyd Pump 1 Brg	10	135	Planet Gear Brg	5	187	Oil Cooler SNFA Duplex Brg	6
38	IGB Pin	9	85	Ac Generator 1 Brg	10	136	M/R Mast SKF Ball Brg	3			

Tabela 2: Lista de Aquisições do HUMS

## 4. ESTUDOS DE CASO

Os estudos de caso apresentados abaixo tratam-se de situações reais onde o sistema HUMS detectou falhas que aconteceriam e que poderiam ser catastróficas caso não tivessem sido devidamente detectadas e tratadas. Serão apresentados detalhes sobre o funcionamento do componente e/ou sistema afetado, como a falha ocorreria, situação na qual foi detectada a falha, metodologia adotada para a resolução, bem como outros pontos relevantes do cenário em questão.

### 4.1 – TAIL ROTOR DRIVE SHAFT FAILURE

#### 4.1.1 – Explicação do sistema

O Eixo de Transmissão do Rotor de Cauda (*Tail Rotor Drive Shaft – TRDS*) é responsável por transmitir o movimento rotatório da *Main Gearbox para a Tail Gearbox* de forma a interligar o movimento do rotor principal com o movimento do rotor de cauda. Dessa forma, trata-se de um sistema de grande importância para a movimentação e controle da aeronave. O *TRDS* consiste de uma série de eixos de acionamento, amortecedores, acoplamentos flexíveis e rolamentos.

Os eixos de acionamento podem ser separados em três, especificamente. O eixo número 1 é instalado na parte superior da aeronave, na saída da caixa de transmissão principal (*Main Gearbox – MGB*), através da parede de fogo traseira, saindo diretamente da caixa de transmissão principal e indo até o suporte do rolamento entre o eixo 1 e o eixo 2. O eixo número 2 é instalado no início da seção de cauda, entre o suporte do rolamento e a a caixa de transmissão intermediária (*Intermediate Gearbox – IGB*), ao longo do chamado *Tail Boom*, conforme ilustrado anteriormente, ao detalhar as seções da aeronave e trata-se de um componente crítico controlado por conta do risco de ressonância, que pode ocorrer durante a partida e desligamento da aeronave. Já o eixo 3 é instalado após a Caixa de Transmissão Intermediária (IGB) e vai até a Caixa de Transmissão de Cauda (*Tail Gearbox – TGB*).

Além disso, são instalados amortecedores, chamados “*dampers*”, ao longo dos eixos 1 e 2, e fixados na estrutura, que servem para reduzir a vibração transmitida para a estrutura da aeronave. Nas extremidades dos eixos são instalados acoplamentos flexíveis, totalizando 5, que servem para alinhar os eixos com os componentes aos quais são ligados, o eixo 1 com a saída da *MGB*, o eixo 2 com o suporte do rolamento em uma extremidade e com a entrada da *IGB* em outra, e o eixo 3 com com a saída da *IGB* em uma extremidade e com a entrada da *TGB*.

Por último, o sistema conta com um mancal com rolamento e é posicionado entre o eixo 1 e o eixo 2. Esse mancal conta com um rolamento de esferas que auxilia na transmissão do movimento de um eixo para o outro e no suporte dos eixos na estrutura. Nesse mancal é acoplado um dos acelerômetros utilizados no sistema HUMS a fim de que seja monitorada a vibração do sistema de forma geral e é instalado nesta posição justamente pelo fato do eixo 2 ser um componente crítico, com risco de ressonância. Abaixo, na figura 21, é possível observar o sistema do TRDS detalhadamente:

