



## **Gestão da Manutenção Preditiva para Motores Aeronáuticos**

Estevão Carvalho do Espírito Santo<sup>1</sup>

Faculdade Pitágoras – Campus Venda Nova, MG

### **Resumo**

Percebendo que os limites desafiadores de prazos ofertam confiabilidade e baixo custo junto ao cliente e consequentemente definem a permanência na competitividade de mercado, este trabalho vem mostrar que ainda que muitos acidentes aéreos tenham sido registrados nos últimos anos, resultantes da procrastinação ou defectibilidade no processo de manutenção, muitos poderiam, e outros ainda podem, ser evitados pela monitoração prévia às falhas através de técnicas como a análise tribológica e a análise de vibração; Metodologias tais que não exoneram demasiadamente o custo das manutenções, antes proporcionam maiores assertividades, que resultam em minimizações de trocas desnecessárias, em reduções de intervenções precoces, em economias no tempo de manutenção, e em elevações na segurança operacional. Para a compilação fomentadora à gestão preditiva na manutenção industrial aeronáutica brasileira, pela utilização das técnicas analíticas de vibração e óleo, far-se-á a seleção prioritariamente de artigos do quadriênio 2013 a 2016 publicados em periódicos científicos de Qualis A1 à B2, conforme consultados na plataforma governamental Sucupira e livros de referência; Uma vez que este trabalho tem caráter bibliográfico.

**Palavras-chave:** Manutenção Preditiva; Motor Aeronáutico; Tribologia; Análise de Vibração.

---

<sup>1</sup> Graduado em Engenharia mecânica e Teologia [estevao\\_crucial@outlook.com](mailto:estevao_crucial@outlook.com)



*“Por permitir-se sentar no obro dos gigantes e ver que o próximo ponto distante você ajudou a perceber, conceber-se-á que ciência é questão de simplicidade e cooperação; Talvez a sobrevivência na terra baseie-se em interdependência, simplicidade e cooperação”.*

*Dra. Eng. Janaina de O. Castro Silva*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Métodos de Manutenção	17
<b>Figura 2</b> – Acelerômetro Piezoelétrico	24
<b>Figura 3</b> – Análise no domínio do tempo	26
<b>Figura 4</b> – Espectro de vibração RR Trent 900	28
<b>Figura 5</b> – Monitoramento de rolamento de roletes	32



V Congresso Interdisciplinar de  
Pesquisa, Iniciação Científica e Extensão Universitária

VIII Semana da responsabilidade social  
e extensão universitária

Centro Universitário Metodista  
Izabela Hendrix

Ciência e Tecnologia: universidade, sustentabilidade  
e desenvolvimento econômico

Belo Horizonte, 21 a 24 de Setembro de 2020

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Limites para as zonas de equipamentos do grupo 1	29
<b>Tabela 2</b> – Materiais e origens	36



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Availability (Fator disponibilidade)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CENIPA	Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos
EN	Europäische Norm (European Standard)
$f$	Frequência (Hz)
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
GUT	Gravidade Urgência e Tendência
HH	Homens/Hora
Hz	<i>Hertz</i>
IMF	Custo total de manutenção por faturamento
ISO	International Organization for Standardization
Jo	Momento de inércia de massa polar
KPIs	Key Performance Indicators
$Kt$	Rigidez do sistema
LP	Low Pressure
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
NBR	Norma Brasileira
NI	National Instruments
NP	Norma Portuguesa
RR	Rolls Royce
s	Segundo
<i>Setup</i>	Tempo de Instalação
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats
T	Período (s)
W	Velocidade angular (rad/s)
WPC	Wear Particle Concentration
TBS	Time Between Schedule



V Congresso Interdisciplinar de  
Pesquisa, Iniciação Científica e Extensão Universitária

VIII Semana da responsabilidade social  
e extensão universitária

Centro Universitário Metodista  
Izabela Hendrix

Ciência e Tecnologia: universidade, sustentabilidade  
e desenvolvimento econômico

Belo Horizonte, 21 a 24 de Setembro de 2020

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>MANUTENÇÃO INDUSTRIAL</b>	<b>17</b>
2.1	APORTE DA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL COM ÊNFASE AO MODELO PREDITIVO	17
2.1.1	<i>Manutenção por Definição</i>	17
2.1.2	<i>Aparato Histórico</i>	19
2.1.3	<i>Vantagens da Manutenção Preditiva:</i>	20
2.2	FERRAMENTAS PARA GESTÃO PREDITIVA	20
2.2.1	<i>Análise de vibração:</i>	21
2.2.2	<i>Tribologia</i>	21
<b>3</b>	<b>ANÁLISE DE VIBRAÇÃO</b>	<b>23</b>
3.1	INSTRUMENTAÇÃO	23
3.2	PROCEDIMENTO	24
3.2.1	<i>Amplitude / tempo</i>	24
3.2.2	<i>Amplitude / Frequência</i>	26
3.3	ANÁLISE	27
3.3.1	<i>Fabricante</i>	27
3.3.2	<i>Predefinições das Normas aplicáveis</i>	28
3.3.3	<i>Banchmark:</i>	30
3.4	INTRODUÇÃO AO PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO POR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	30
<b>4</b>	<b>ANÁLISE TRIBOLÓGICA</b>	<b>32</b>
4.1	PROCEDIMENTO	34
4.1.1	<i>Espectrometria</i>	34
4.1.2	<i>Ferrografia</i>	35
4.2	ANÁLISE	35
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>37</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>39</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Imagine se na pista de corrida para decolagem irrompesse uma forte explosão no motor sob a asa direita! Após afincada a decisão de interromper a operação e incitado um grande distúrbio entre os passageiros sob a ofegante aclamação anônima de “fogo!”, o piloto, obrigado pelo procedimento regulamentar retornasse para o slot de embarque, cancelando assim a decolagem para a conferência de todos os possíveis danos acometidos pelo incidente. O montante a ser pago pela companhia pelo tempo de aeronave em solo, impacto sobre o controle aéreo e realocação de passageiros, custos de alimentação e hospedagem, processos jurídicos e o nível de insegurança dos clientes, seriam relevantes porquê às manutenções preditivas.

Infelizmente o texto acima não limita-se à devaneios, outrossim, pode servir de reporte à eventos reais reincidentes no Brasil e no mundo, junto a outros 1187 acidentes de aviões e 206 acidentes de helicópteros reportados pelo CENIPA no Brasil, apenas nos anos 2008 a 2017, fora 513 incidentes graves com aviões no mesmo período (SANTOS, ALMEIDA e FARIAS, 2018).

É palpável pelos informes oficiais da ANAC, que há ainda muito à se dizer sobre o assunto deste trabalho e não obstante a isso, projetar-se-á à sua explanação, apresentando possíveis respostas à pergunta “Como aplicar as ferramentas da manutenção preditiva nos processos de detecção de falhas mecânicas em motores de aeronaves?” como problema central, uma vez que os gráficos CENIPA expressam que o número de acidentes aéreos civis não tem seguido decréscimo de casos, o que indicaria melhoria na qualidade, mas apenas oscilações (SANTOS, ALMEIDA e FARIAS, 2018).

Com o objetivo de aplicar a manutenção preditiva para melhorar a conservação de motores à turbina, pontos como “definir manutenção e suas principais estratégias (corretiva, preventiva, proativa e preditiva)”, “conhecer as técnicas de análise de vibração dos motores”, “compreender o monitoramento da condição do motor pela análise de partículas contaminantes no óleo lubrificante” e “procurar fomentar a atenção à manutenção aeronáutica incentivando a busca de melhoria nos processos de manutenções propriamente ditos” têm a função de nortear o trabalho.

A revisão bibliográfica, método adotado, segundo Triviños (1987) é uma metodologia hábil à não limitar-se ao conhecimento superficial, dedutivo da observação subjetiva, mas antes, possui caráter de intencionalidade qualitativa evidenciando origens, o imo e as

extensões do fenômeno a se investigar; por Marconi e Lakatos (2008) tem a finalidade de ligar o pesquisador diretamente à toda a ciência do campo pretendido, quer copilada pela escrita, quer dita ou mesmo filmada até o agora.