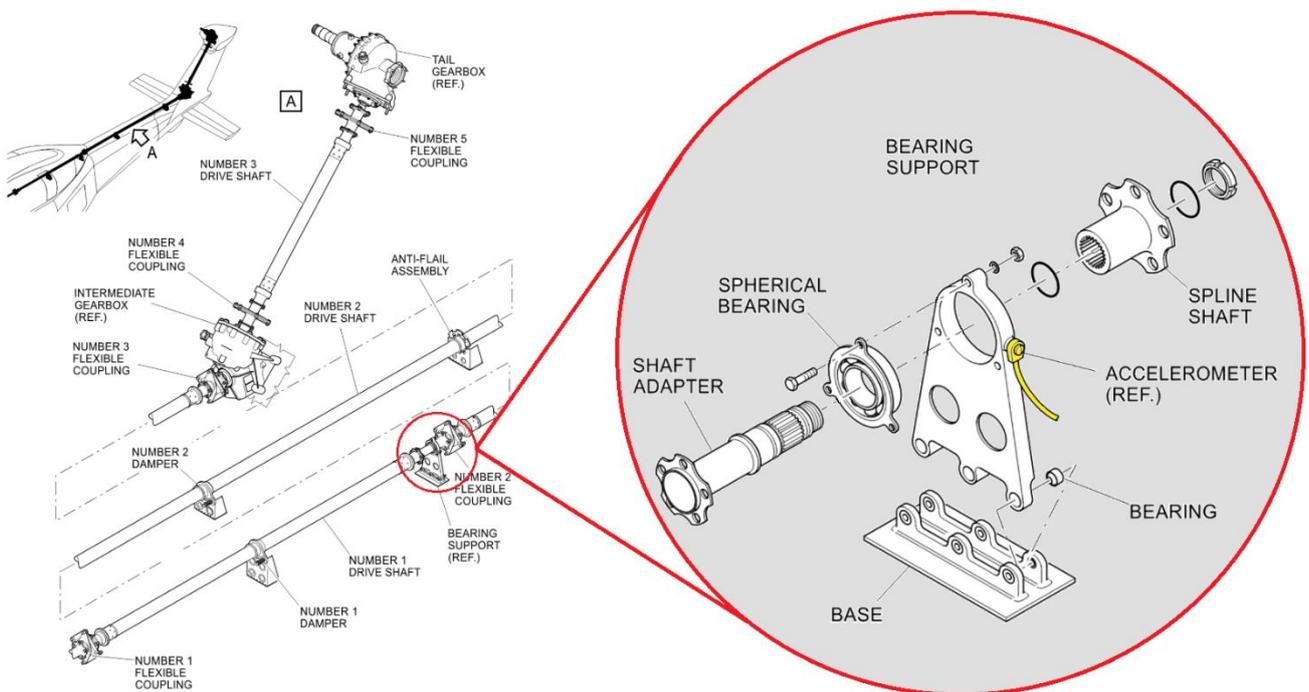


Figura 21: Diagrama do Tail Rotor Drive System (Fonte: Leonardo Helicopters)

Nessa figura, pode-se observar que o TRDS é um sistema extenso e complexo, de extrema importância para a aeronave. Nesse caso, o foco é justamente o suporte do rolamento, conforme destacado, onde é instalado um

acelerômetro do HUMS, a fim de que sejam acompanhadas as medições de vibração do componente. Esse suporte é localizado logo no início da cauda da aeronave, de modo que uma falha neste ponto pode causar o desmembramento seguido de perda da cauda da aeronave durante voo, por falha catastrófica, causando a queda da aeronave, com possibilidade de fatalidades.

#### 4.1.2 – Explicação do caso

Durante a verificação de tendência, que ocorre entre voos através da leitura de cartão “Data Transfer Device (DTD)” do HUMS, foi detectada uma elevação na curva de aquisições de vibração referentes ao acelerômetro que acompanha o rolamento do Eixo de Acionamento do Rotor de Cauda. Como pode ser visto na figura 22, o sistema ainda não tinha ultrapassado a faixa de indicação âmbar, mas é possível que a indicação fosse sinalizada no próximo voo. A partir desses dados, foi realizado contato em conjunto com o suporte do fabricante a respeito da tendência, seguido de uma inspeção detalhada da área na qual o acelerômetro em questão é posicionado, a fim de entender o que poderia estar causando essa elevação na vibração do local.

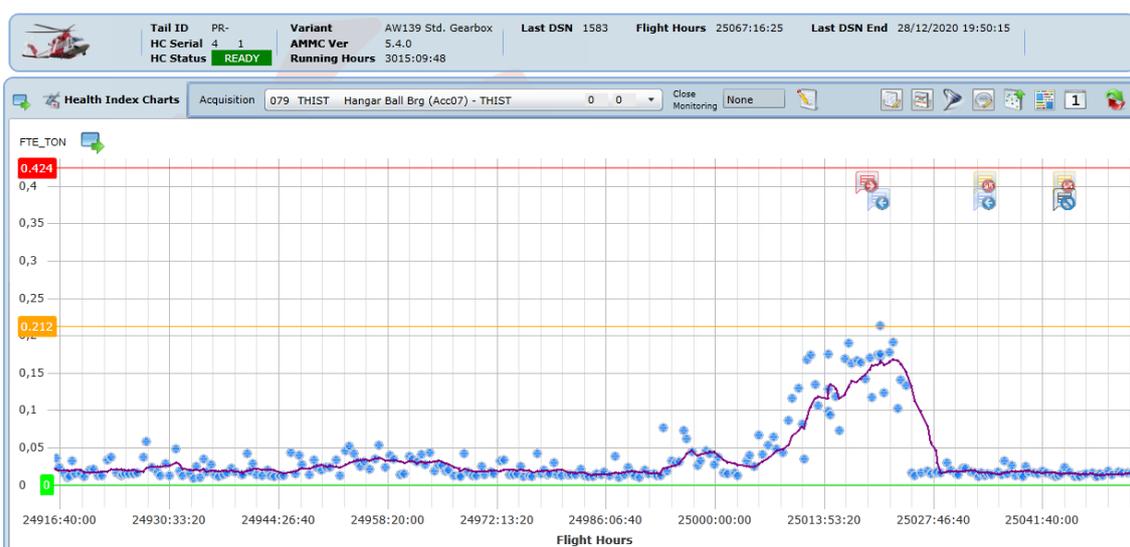


Figura 22: Curva de Tendência da aquisição 079 do sensor A07 (Fonte: Heliwise)