Ademais, através da coleta de dados em livros de leitura corrente, livros de referência, jornais científicos e revistas científicas, tornam-se possíveis a análise e a discussão do conteúdo científico corrente para então fornecer conclusões inovadoras (GIL, 2002), concordantemente, nesta elaboração se fará a seleção prioritariamente de artigos do quadriênio 2013 a 2016 publicados em periódicos científicos de Qualis A1 à B2, conforme consultados na plataforma governamental Sucupira e livros de referência; Os descritores adotados serão: Motor Aeronáutico, Manutenção Preditiva, Tribologia e Análise de Vibração.

Por fim, o processo de manutenção é assunto de grande impacto em diversos ramos industriais. Especificamente na aviação, ele está estreitamente balizado entre o tempo de aeronave em solo aspirando a zero, a obrigatoriedade de eficiência na identificação real dos pontos à serem reparados, e a busca do custo mínimo; limites desafiadores que indiretamente oferecem confiabilidade e baixo custo junto ao cliente e conseqüentemente definem a permanência na competitividade de mercado, portando-se como um empreendimento sustentável ou não.

Perceba que ainda que a indústria aeronáutica realmente conte com inúmeros níveis processuais e hierárquicos comprometidos em fazer deste meio de transporte o mais seguro - ou ao menos um dos mais seguros - no século atual, ainda sim, toda engenharia de materiais, todo estudo de dinâmica dos fluidos e outras inúmeras áreas empregadas nos projetos de motores, de aeronaves e de suas rotas, ficam sujeitos à inferência de que os processos de manutenção mantêm, de fato, as aeronaves nas condições originais ou o mais próximo disso e no nível ótimo de segurança. Uma vez que essa confiança depositada na gestão da manutenção deste nicho for frustrada, adere-se imediatamente a um estado de risco altíssimo uma vez que analisando dados como “quantidade de riscos”, “probabilidade de ocorrência de acidentes”, “gravidade do efeito desses acidentes” agravam-se no método de análise de falhas FMEA a suscetibilidade da falha e o altíssimo nível de exposição à lesões e danos materiais nesse meio de transporte, o que elucidada a média de quatro acidentes civis e meio por ano tendo a manutenção como fator motivador (ANAC, 2017).

Portanto, pesquisar sobre este tema significa buscar incansavelmente pela minimização de custos e minimização de falhas sem impactar negativamente nos prazos tão curtos do desenvolvimento das tarefas, e rigorosamente por isso empregamos a análise

espectrométrica do óleo e da vibração como objetos de estudo pelo baixo custo com assertividade e instantaneidade de resultados quando em comparação com outros métodos industriais ainda não tão regulares na aviação brasileira; De tal forma que mesmo companhias de portes menores possam otimizar seus níveis de manutenção, buscando contribuir de fato à minimização dos índices negativos no Estado, a elevação da sustentabilidade financeira das prestadoras de transporte aéreo dos mais diversos portes sem a negligência da manutenção nem por tempo nem por custo.

Atendendo que Gil, 2002 suscita apenas dois grupos de razões para se pesquisar, decorrendo de razões de ordem intelectual que originam do “desejo de conhecer pela própria satisfação de conhecer” ou de razões de ordem prática “com vistas a fazer algo de maneira mais eficiente ou eficaz” e expõe que a ciência aspira a observação de ambas razões para existir, esta pesquisa valida-se pela própria satisfação dos pesquisadores de conhecer e, como exposto nos parágrafos anteriores, justifica-se na objetividade da elevação da eficiência e eficácia da manutenção de motores aeronáuticos entendendo que o crescimento do setor com qualidade contribuirá com o crescimento econômico do país.

## 2 MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

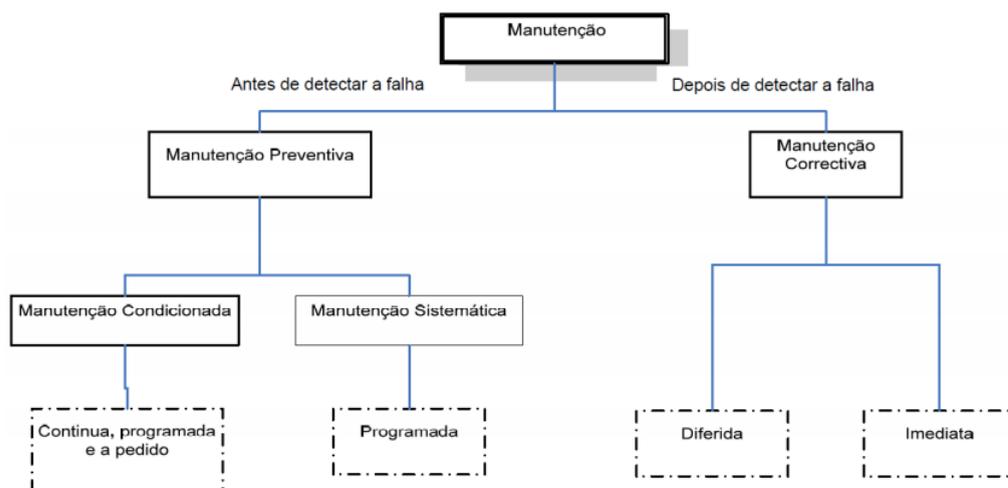
### 2.1 APORTE DA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL COM ÊNFASE AO MODELO PREDITIVO

#### 2.1.1 Manutenção por Definição

A prática de manutenção fraciona-se em três métodos principais: A manutenção corretiva, a preventiva e a preditiva, sendo que a corretiva é a realizada após a quebra do equipamento, a preventiva baseia na substituição de componentes ainda que em condições favoráveis à sua aplicação continuada, sendo 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” (KARDEK E NASCIF, 2009, p.42) e a preditiva caracteriza-se pela utilização máxima de cada componente dentro da faixa de segurança aceitável a partir do monitoramento de condições para identificação de problemas potenciais e então prevenir a falha do equipamento: “O monitoramento das condições das máquinas (...) contribui para detectar antecipadamente falhas e potenciais problemas, a fim de evitar o lapso completo” (DOU E ZHOU, 2016, p.459).

A norma EN 13306:2007, estratifica possíveis métodos à serem seguidas, quer simultaneamente ou mesmo exclusivamente, conforme apresenta a Figura 1:

**Figura 1** – Métodos de Manutenção



Fonte: EN NP 13306 (2007 p.21)

Onde percebe-se a distinção da linha postergada de manutenção pelo método corretivo, das manutenções pré detectivas.

Dentre muitas definições sobre o quê de fato é a manutenção, temos pela norma EN NP 13306 que a manutenção é a “combinação de todas as ações técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida de um bem, destinadas a mantê-lo ou repô-lo num estado em que possa desempenhar a função requerida” (EN NP 13306 p.4).

Segundo Cabral (2009) essas ações têm diversas incógnitas relacionados ao tempo como o “Tempo de Reparação de Urgência”, o “Tempo de Calendário”, o “Tempo de Espera de Atendimento”; ao esforço Homens Horas como “HH Externo”, “HH Interno”; à questões relativas à frequência de eventos, como “Número de Avarias”, “Número de Pedidos de Trabalho”; à variáveis sobre custos envolvendo “custo de mão de obra”, “custo de gestão”, “de materiais” etc; e à fatores relacionados com valores, como o impacto da substituição dos ativos e o estoque para a manutenção.

Sendo assim, é necessário haver uma gestão da manutenção destinada a encontrar o ponto de equilíbrio do nível de manutenção, de forma que o custo total da manutenção seja promissora à rentabilidade da empresa, e não o contrário (CABRAL, 2009).

À gestão da manutenção, fica portanto a responsabilidade de determinar tanto os objetivos, o planejamento e as estratégias do processo de manutenção que atendam à realidade da organização e sua melhoria. (Norma EN NP 13306).

Para isso, Pinto (1999) comenta a percepção da necessidade de um modelo de gestão mais preventivo que moroso, apelando à manutenções precavíveis, com busca à controlabilidade diferentemente das puramente corretivas.

Em busca dessas manutenções preditivas, faz-se a utilização de indicadores que são até capazes de apontar diretamente para solução do problema antecipadamente (WIREMAN, 2005).