Durante a inspeção detalhada do sistema, conforme indicado pelo manual de manutenção do próprio fabricante da aeronave, foi constatado pela equipe de manutenção que o rolamento estava com pouca lubrificação, fazendo-se

necessária a reposição do lubrificante. Após a realização da reposição do lubrificante, o componente voltou a operar normalmente, conforme pode ser observado no canto direito do gráfico de tendência da figura 22.

Esse caso serve para ilustrar como até problemas relativamente simples como um rolamento com pouca lubrificação podem causar falhas extremamente perigosas. Nesse caso, a presença do HUMS aplicado de forma correta permitiu a detecção de uma possível falha que, a princípio, não seria tão simples de ser detectada no caso da ausência do sistema. Se a aeronave não contasse com esse sistema, a baixa lubrificação poderia vir a causar tamanha vibração que, nos próximos voos dessa aeronave nessas condições, seria capaz de causar a falha do eixo de acionamento do rotor de cauda e, dependendo da situação, vir a desmembrar e perder a cauda praticamente inteira em voo, o que causaria a queda da aeronave, podendo gerar dezenas de mortes, fora a situação de perda total da aeronave e um prejuízo sem igual para o operador e para os tripulantes e passageiros, ou seja, prejuízos e perdas inimagináveis.

Fazendo uma análise considerando apenas custos referentes à aeronave em si, sem considerar fatalidades e outras questões legais acerca de um possível acidente, uma aeronave AW139 já equipada com a ferramenta custa, em média, 12 milhões de dólares, quase 60 milhões de reais. O conjunto que agrega esse rolamento custa em torno de R\$ 200.000,00 e o lubrificante dele, custa na faixa de R\$ 3.000,00 a R\$ 6.000,00. Além disso, um orçamento para implementação do HUMS em uma aeronave que não possua o sistema fica na faixa de R\$ 900.000,00, incluindo o kit de instalação dos equipamentos e o custo do software. Com isso, pode-se entender que em pouco tempo de uso a ferramenta já se pagaria e já estaria trazendo economias em relação a custos de manutenção.

## 4.2 – PITCH CONTROL LEVER FAILURE

### 4.2.1 – Explicação do sistema

Nesse sistema, dois motores PT6C-67C, da *Pratt & Whitney Canada* (*PWC*), acionam a Caixa de Transmissão Principal (*MGB*), que recebe a rotação proveniente dos motores e a reduz para transmitir à *Main Rotor Head* através do Mastro do Rotor Principal (*Main Rotor Mast - MRM*), que, basicamente, é um eixo de ligação entre um componente e o outro. Além disso, o sistema de comandos de voo também é conectado diretamente na *Main Rotor Head* e atua em conjunto para controle de posição das pás, o que permite realizar as diferentes manobras que o helicóptero faz, desde ir para frente, para trás e para os lados, como para controle de altitude e as demais manobras de voo, das mais simples às mais complexas.

Para entender o que é uma Alavanca de Controle de Passo, ilustrado na imagem 23, é necessário explicar como é montada a Cabeça do Rotor Principal (*Main Rotor Head – MRH*) da aeronave.