Nesse caso, os indicadores aqui para a manutenção preditiva, foram limitados em torno principalmente das análises de vibração em conjunto com normas, e literaturas referentes.

### 2.1.2 Aparato Histórico

Em estudo à manutenção industrial observada a partir de 1930, Kardec e Nascif (2009), interligam-na em quatro fases definidas pelas grandes transformações sofridas na indústria do período da segunda grande guerra mundial em diante. A primeira geração entre as décadas de trinta e cinquenta, a segunda até 1970, a terceira dos anos setenta à noventa e a quarta perdurando até o presente.

Entre os anos 1930 e 1950 - a primeira fase - os ativos financeiros (equipamentos, imóveis, capital e outros) bem definidos, a baixa da demanda produtiva industrial, os equipamentos robustos, a não necessidade de diversidade de produtos por linha, somados aos favorecidos espaços para estoque, a manutenção sistematizada não era tida por necessária. A filosofia de que tudo se desgasta com o tempo inevitavelmente, embandeirava o regime fundamentalmente corretivo e não planejado (KARDEC e NASCIF, 2009).

Para Gregório (2018), a fase pós guerra situada por volta de 1950 à 1970 – segunda fase – é marcada pela escassez de mão de obra e falta de todos os tipos de produtos; essa demanda motivou a preocupação da erradicação de quebra de máquinas, a busca por maior confiabilidade e o grande incentivo à mecanização para suprir a carência de mão de obra, tudo isso com vistas à maiores produtividades. Surgindo assim o conceito da manutenção preventiva.

A preocupação pela constante disponibilidade do maquinário generalizou-se na indústria, o grande avanço da informática viabilizou computadores pessoais que seriam aplicados para gestões ainda mais eficientes sobre os períodos, processos e condições das manutenções, a filosofia japonesa “*just-in-time*” se tornam tendência mundial, a busca da confiabilidade de todos os recursos e informações passa a ser vista como fator preponderante para a competitividade corporativa; Fatores esses que caracterizaram a terceira geração, de 1970 ao fim dos anos 90. (KARDEC e NASCIF, 2009).

A informática constantemente em evolução fomentou ainda mais a controlabilidade das indústrias rumo a análises e intervenções nos processos de manutenção à que se atendessem a imprevisibilidade dos senários comerciais globalizados, às inovações empresariais agora tidas como cruciais para a sobrevivência da instituição, às mudanças de

*setup* desafiadores que permitiam as linhas produzirem produtos diversificados sob o sistema de produção puxada e não mais empurrada, favoreceu-se também pelo avanço da informática os indicadores (KPIs) onde o tempo médio entre falhas (MTBF), o tempo de disponibilidade (A), o custo da manutenção e da não manutenção por faturamento bruto (IMF) e muitos outros mais. Essas turbulências tecnológicas introduziram a indústria ao período chamado de “4.0” ou a quarta geração industrial (HERMANN,2016).

### 2.1.3 Vantagens da Manutenção Preditiva:

Observado alto custo da manutenção preventiva e a grande perda produtiva no sistema corretivo e o crescimento substancial produtivo no início da indústria automotiva da década de 70, percebeu-se a grande vantagem do modelo de manutenção preditiva que, a despeito dos grandes desperdícios de materiais do sistema preventivo e de tempo produtivo no sistema corretivo, o método preditivo oferecia intervalo máximo entre paradas, maior disponibilidade segura, erradicação de quebras severas no equipamento e minimização de intervenções desnecessárias. “A manutenção preditiva visa realizar manutenção somente quando as instalações precisarem dela” (SLACK, 2008, p.645).

## 2.2 FERRAMENTAS PARA GESTÃO PREDITIVA

Por Almeida (2015, p.24) “Para a implantação da manutenção preditiva são necessários instrumentos e equipamentos específicos para detectar e analisar os fenômenos emitidos pelo equipamento”. Dentre esses recursos, o autor levanta a análise de vibração, a análise de óleo, de temperatura, ultrassonografia, a gamagrafia e ainda outros como instrumentos necessários para a que o máximo aproveitamento das máquinas e seus componentes seja viabilizado.

Dentre as muitas ferramentas para o cumprimento da gestão preditiva estão as técnicas de inspeções por análise de óleo e análise de vibração:

### 2.2.1 Análise de vibração:

Esta ferramenta baseia-se na análise comparativa entre o comportamento vibratório real dos elementos rotores e suas margens de vibrações ideais (ou aceitáveis), gerando dados diagnósticos sobre a condição normal ou não dos elementos, para a prevenção de falhas.

Dou e Zhou (2016) mostram que graças as técnicas de processamento de sinais de vibração, informações vitais sobre os componentes podem ser obtidas.

Por Liang e Lu (2019) entende-se que cada elemento rotor dos motores como rolamentos e conjuntos de eixos têm uma frequência natural que resulta principalmente de seu diâmetro e rotação. Quando algum defeito surge nestes elementos ou em associação a eles, ocorrem frequências não harmônicas.

Dessa forma, quando essa superfície defeituosa entra em contato com as partes rolantes, o impulso gerado pela interação excita ressonâncias na máquina, exclusivamente na frequência determinada pela localização do defeito (MCFADDEN,1984).

McFadden e Smith (1984), em análise de modelos mostram que, de fato, as amplitudes dos pulsos de excitação das falhas são alteradas conforme a localização das mesmas, o que nos auxilia na identificação das fontes de vibração e conseqüentemente embasam maiores assertividades no momento da manutenção.

### 2.2.2 Tribologia

Por essa ferramenta, segundo Roylance (2013), as vertentes respectivas à lubrificação, fricção e desgaste de componentes, são checados para a busca da garantia que o equipamento atenda a expectativa de vida útil.

A tribologia estuda efetivamente o desgaste das partes mecânicas, Bhushan (2000) esboça os diversos processos de desgaste dividindo-os pelos movimentos das interfaces e pelos elementos interfaciais; quanto aos movimentos, subdivide-os entre deslizamento, rolamento, erosão, impacto e oscilação, destacando a importância de cada mecanismo de desgaste para o estudo tribológico.

Esta metodologia se dá através do equipamento nominado tribômetro, destinado para medir o coeficiente de atrito, taxa de desgaste, análise de fadiga e vida útil das faces envolvidas, para as referidas condições de velocidade, carga e temperatura.

Dowson (2009), não somente discorre sobre esta ferramenta de gerenciamento, como ilustra soluções reais e cotidianos para problemas de atrito por esta via.

Dowson (1979) também arremete a nomes como Guillaume Amontons (1663-1705), John Theophilus Desaguliers (1683- 1744), Leonard Euler (1707-1783), dentre outros, como pioneiros e grandes contribuintes à análise tribológica.



### 3 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Uma vez estudada a manutenção preditiva como um viés útil para a gestão da manutenção de motores aeronáuticos à reação, por ter em vista seu princípio de máxima eficácia casando a máxima utilização com a máxima eficiência e segurança de operação, lança-se mão, por conseguinte, às ferramentas de análise das condições ideais/reais dos motores para viabilizar o gerenciamento preditivo.

A análise de vibrações consiste na aplicação de instrumentos que identifiquem uma “oscilação no tempo do movimento ou posição de um sistema mecânico em relação à posição de referência”, conforme definido pela norma NBR 15928:2011, e esses instrumentos são chamados acelerômetros.

#### 3.1 INSTRUMENTAÇÃO

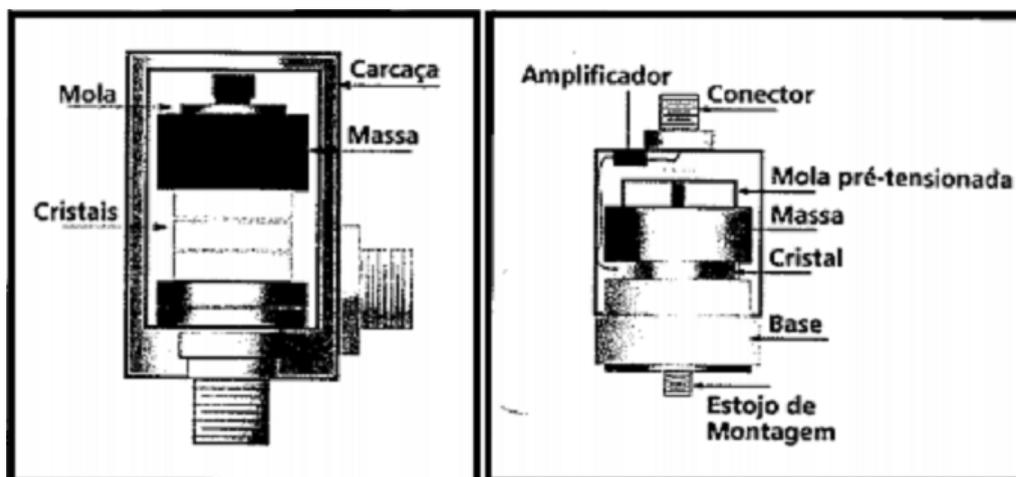
Beristain (2002) comenta de forma geral que inúmeros acelerômetros têm sido empregados durante os anos, como os do tipo pêndulo por exemplo, aplicados dentre outros em sismógrafos para a identificação de terremotos. Não obstante, para a análise de motores, podemos facilmente encontrar em catálogos de fabricantes como a IFM (2019) ou a National Instruments (NI) (2019), transdutores até mesmo triaxiais gerando simultaneamente informações rotacionais, transversais e laterais.

À exemplo da constituição de um sensor, a figura 2, discrimina um acelerômetro mono axial.

Por Alan Kardec e Júlio Nascif (2009, pág.248, 249) observamos:

Existem diversos tipos de acelerômetros, mas basicamente todos utilizam um sistema massa mola [...]. O tipo mais encontrado é o piezoelétrico, constituído por um ou mais cristais piezoelétricos, pré-tensionados por uma massa e montados em uma carcaça [...]. Os cristais piezoelétricos produzem um sinal elétrico quando são pressionados, e [...] Em funcionamento, a vibração da máquina à qual o acelerômetro está afixado provoca uma excitação onde a massa exerce uma força variável nos cristais piezoelétricos. O pulso elétrico gerado é proporcional à vibração.

**Figura 2** – Acelerômetro piezoelétrico



Fonte: Kardec (2009, p. 249)

Em síntese o princípio desses acelerômetros baseia-se na segunda lei de Newton, onde a aceleração resulta da dinâmica entre a força do sistema e a massa deslocada no sensor.

### 3.2 PROCEDIMENTO

Para o proceder da inspeção, antes de mais nada, as normas ABNT NBR 10082 e família ISO 10816, claramente recomendam a instalação de no mínimo dois sensores radiais e um axial para motores horizontais, sendo que as posições de instalação devem ser piedosamente repetidas sempre que removidos e reinstalados os sensores a fim de minimizar as possibilidades de dados incoerentes pelas diferenças de posições da instalação. Além do que, recomenda expressamente a não fixação dos mesmos sobre tampas de pequena espessura ou sobre porcas, parafusos ou partes móveis, naturalmente propícias à vibração livre adicional à carcaça do motor, uma vez que isso resultaria em um sistema de mais graus de liberdade e tornaria a análise mais enigmática.

#### 3.2.1 Amplitude / tempo

Pela norma NBR10082 é muito importante que as medições sejam feitas nas condições operacionais das máquinas como rotação, tensão etc, e por essa norma, as medições podem ser realizadas sob três critérios: I – Pela magnitude de vibração, II – Pela variação da magnitude ou III – Pela análise espectral do sinal de vibração, todas com vistas à percepção da amplitude e sua dinâmica no domínio do tempo.

O critério que considera a magnitude de vibração, pondera o motor pela máxima vibração coletada pelos sensores. Esses picos de vibração são posteriormente enquadrados em zonas que variam de A à D e que conjecturam recomendações para possíveis ações.

O critério que considera a variação da magnitude de vibração entende que grandes variações na magnitude de vibração são sinais de avarias no motor, e por isso devem ser investigadas mesmo que os níveis de vibração estejam dentro das faixas normais previstas no critério I.

Uma alteração na magnitude de vibração, na ordem de um desvio padrão acima ou abaixo do valor de referência de qualquer dos pontos de medida, é considerada uma alteração significativa no estado de funcionamento do equipamento e justifica uma investigação para determinar as reais causas da variação de vibração, particularmente se o aumento ocorrer repentinamente. Para isso é necessário que o equipamento avaliado possua um histórico de registro de vibração (tendência), sobre o qual seja possível determinar o valor médio e o desvio-padrão [sic]. (ABNT NBR 10082, 2011, p. 4).

E o critério terceiro, que considera a análise espectral do sinal de vibração é aplicada exclusivamente em equipamentos com rolamentos e motores elétricos, uma vez que procura por alterações mínimas no desenho das ondas, visto se tratar de elementos com variações muito pequenas cujos defeitos podem evoluir significativamente em curto prazo.

De tal forma que sem a aplicação de filtros, i.é, pela inspeção da amplitude na variação do tempo, conseguimos encontrar os picos gerais e entender genericamente a conformidade ou reprovabilidade do motor pela análise do estado geral do equipamento, limitando-nos à pura observação das amplitudes atingidas. Conforme a NBR 10082, todos esses “critérios [...] são úteis para a avaliação do estado de funcionamento de equipamentos [...] Entretanto, [...] **não permitem** identificar as reais causas relacionadas aos níveis de vibração anormais apresentadas” (2011, p.v, grifos nossos).

### 3.2.2 Amplitude / Frequência

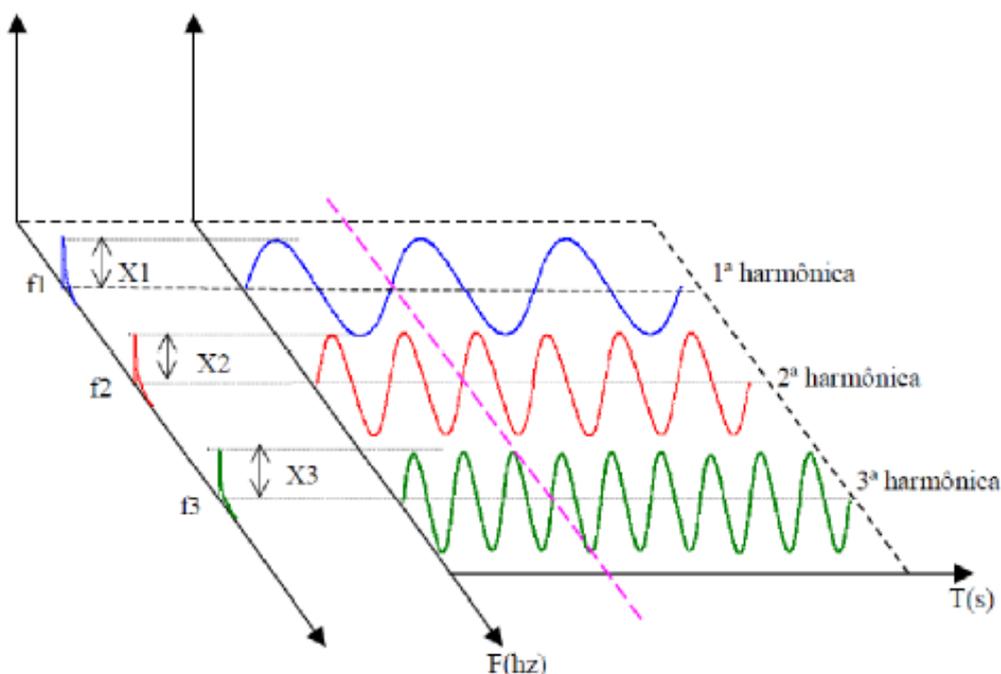
Uma vez que, de fato, esse nível de inspeção é incapaz de identificar a fonte das falhas, buscam-se maiores assertividades quanto às fontes dos picos pela incorporação de filtros.

The different components of a machine vibrate at one or more discrete frequencies. Different malfunctions cause vibrations at different discrete frequencies. The combination of these discrete frequency vibrations result in the complex vibration waveform at the measurement point. The measured signal is therefore analysed by reducing it to its discrete frequency components. The results of this type of analysis [are] presented as a plot of amplitude versus frequency. (COLLACOTT, 1977)

Assim, como os motores à turbina contém diversos pontos originários de vibração, é necessário converter os dados do eixo do tempo em dados no domínio da frequência.