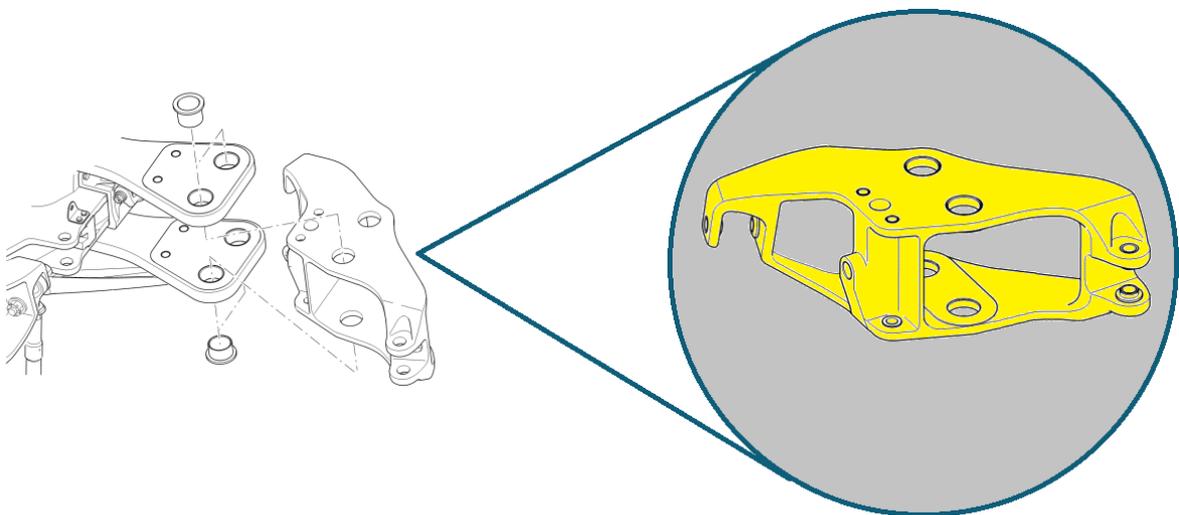


Figura 23: Diagrama de um Pitch Control Lever

A *Main Rotor Head* é montada em um Cubo (*Main Rotor Hub*). Nesse *Hub* são conectados cinco conjuntos, cada um referente a uma pá do rotor principal. Cada conjunto é composto por um Tension Link, um Droop Stop Bracket, um Rolamento Elastomérico (*Elastomeric Bearing*), um Amortecedor de Atraso (Lag

*Damper*), uma Alavanca de Controle de Passo (*Pitch Control Lever*), entre outros componentes menores de complemento aos citados acima.

O *Tension Link*, possui a função de conectar e transmitir todas as cargas das Pás do rotor ao Hub, além de ser o ponto de fixação de outros componentes, como *Pitch Control Lever*, *Droop Stop Bracket* e *Elastomeric Bearing*. O *Droop Stop Bracket* serve para fixar as raízes das pás e evitar a queda excessiva das pás quando o rotor principal estiver parado, sem esse componente e em decorrência de sua longa extensão, as pás tendem a entortar com a gravidade, podendo até mesmo levar a falha das pás. O *Elastomeric Bearing* transmite as cargas centrífugas e de cisalhamento da Pá do Rotor para o *Hub* através do *Tension Link*. Esse Rolamento Elastomérico também permite que a Pá se mova em relação ao Hub, de forma que a pá possa ser reposicionada em diferentes posições. Conectado ao *Pitch Control Lever*, existe também um amortecedor de atraso (*Lag Damper*) para cada conjunto, que controla o movimento da pá do rotor principal no plano em que a pá gira, além de definir um limite para o curso da *blade*. A Alavanca de Controle de Passo (*Pitch Control Lever*) é responsável por conectar o *Pitch Link*, que é a haste de controle de passo, ao *Tension Link* e ao *Elastomeric Bearing*, explicados anteriormente. O *Pitch Link* recebe as entradas dos controles de voo através de um componente chamado *Swashplate* e então transmite essas entradas de controle de voo para o *Pitch Control Lever* e para o *Tension Link*.

O funcionamento do sistema se dá de forma que a *Main Rotor Head* transmite o acionamento da *Main Gearbox* para as *Main Rotor Blades*, além de permitir a alteração de posicionamento de cada pá a depender do que a tripulação tenha intenção de realizar. Abaixo, na figura 24, pode ser observado o diagrama do sistema, com destaque do componente a ser tratado neste estudo de caso.