A figura a seguir esclarece a diferença entre a análise pelo tempo ou pela frequência:

**Figura 3** – Análise no domínio do tempo



**Fonte:** Holanda (2016, p. 29)

Observe que pela linha tracejada a inspeção de vibração é feita em relação ao tempo e no momento exato exemplificado por essa linha, seríamos capazes de perceber um determinado valor de pico, mas não poderíamos definir de qual frequência ele veio; Ao passo que pela vista lateral esquerda, podemos segregar cada uma das ondas, selecionando

diferentes frequências pela aplicação de filtros e assim identificar de qual das frequências os altos valores percebidos na primeira inspeção se originaram (FELDMAN, 2006).

Por Luiz (2007) temos que:

$$f = 1/T$$

Onde  $f$  representa a frequência em *Hertz* e  $T$  o período, em segundos. Ainda Por Luiz (2007):

$$W = 2\pi \cdot f$$

Sendo  $W$  a velocidade angular (rad/s).

Çengel (2014) traz:

$$T = 2\pi (J_o/Kt)^{1/2}$$

Onde  $J_o$  é o momento de inércia de massa polar e  $Kt$  a rigidez do sistema, conseguimos assimilar a clara relação entre a frequência dos picos de vibração e a frequência de excitação específica de cada componente de acordo com suas dimensões e velocidades de rotação (FELDMAN, 2006).

Em motores aeronáuticos à turbina temos diversos eixos trabalhando em rotações independentes, engrenagens de diversos diâmetros e assim bem como rolamentos. Este tipo de análise, “promove a avaliação dos sinais no domínio da frequência, onde ocorre a separação exata de cada sinal, podendo assim conhecer e avaliar separadamente o desdobramento de cada um” (HOLANDA, 2016, p. 28)

Evidentemente, enquanto mais suas frequências divergem-se em consequência de seus diâmetros e rotações, também as possíveis origens dos picos de vibração passam a ser tangíveis.

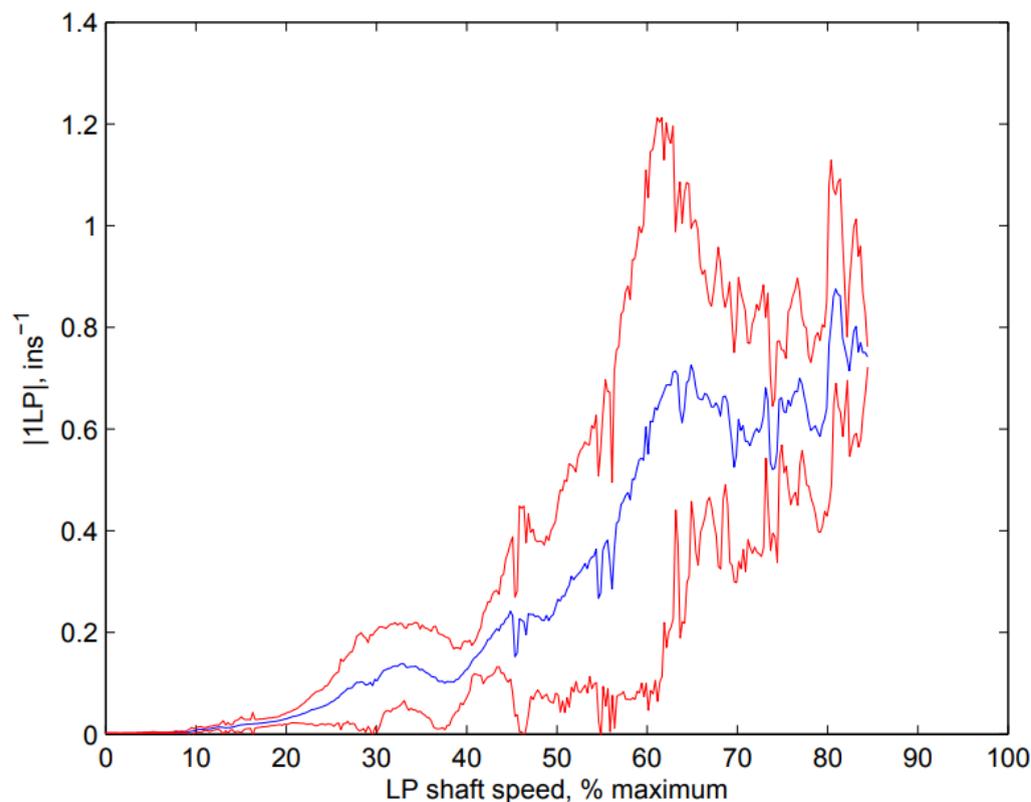
### 3.3 ANÁLISE

#### 3.3.1 Fabricante

Uma opção para análise pode ser a referência emitida pelo próprio fabricante dos motores, que emite valores para aceitação ou reprovação operacional dos motores aeronáuticos (CLIFTON, 2006)

A figura 4 é um exemplo de análise de um motor aeronáutico Rolls Royce (RR) Trent 900.

**Figura 4** – Espectro de Vibração RR Trent 900



Fonte: Clifton (2006, p. 11)

A figura mostra que o motor operado entre um *range* de 0 a 85% da velocidade máxima do eixo de baixa (LP shaft speed) expressou a tendência de aumento da amplitude diretamente proporcional à velocidade do eixo, sem contudo sair da zona admissível, limitada pelas linhas vermelhas, durante os regimes de teste (CLIFTON, 2006).

Para esse caso, as inspeções no domínio do tempo mostram-se convenientes para a comparação com o determinado de fábrica.

### 3.3.2 Predefinições das Normas aplicáveis

Tendo em mãos os dados de vibração obtidos durante o teste do motor em todos os seus regimes de operação, analisam-se esses dados enquadrando o estado do motor entre as classes A, B, C ou D definidas pela ISO 2372.

Pela norma brasileira ABNT NBR 10082 que, sobre as classes de A à D, também reproduz os mesmos limiares da norma ISO 2372, os motores são primeiramente divididos por dois grupos de acordo com o tipo de máquina, sendo o grupo 1 referente à máquinas com potência superior a 300KW, e o grupo 2 às de potência entre 15KW até 300KW.

Sequencialmente, por essa mesma norma, classificam-se quanto às características dinâmicas sendo “rígidos” os cuja menor frequência natural do conjunto é no mínimo 25% superior à sua maior rps (rotação por segundo) e “flexíveis” as demais.

Finalmente, a norma NBR 10082 avalia as máquinas pelas zonas supracitadas, sendo que a “zona A” comporta os valores de vibração recomendados à máquinas novas; A “zona B” enquadra máquinas cujas amplitudes de vibração são tidas por aceitáveis ao emprego contínuo mesmo que para longos períodos de operação; A “zona C” classifica as máquinas como insatisfatórias para emprego contínuo em longos períodos, limitando-as a menores períodos de operação e sob a necessidade de programar manutenção; e a “zona D” destina-se aos equipamentos cujas vibrações sinalizam danos iminentes.

Os valores aparecem tabelados na norma, conforme exemplificado na tabela 1.

**Tabela 1** – Limites para as zonas de equipamentos do grupo 1.

<b>Classe do Suporte</b>	<b>Limite entre as zonas</b>	<b>Valor eficaz mm/s-rms</b>
Rígido	A/B	1,1
	B/C	1,8
	C/D	2,8
Flexível	A/B	1,8
	B/C	2,8
	C/D	4,5

**Fonte:** ABNT NBR 10082 (2011 p.8)

Desta forma, a norma referida norteia as diversas condições das máquinas pela análise de vibração.

### 3.3.3 Banchmark:

A técnica de *banchmarking*, uma prática gerencial industrial, consiste na comparação de dados de terceiros para análise do item em questão. Conforme Ramírez, Alarcón e Knights “*Qualitative benchmarking provides information on different management dimensions to help identify best practices and explain observed performance differences*” (2004, p.110).