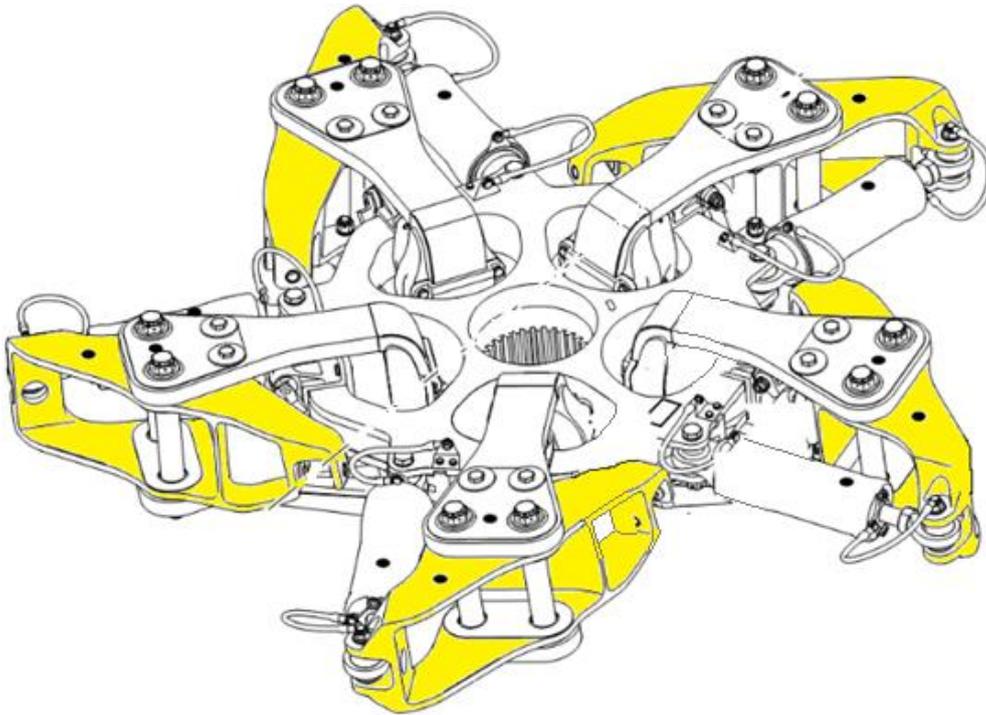


Figura 24: Esquematização da Main Rotor Head

#### 4.2.2 – Explicação do caso

Nesse estudo de caso, será tratada uma situação em que o componente *Pitch Control Lever* veio a falhar. Esse é um componente de extrema importância para o sistema, visto que é ele que permite a mudança no passo de cada pá, o que interfere diretamente em questões de rotação do rotor principal, balanceamento e vibração da *Main Rotor Head* e, conseqüentemente, envolvendo conforto das pessoas no interior da aeronave, segurança de voo e saúde do helicóptero, visto que a vibração excessiva na cabeça do helicóptero pode vir a causar deterioração em diversos sistemas e componentes da aeronave.

Para compreensão do caso, se faz necessário explicar o contexto prévio. Durante um voo, uma aeronave AW139 sofreu uma descarga elétrica proveniente de um raio que atingiu a *Main Rotor Head*. O impacto não causou danos aos sistemas do helicóptero, logo não afetou o voo ou sua segurança. Com isso, a tripulação concluiu normalmente a “missão” (forma como os voos são comumente chamados no ramo) e reportou o impacto com o raio à equipe

de manutenção ao chegar à base em solo. Após o reporte dos pilotos, os técnicos de manutenção realizaram inspeções em toda a área da *Main Rotor Head*, mas não foi encontrada nenhuma discrepância. Em adição, como procedimento padrão após cada voo, a equipe de manutenção realizou a leitura do cartão com os dados do HUMS, mas nenhuma anomalia ou tendência foi encontrada, o que permitiu a liberação da aeronave para continuar a voar. Após alguns dias da aeronave em operação, durante o download e leitura dos dados de HUMS, os técnicos identificaram um alerta vermelho e outros dois amarelos nos acelerômetros 4 e 5, relacionados à *Annulus Gear* da *Main Gearbox*, conforme ilustrado nas figuras 25 e 26.

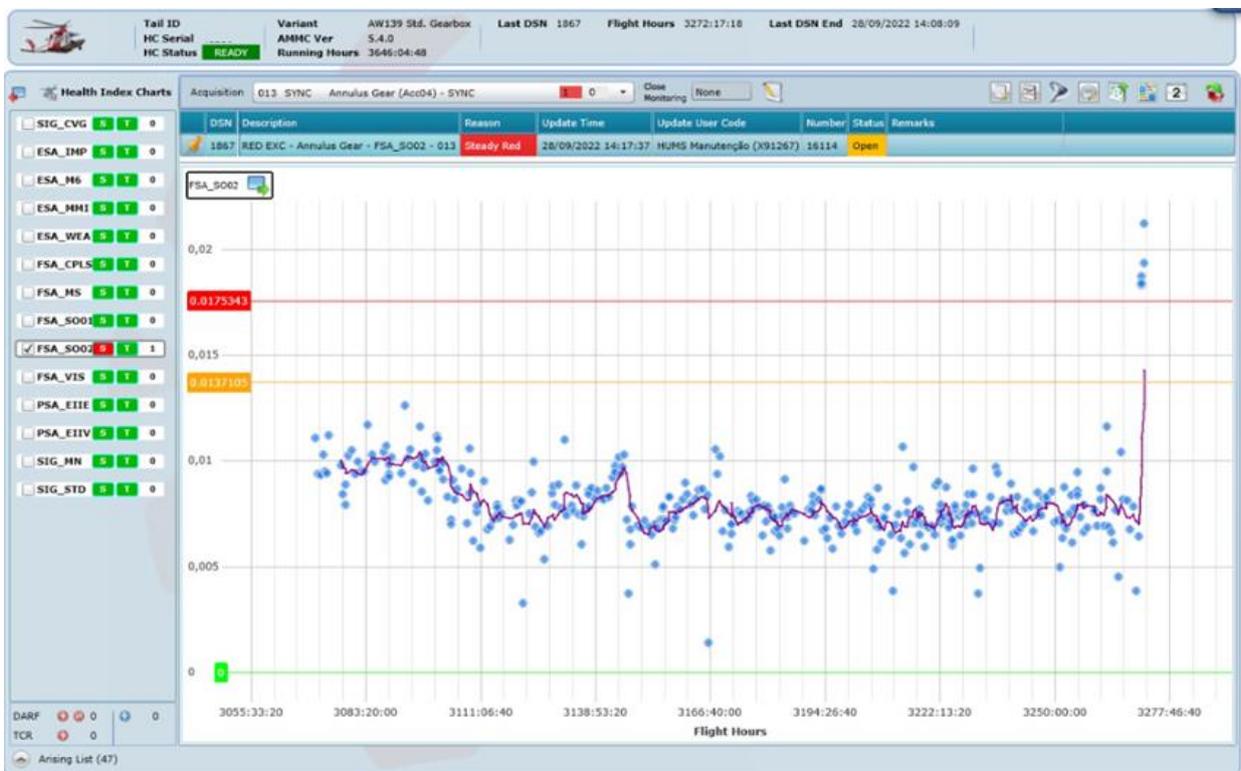


Figura 25: Curva de Tendência da aquisição 013 do sensor A04



Figura 26: Curvas de Tendência da aquisição 014 do sensor A05

O HUMS também identificou uma pequena elevação na vibração do Rotor Principal em voo de cruzeiro, conforme figura 27.