Quanto a aplicação de *banchmarking* é-nos palpavelmente aceitável e até mesmo sugestionado, quando em situações tais quais as referidas no trecho que à seguir:

Para equipamentos novos ou aqueles que ainda não possuem um registro de tendência, recomenda-se um valor da ordem de 25% acima do limite superior da zona B, ou ainda utilizar valores comprovadamente adequados já utilizados em equipamentos semelhantes. (ABNT NBR 10082, 2011, p. 4).

À exemplo desta prática de análise, é natural observar durante os processos de certificações de bancos de teste de motores aeronáuticos a aplicação da técnica comparativa ao correlacionar os registros dos testes de motores *gold* – motores geralmente novos, que apresentam alta confiabilidade para comparações – nas novas unidades de inspeção a fim de que um banco de dados sobre o quanto determinados níveis de vibrações detectados em outros motores distam do ideal seja obtido; dentre outras aplicações.

Conforme o item 4.3.3 da ABNT NBR 10082:2011 é permitida a comparação de dados de vibração, desde que as amostragens sejam coletadas sob as mesmas condições de operação.

## 3.4 INTRODUÇÃO AO PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO POR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Uma vez que a realidade da vibração é inerente à vida, encontramos relevantes citações como a de França e Sotelo, 2013, que enredam todo o processo de análise e planejamento de manutenção sob os espectros de vibração ao delinear o dever de manter o controle sobre as vibrações nos equipamentos com o planejamento, programação e efetivação da manutenção antes que ocorram avarias, uma vez que não podemos eliminar esse fenômeno.

Para tal, aplicam-se ferramentas para o planejamento como o quadro de Gravidade Urgência e Tendência (GUT), Diagrama de Pareto, e o quadro de forças, fraquezas, oportunidade e ameaças (SWOT), seguidos da programação cronológica quer por planilhas Excel ou por softwares específicos como o Minitab por exemplo.

Outras ferramentas gerenciais mais específicas para engenharia de produção, como diagramas de raias, aumentam o controle gerencial e a efetividade nos processos de manutenção; Porém, quanto a estes, foge do objetivo minuciar.



#### 4 ANÁLISE TRIBOLÓGICA

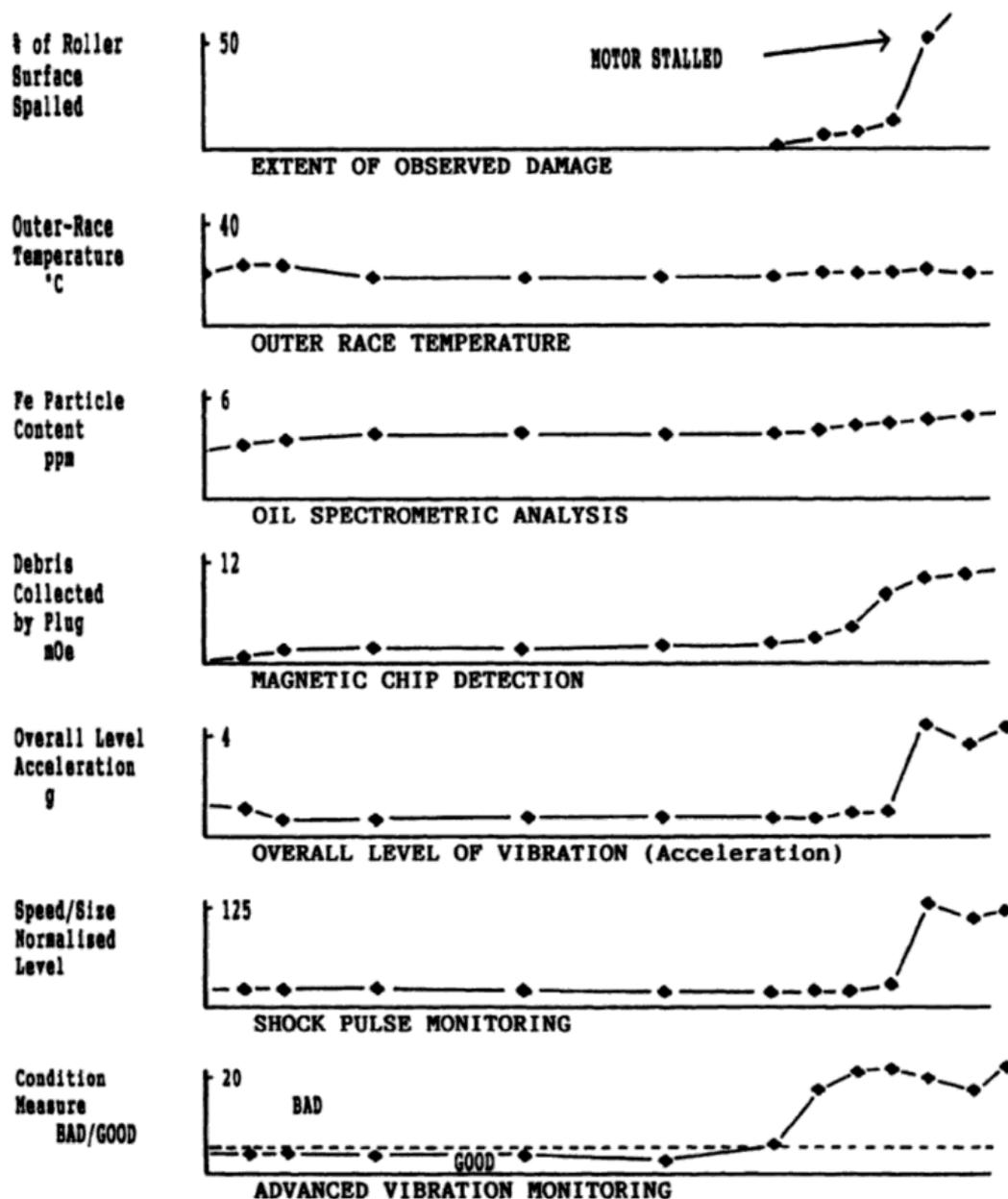
Em sequência, a segunda ferramenta de análise das condições ideais/reais dos motores à viabilizar o gerenciamento preditivo em estudo é a análise de óleo.

“Tribologia” originada de dois termos gregos cujo primeiro termo - o radical “*τριβή*” - faz menção à fricção, roçamento e demais variações, exprime etimologicamente que esta ferramenta de análise refere-se ao estudo do atrito de partes móveis pela inspeção dos lubrificantes (JOST, 1996).

Essa, objetiva identificar e quantificar os níveis de desgaste dos equipamentos e consiste em técnicas que identifiquem a quantidade e a natureza dos contaminantes presentes no fluido, que por sua vez indicam o desgaste da máquina (SONDHIYA e GUPTA, 2012).

HUNT, Trevor M (1993), apontou a análise da condição do “lubrificante” como o método mais utilizado no acompanhamento periódico do corpo humano, e mostrou a relação entre a quantidade de informações possíveis e eficazes na análise do sangue em analogia à dimensão de informações e eficiência na análise do óleo que, segundo ele, percorre toda a extensão dos mecanismos e carrega informações desde canais capilares aos grandes *sumps*, trazendo informações de fato prévias e que em muitas vezes não são possíveis identificar com tanta antecedência em outras formas preditivas de inspeção, como o caso ilustrado na figura 5:

Figura 5 – Monitoramento de rolamento de roletes



Fonte: HUNT (1993, p. 11 apud Stewart, 1975)

A figura exemplifica um caso de quebra de rolamento onde a análise espectrométrica do óleo já vinha alertando sobre a não conformidade de componentes na máquina pelos os altos índices de contaminantes no óleo, muito antes que outros métodos de análise puderam identificar. Ao contrário, a parte majoritária dos demais métodos também empregados na mesma máquina só puderam identificar variações do equipamento nas vésperas da culminação falha, isto é, na iminência da quebra.

## 4.1 PROCEDIMENTO

Existem diversos tipos de ensaios para análise de lubrificantes e cada um atenta-se à algum aspecto particular: quantidade de água, índice de viscosidade, rigidez dielétrica, determinação de elementos, determinação de insolúveis etc, como apontam as mais de quinze normas técnicas, tais quais ASTM D 2270, NBR 5503, NBR 10768, NBR 2485, NBR 14359, NBR 14786, NBR 14953, NBR 6869 e ainda várias outras referentes à este campo.