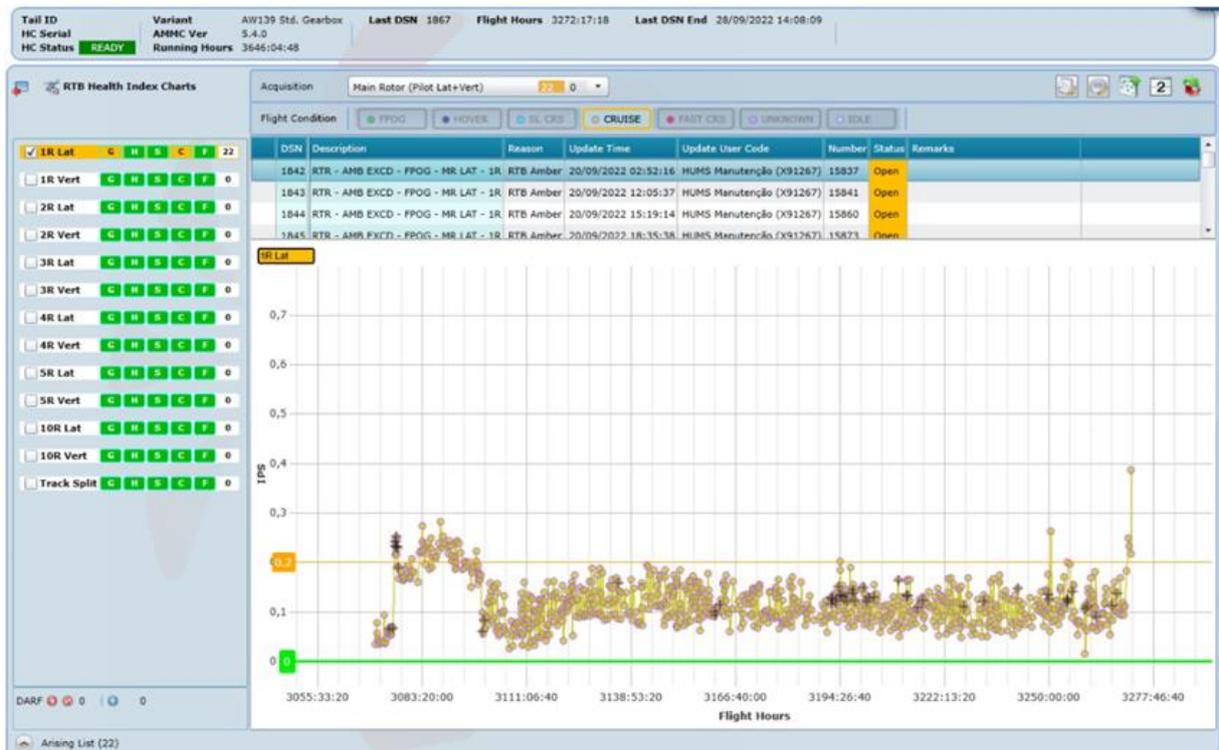


Figura 27: Curva de Tendência de Vibração do Main Rotor

É importante ressaltar que todos os alertas identificados pelo sistema foram repentinos a partir do último voo realizado, não havendo tendências de elevação de vibração para as aquisições em questão. Ao contatar a tripulação, não houveram reportes a respeito de ocorrências anormais durante o voo, de forma que indicassem alguma falha de sistema que tenha sido percebida durante voo. Com isso, a equipe de engenheiros de suporte de HUMS, equipe interna da empresa operadora responsável por acompanhar o HUMS e utilizar a ferramenta para dar suporte à equipe de manutenção, foi comunicada dos alertas pela equipe de manutenção e considerou a aeronave indisponível para voo. Para os alertas em questão, mostrados nas imagens acima, conforme o manual de manutenção da aeronave, a equipe do HUMS recomendou uma inspeção detalhada dos *Main Rotor Dampers*, que são os amortecedores indicados na explicação do sistema. Durante a inspeção, os técnicos de manutenção identificaram uma trinca em um *Pitch Control Lever* da *Main Rotor Head*, conforme figura 28. Com isso, os engenheiros orientaram a substituição imediata do *Pitch Control Lever* e o componente danificado foi enviado para análise, já que este foi o primeiro caso de uma falha deste tipo



Figura 28: Trinca no Pitch Control Lever

Ao analisar o componente, foi observado que o mesmo estava com uma fratura em toda a sua porção superior, conforme figura 29.



*Figura 29: Fratura no Pitch Control Lever*

Com isso, o dano encontrado foi reportado ao fabricante Leonardo Helicopters, que mostrou interesse em descobrir a causa raiz desta falha atípica e o componente foi enviado à Leonardo para estudos e investigação.

Ao analisar os acontecimentos e o componente, chegou-se à conclusão que não houve uma deterioração progressiva do componente e que o componente falhou repentinamente. Definir a causa raiz desta falha é complicado pois a complexidade do ocorrido é elevada e se faz necessária uma análise completa dos fatos em conjunto com a investigação do componente por parte do fabricante. Até o dado momento, as investigações ainda não foram conclusivas e não indicaram uma razão ao certo, no entanto, o componente falhou de forma precoce, de acordo com o fabricante, e uma das possíveis causas para esta falha é justamente o impacto causado pelo raio alguns dias antes da falha. Este impacto pode ter causado uma redução nas resistências do material do *Pitch Control Lever*, que é de alumínio forjado, o que causou a redução na vida útil do material. É importante considerar que não é possível definir a amplitude dessa redução de resistência sem que fossem feitos ensaios

na peça, os quais o fabricante não indicou como necessários e recomendou que a peça fosse mantida em observação durante as operações. Além disso, também é importante ressaltar que não é possível afirmar que esta é realmente a causa da falha, mas é um acontecimento que deve ser considerado como possível causa, já que é possível afirmar que um impacto desse tipo trouxe consequências negativas para o componente.

Dessa forma, é possível afirmar que o HUMS atuou com sucesso na detecção da falha, visto que, de acordo com o reporte da tripulação, não foi observada nenhuma mudança durante o voo e que, caso o HUMS não detectasse os alertas, a aeronave seria liberada para voo novamente. Caso outro voo ocorresse, é possível afirmar que as chances de sucesso do voo seriam muito baixas, já que não seria possível transmitir os controles de voo para aquela pá em específico, o que possivelmente viesse a causar uma série de outras complicações, como elevação brusca da vibração do rotor principal, uma das 5 pás não obedecendo aos comandos, atuando de forma independente das outras 4, o que traria falhas de comando da aeronave, podendo fortemente causar a queda da aeronave, com possíveis mortes dos tripulantes e passageiros. Assim, é correto afirmar que o HUMS foi de extrema importância para a segurança, reafirmando seu valor para operações em aeronaves de asa rotativa.

Fazendo novamente uma análise financeira, o componente que falhou, *Pitch Control Lever*, custa na faixa de R\$ 130.000,00. Caso a ferramenta HUMS não fosse utilizada nesta aeronave, ocorreria outro voo logo em seguida do que gerou o alerta. Ocorrendo outro voo, além da falha no *Pitch Control Lever*, num cenário sem acidentes, os outros componentes do conjunto seriam sobrecarregados e poderiam vir a falhar também. Com isso, o custo médio de cada um dos conjuntos de controles de voo, considerando só os principais descritos, *Main Rotor Damper*, *Pitch Link*, *Tension Link* e *Main Rotor Blade*, fica na faixa de R\$ 850.000,00, sem considerar os outros menores, como componentes de fixação entre eles. Com isso, pode-se considerar que o HUMS trouxe uma economia de **mais quase** 1 milhão de reais, apenas considerando este caso de forma simples e sem considerar os demais componentes, que também seriam prejudicados, ou até mesmo um possível acidente.

## 5. CONCLUSÕES

Em virtude do apresentado neste trabalho, o objetivo foi buscar descrever a ferramenta HUMS e apresentar sua importância para o monitoramento preditivo da aeronave, com foco no modelo *AW139* do fabricante *Leonardo Helicopters*, o que indica o possível melhor momento para intervenção na aeronave.