Sendo assim, o método a utilizar-se será, conseqüentemente, dependente da aplicação à que se demanda:

Enquanto em um óleo de turbina a vapor o aspecto de contaminação por condensado é relevante, para motores de combustão interna a diluição por combustível é o que interessa. Deste modo, as características a serem analisadas nos óleos lubrificantes dependem da aplicação. (Kardec e Nascif, 2009, p.292).

Os autores supracitados, concordam que dos diversos métodos, os mais usuais são pela análise laboratorial para monitoração das características principais do óleo (Espectrometria) e/ou pela análise de partículas contaminantes (Ferrografia).

### 4.1.1 Espectrometria

Neste ensaio, o lubrificante é aquecido e exposto à diferentes ondas luminosas radioativas na finalidade de identificar os diferentes materiais presentes na amostra justamente pela resposta natural que cada um oferece à essas ondas induzidas. Essas diferentes radiações são obtidas pelas diferentes propriedades eletrônicas que os átomos excitadores portam e, adequadamente a recíproca de cada impureza presente no lubrificante analisado também se mostram. (LITTLE, 2006)

Assim sendo, a norma ABNT NBR 14066 (2008) aponta, por exemplo, para a determinação da presença do magnésio no fluido a incidência de uma lâmpada de catodo oco de magnésio e para a determinação do zinco, uma lâmpada de catodo oco de zinco.

Através de um detector ajustado à onda correspondente ao elemento em análise (como por exemplo 422,7 nm para cálcio, 285,2nm para magnésio ou 231,9nm para zinco) percebe-se a quantidade dessa impureza pela diminuição da intensidade luminosa – gerada pela lâmpada – conseqüente da absorção dessa radioatividade diretamente proporcional à concentração do elemento na amostragem (ABNT NBR 14066, 2008).

#### 4.1.2 Ferrografia

Enquanto a espectrometria objetiva identificar a natureza dos materiais contaminantes no lubrificante, uma vez que os resíduos dos desgastes pelo atrito entre as peças são transportados pelo fluido, a ferrografia procura entender como esses desgastes se ocorrem no equipamento e em qual intensidade ele está (BHUSHAN 2000).

Para isso, as normas ABNT NBR 5503 (2012) e NBR 14953 (2007) determinam a retirada dos materiais metálicos do óleo por meio de solubilização e extração desses materiais não metálicos solubilizados pela centrifugação ultrassônica, ou pela simples atração magnética de partículas metálicas enquanto da decantação do óleo

Feito isso, analisa-se as formas das partículas. Por Sondhiya e Gupta (2012), sabemos:

There are six basic wear particle types generated through the wear process. These include metallic particles that comprise of Normal Rubbing Wear, Cutting Wear Particles, Spherical Particles, Severe Sliding particles, Bearing Wear Particle (Fatigue Spall Particles, Laminar Particles) and Gear Wear (Pitch Line Fatigue Particles, Scuffing or Scoring Particles) There do also exist sand and dirt particles responsible to generate wear particles in the system. The particles are classified to determine the type of wear and its source. (Sondhiya e Gupta, 2012, p.47)

Assim, portanto, tamanhos e formas das partículas passam a nortear possíveis as causas como fadiga, falha na lubrificação, abrasão etc (SONDHIYA e GUPTA, 2012).

#### 4.2 ANÁLISE

Tendo sido aplicado algum dos modelos de detecção, faz-se então a análise das possíveis origens dos matérias suspensos.

Para isso, HUNT (1993) levantou uma lista de materiais e suas possíveis origens em diversas máquinas.

**Tabela 2 – Materiais e origens**

Boron	Seals, airborne dust, water, coolants.		
Calcium	Oil additive, grease, some bearings.		
Chromium	Plating metal (replacing silver in many newer engines), seals, bearing cages, piston rings and cylinder walls on reciprocating engines, chromate corrosion inhibitors (coolant leaks).	Manganese	Valves, blowers, exhaust and intake systems.
		Magnesium	Aircraft engine cases for accessories, component housings, marine equipment (affected by water), oil additive.
Copper	Main or rod bearing thrust bearings, wrist pin bushes, oil coolers, gears, valves, turbocharger bushes, washers, copper radiators (coolant leaks). Note that copper is usually present in the form of an alloy, either bronze or brass, and hence is determinable by the additional presence of tin (bronze) and zinc (brass).	Molybdenum	Piston rings (some diesels), electric motors, oil additive.
		Nickel	Bearing metal, valve train metal, turbine blades.
		Phosphorus	Oil additive, coolant leak.
		Silicon	Airborne dust, seals, antifoaming additive (some oils).
		Silver	Bearing cages (silver plating), puddle pumps, gear teeth, shafts, bearings in some reciprocating engines.
Iron	Cylinder walls, valve guides, rocker arms, piston rings, ball and roller bearings, bearing races, spring gears, safety wire, lock washers, locking nuts, locking pins, bolts. Not surprisingly, this is the most common wear metal.	Sodium	Coolant leaks, grease, marine equipment (affected by water).
		Tin	Bearing metal and thrust metal bushes, wrist and piston pins, pistons, rings, oil seals, solder.
		Titanium	Bearing hub wear, compressors blades and discs (aero-engines).
Lead	Bearing metal (usually in addition to high copper or aluminium), seals, solder, paints, greases. (Could be confused by the lead in leaded fuels.)	Zinc	Brass components, neoprene seals, grease, coolant leaks, oil additive.

**Fonte:** HUNT (1993, p. 209)

Esta tabela, é um exemplo direcional de à quais elementos de máquinas poderiam ser dadas maiores atenções caso seus materiais fossem identificados pela tribologia.

Observa-se que concordantemente, todos os autores já mencionados destacam à necessidade de estipular e manter uma periodicidade para a análise, em qualquer metodologia tribológica adotada, a fim de se obter o histórico da máquina e ser, por consequência, mais assertivo quanto à intensidade do desenvolvimento dos desgastes, o que embasa as medidas preditivas à se acionar, como à exemplo, Sondhiya e Gupta (2012) dizem:

Regular monitoring of WPC (Wear Particle Concentration) thus alerts an operator earlier than any other damage symptoms. This in fact helps a maintenance engineer to schedule machine overhaul and / or be prepared for spares & replacement. (SONDHIYA e GUPTA, 2012, p.47)

Kardec e Nascif (2009), além de instruir que o volume de abrasivos gerados tenda a crescer proporcionalmente à aproximação da falha, ainda exemplificam que caso na periodicidade de três meses não hajam avarias nos lubrificantes, então pode-se aumentar o TBS (Time Between Schedule) mas havendo alterações, os intervalos de inspeção devem ser encurtados, intervenções programadas e ações tomadas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho veio a ser a exposição de metodologias preditivas para inspeções regulares de motores aeronáuticos com o fim de estudar possibilidades acessíveis à companhias aéreas quer de pequeno ou grande porte.

Atingiu-se o intento desta proposta ao apontar, em especial, duas ferramentas acessíveis no mercado brasileiro e que fornecem maior assertividade, quando sob o gerenciamento contínuo, ao processo de manutenção dos motores aeronáuticos, uma vez que esses modelos não demandam a abertura dos motores para então iniciar-se a investigação propriamente dita; Fato esse que minimiza altos custos e perdas cronológicas de reparo (MTTR), o que favorece direta e indiretamente a diminuição dos números em falhas de motores aeronáuticos por ineficiência ou negligência de manutenção no solo Nacional.

O campo industrial tendo desenvolvido suas estratégias de manutenção desde puramente corretiva à técnicas preditivas, lançou mão do domínio de diversas ferramentas dentre as quais destacou-se, por hora, a análise de vibração e de óleo como opções viáveis para o nicho aéreo haja vista suas assertividades demonstradas sob pesquisa bibliográfica.

Por esta ótica faz-se notar, com as inúmeras referências industriais sobre análise de vibração e análise tribológica, que ambos os métodos detectivos, de forma geral, não são inovadores; entretanto, contrastando-se a transparência detectiva das ferramentas aqui estudadas tanto com os constantes dados de acidentes aéreos por falhas de motores da CENIPA quanto pela própria observação em campo, percebeu-se quanto a análise de óleo, que não faz-se registro da análise tribológica como um método assíduo e formalizado para a gestão preditiva de motores aeronáuticos em diversas empresas deste campo nos estados do sudeste brasileiro.

Quando sobre a análise de vibração, os históricos apontam como item básico a observação ativa, ágil e constante para todos os estágios de operação dos motores enquanto em voo ou mesmo quando da entrada e/ou saída das oficinas de manutenção. Porém, essa observação diz respeito puramente aos níveis pré-estabelecidos de fábrica para aceitação ou não aceitação dos motores para os variáveis regimes de voo; Enquanto este trabalho procurou embasar e fomentar o fato da aplicabilidade da técnica de inspeção de vibração atentando não meramente para os picos gerais nos espectros vibratórios, mas para esmiuçar cada frequência vibratória desarmônica aos históricos de manutenção e/ou modelagens matemáticas para

precisar os elementos geradores das anomalias oscilatórias e seu desenvolvimento no ciclo de vida do motor, mesmo antes de abri-lo para intervenções.

Uma vez que essas técnicas financeiramente mais acessíveis que diversas outras são também vastamente difundidas em outras indústrias, há de se inferir que pela distração de conhecimento especializado a indústria aeronáutica nacional não perceba esses benefícios.

Quanto ao aporte da manutenção industrial, há ainda muito o que se pesquisar sob a era 4.0 que as indústrias vêm passando. Para a análise de vibrações indico para trabalhos futuros, a busca por níveis mais assertivos das origens de vibração em motores de palhetas articuláveis.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. Samuel. **Manutenção mecânica industrial**: Princípios técnicos e operações. São Paulo: Érica, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Avaliação de vibrações mecânicas**, NBR 10082: 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Análise de vibrações – Terminologia**, NBR 15928: 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Filtros para óleo lubrificante – Análise de amostra de óleo**, NBR 5503: 2012
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Óleos lubrificantes – Determinação de bário, cálcio, magnésio e zinco por espectrometria de absorção atômica**, NBR 14066: 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **Óleos lubrificantes usados – Determinação de insolúveis**, NBR 14953: 2007
- BERISTAIN, Sergio, P. Lizana, and J. N. Redondo. Diseño de un Sismógrafo Conectado a una Computadora. **Científica** ISSN: 1665-0654 v.6 n. 1, pp.17-26, 2002.
- BHUSHAN, Bharat. **Modern tribology handbook**, two volume set. New York: CRC press, 2000.
- CABRAL J.P. **Gestão da Manutenção** de Equipamentos, Instalações e Edifícios, Lisboa, Lidel. 2009.
- ÇENGEL, Yunus A.; PALM III, William J. **Equações Diferenciais**. AMGH Editora, 2014.
- CLIFTON David, TARASSENKO L. **Condition monitoring of gas-turbine engines**. 2006. 57 f. Transfer Report, Department of Engineering Science, University of Oxford, Oxford, 2006.
- COLLACOTT, R. A, **Mechanical fault diagnosis** and condition monitoring, London, Chapman and Hall, 1977.
- DOU, Dongyang; ZHOU, Shishuai. Comparison of four direct classification methods for intelligent fault diagnosis of rotating machinery. **Applied Soft Computing**, v. 46, p. 459-468, 2016.
- DOWSON, D. A tribological day. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: **Journal of Engineering Tribology**, v. 223, n. 3, p. 261-273, 2009.
- DOWSON, Duncan. **History of tribology**. Addison-Wesley Longman Limited, 1979.

FELDMAN, Michael. "Time-varying vibration decomposition and analysis based on the Hilbert transform." **Journal of Sound and Vibration** 295, no. 3-5 (2006): 518-530, 2006.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4.ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GREGÓRIO, Parreira G. F, SILVEIRA, A. M. **Manutenção industrial**. Porto Alegre: SAGAH, 2018.

HERMANN, PENTEK and B. OTTO. Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), 49, 2016, Koloa, **Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios**, Piscataway, NJ: IEEE, Jan. 2016

HOLANDA, Sandra Maria Santos. **Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto**. 2016. 99 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2016.

HUNT, Trevor M. **Handbook of wear debris analysis and particle detection in liquids**. Berlin: Springer Science & Business Media, 1993

IFM-ELETRONIC, **Sistemas de monitoramento da condição de máquinas / manutenção preditiva**, 21/jan/2019. Disponível em: [https://www.ifm.com/br/pt/shared/tecnologien/sensor-de-vibracao/vvb?gclid=EA1aIQobChMIivyyqkrCx6QIVioeRCh0n\\_QSIEAAYASAAEgIuyfD\\_BwE](https://www.ifm.com/br/pt/shared/tecnologien/sensor-de-vibracao/vvb?gclid=EA1aIQobChMIivyyqkrCx6QIVioeRCh0n_QSIEAAYASAAEgIuyfD_BwE). Acessado em 13/05/20 às 16:00h.

JOST, H.P, 1966, **Lubrication (tribology) education and research**, Department of Education and Science, London: HMSO, 1966.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: Função Estratégica**. 3.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark: Petrobras, 2009.

LIANG, Steven Y; LU, Yanfei; XIE, Rui. Bearing fault diagnosis with nonlinear adaptive dictionary learning. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 102, n. 9-12, p. 4227-4239, 2019.

LITTLE, James L.; WEMPE, Michael F.; BUCHANAN, Charles M. Liquid chromatography–mass spectrometry/mass spectrometry method development for drug metabolism studies: examining lipid matrix ionization effects in plasma. **Journal of Chromatography**, v. 833, n. 2, p. 219-230, 2006.

LUIZ A. Moysés. **Coleção Física 2: Gravitação. Ondas e Termodinâmica**. São Paulo. Livraria da Física, 2007.

MARCONI, M. de A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008;

MCFADDEN, P. D.; SMITH, J. D. Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique - a review. **Tribology international**, v. 17, n. 1, p. 3-10, 1984.

MCFADDEN, P. D.; SMITH, J. D. Model for the vibration produced by a single point defect in a rolling element bearing. **Journal of sound and vibration**, v. 96, n. 1, p. 69-82, 1984.

NATIONAL INSTRUMENTS, **Medição de Vibração com Acelerômetros**, 14/mar/2019 <https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/measuring-vibration-with-accelerometers.html>. Acessado em 13/05/20 às 13:00h.

PINTO V. **Gestão da Manutenção**. 1 ed. Lisboa: IAPMEI, 1999

PORTUGUESE MAINTENANCE STANDARDS. **Maintenance - Maintenance terminology**; Trilingual version EN NP 13306:2017.

RAMÍREZ, Ricardo R., Luis Fernando C. ALARCON, and Peter KNIGHTS. "Benchmarking system for evaluating management practices in the construction industry." **Journal of Management in Engineering** 20, no. 3 P. 110-117, 2004.

ROYLANCE, B. J. Machine failure and its avoidance - what is tribology's contribution to effective maintenance of critical machinery? Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: **Journal of Engineering Tribology** 217.5 p. 349-364, 2013.

SANTOS, L. C. B.; ALMEIDA, C. A.; FARIAS, J. L.; et al. **Helicópteros - Sumário Estatístico 2008-2017**. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). Brasília. 2018;

SANTOS, L. C. B.; ALMEIDA, C. A.; FARIAS, J. L.; et al. **Aviões - Sumário Estatístico 2008-2017**. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA). Brasília. 2018;

SLACK, Nigel. **Administração da Produção**, 2.ed. São Paulo, Atlas, 2008.

SONDHIYA, Om Prakash; GUPTA, Amit Kumar. Wear debris analysis of automotive engine lubricating oil using by ferrography. **International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Volume**, v. 2, 2012.

SOTELO, J. J.; FRANÇA, Luís Novaes Ferreira. **Introdução às vibrações mecânicas**. São Paulo: Edgar Blucher, 2006.

TRIVIÑOS, A. N. S. **Introdução à pesquisa em ciências sociais: a pesquisa qualitativa em educação**. São Paulo: Atlas, 1987.

WIREMAN, Terry. **Developing Performance Indicators for Managing Maintenance**. New York: Industrial Press, Inc. 2005.