Foi demonstrada de forma geral a disposição dos equipamentos e suas características, com foco nos acelerômetros, tacômetros e na *Tracker Camera*, seguida de outros sistemas que complementam a ferramenta, o software de compilação e análise dos dados e de estudos de caso em que o HUMS atuou de forma a evitar acidentes, possivelmente, graves.

Em um resumo, foi descrito que a ferramenta é utilizada para monitorar parâmetros de vibração em pontos chave do helicóptero e prover dados para a equipe de manutenção para otimizar ações de manutenção. Além disso, a ferramenta é utilizada também para dar suporte aos técnicos em relação ao balanceamento dos rotores a fim de que a aeronave opere de forma correta. Por fim, a utilização da ferramenta permite o gerenciamento detalhado da vibração da aeronave buscando minimizar falhas de componentes mecânicos e aviônicos.

Alinhado a essas funções, a ferramenta tem como benefícios a redução dos tempos de manutenção, elevação da disponibilidade das aeronaves, redução dos custos e usos de partes e sobressalentes através de um monitoramento contínuo e automatizado, redução de danos “desnecessários” através de diagnósticos antecipados e melhoria da confiabilidade dos helicópteros a partir de dados confiáveis para análises maiores e mais precisas.

Além disso, o sistema conta com dados de diversos outros sistemas, que tornam os resultados e análises ainda mais complexos e completos, de forma que o mesmo sistema monitore estruturas, sistemas mecânicos, sistemas aviônicos e alguns parâmetros de motores, o que corrobora com a afirmativa de que o sistema é extremamente útil, benéfico e completo.

Os estudos de caso trouxeram situações reais nas quais, sem o HUMS, componentes importantes para a operação das aeronaves seriam destruídos, causando a queda da aeronave de forma catastrófica. Caso fosse feita uma análise puramente financeira, considerando apenas valores referentes à aeronave, apesar da ferramenta HUMS implicar em um “custo” a mais para o operador, esse custo na verdade se prova ser um investimento. Os benefícios da ferramenta se dão tanto em relação às questões financeiras, quanto em relação à segurança, principalmente da tripulação e passageiros, confiabilidade e disponibilidade da aeronave, e tempo e custo de manutenção reduzidos.

Após a apresentação dos estudos de caso, que demonstram de forma clara a importância e o benefício da aplicação da ferramenta, fica evidente que a ferramenta de manutenção preditiva HUMS traz muita segurança para a tripulação e passageiros das aeronaves, além de reduzir indisponibilidades de equipamentos, reduzindo custos de manutenção, além de também trazer redução na chance de multas contratuais devido a aeronaves indisponíveis. Em adição, torna-se possível acompanhar centenas de parâmetros e intervir na área mais próxima a que está gerando o alerta, ajudando na investigação de problemas da aeronave. No geral, é possível elevar o conceito de manutenção a altos padrões, de forma a reduzir tempos e custo de manutenção, de forma segura e confiável, graças a ferramenta de manutenção preditiva HUMS.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

MONCHY, F. - **A Função Manutenção**, São Paulo: Editora Durban LTDA; Ebras Editora Brasileira LTDA, 1989.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. 3ª edição. Rio de Janeiro, 2009.

LAKATOS, E.M.; MARCONI, M.A. **Fundamentos De Metodologia Científica**. 5ª edição. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2003.

ALMEIDA, M. T. de. **Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade**. 2000.

FOGLIATTO, F.S.; RIBEIRO, J.L.D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Editora ELSEVIER: ABEPRO. 2011.

SCHWAB, K. **A Quarta Revolução Industrial**. 1ª edição. São Paulo, 2016.

ORACLE. **O que é a IoT?** <<https://www.oracle.com/br/internet-of-things/what-is-iot/>> Acesso em 21 mar. 2022.

ORACLE. **O que é Big Data?** <<https://www.oracle.com/br/big-data/what-is-big-data/>> Acesso em 21 mar. 2022.

HELIOFFSHORE – SAFETY THROUGH COLLABORATION. **Health and Usage Monitoring System – HeliOffshore Best Practice Guidance**. Version 1.1. Londres, 2017.

BARBOSA, H. R., GAMA, T. R.; ALBERNAZ, C. M. **ANÁLISE DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS E SUA APLICAÇÃO NA MANUTENÇÃO DE AERONAVES DE ASA ROTATIVA**. Exatas & Engenharias, 2018.

ENGEMAN. **Análise de criticidade de equipamentos: o que é na manutenção?**  
<<https://blog.engeman.com.br/analise-de-criticidade-de-equipamentos-o-que-e-na-manutencao/>> Acesso em 02 nov. 2022.

LEONARDO HELICOPTERS. **Aircraft Maintenance Publication**. 42th issue, 2023.

PEREIRA, M. **ANUÁRIO DA PRODUÇÃO ACADÊMICA DOCENTE**. FACULDADE ANHANGUERA JARAGUÁ DO SUL, 2018.