

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
JOSÉ GILDENYS CHARLL DOS SANTOS**

**CONTROLE DE VIBRAÇÃO EM HELICÓPTEROS:
eficiência na segurança de voo**

**Taubaté – SP
2018**

JOSÉ GILDENYS CHARLL DOS SANTOS

**CONTROLE DE VIBRAÇÃO EM HELICÓPTEROS:
eficiência na segurança de voo**

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador: Prof. Me. Ivair Alves dos Santos

Co-orientador: Prof. Me. Fábio Henrique Fonseca Santejani

**Taubaté – SP
2018**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado
de Bibliotecas / UNITAU - Biblioteca das Engenharias**

S237c Santos, José Gildenys Charll dos
Controle de vibração em helicópteros: eficiência na
segurança de voo. / José Gildenys Charll dos Santos. - 2018.
48f. : il; 30 cm.
Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) –
Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia
Mecânica e Elétrica, 2018
Orientador: Prof. Me. Ivair Alves dos Santos,
Coorientador: Prof. Me. Fábio Henrique Fonseca
Santejani, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica.
1. Vibrações. 2. Helicópteros. 3. Desbalanceamento. 4.
Segurança de voo. I. Título.

JOSÉ GILDENYS CHARLL DOS SANTOS

CONTROLE DE VIBRAÇÃO EM HELICÓPTEROS: eficiência na segurança de voo

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO APROVADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO COORDENADOR DE CURSO DE GRADUAÇÃO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



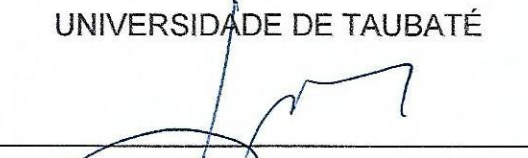
Prof. Me. FÁBIO HENRIQUE FONSECA SANTEJANI

Coordenador de Trabalho de Graduação

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Me. IVAIR ALVES DOS SANTOS
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ



Prof. Me. ANTONIO CARLOS TONINI
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

11 de junho de 2018

Dedico este trabalho a todos os familiares e amigos que contribuíram para a sua elaboração e a todas as pessoas que se dedicam à engenharia a fim de sempre melhorar a vida do ser humano.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, fonte da vida, graça e toda sabedoria.

Ao meu pai *José Hamilton dos Santos (em memória)*, figura importante na minha formação, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivou meus estudos.

À minha mãe *Maria do Carmo dos Santos*, por sua cumplicidade, pelos bons sentimentos, por ser a pessoa que pude contar nos momentos difíceis e que sempre esteve presente no compartilhamento das vitórias. Ela que sempre torceu pelo sucesso dos filhos, dando ensinamento, batalhando sempre para fornecer conforto e alegria à família. Sou grato por sua vontade de vencer, de correr atrás dos sonhos, de enfrentar qualquer luta só para ver os filhos sorrirem no final. Agradeço por ser este exemplo de pessoa, um ser incrível e com um coração gigante.

Aos meus irmãos *Gilney, Gilmar, e Gilsepp Charll dos Santos*, pela sincera amizade, dedicação e atenção.

À minha digníssima esposa *Livia Renata de Carvalho Charll dos Santos* que esteve ao meu lado nas horas de choro e de sorriso, nas horas de lamento e alegria. Agradeço pela compreensão nos momentos de ausência em prol de algo melhor para a família. Sou grato por estar sempre ao meu lado, apoiando-me em qualquer momento. Obrigado pelo amor e comunhão existente entre nós.

À minha adorável filha *Heloísa Charll Carvalho dos Santos*, maravilhoso presente dado por Deus, onde encontro expiração para sempre ser melhor em prol da família.

Ao meu orientador, *Prof. Me. Ivair Alves dos Santos* e co-orientador *Prof. Me. Fábio Henrique Fonseca Santejani*, por todo apoio e dedicação durante a elaboração deste trabalho, pelo incentivo e, principalmente, pela amizade.

Ao *Prof. Me. Antônio Carlos Tonini* por aceitar, juntamente com o meu orientador e co-orientador, compor a banca examinadora.

Ao Engenheiro Aeronáutico *Luiz Guilherme Alfradique Quitella da Silva*, pelo apoio e atenção na realização total do estágio supervisionado.

“Se a palavra chave da Engenharia é criação, e Deus criou os céus e a terra, o mar e tudo quanto neles há, fica claro que o melhor projeto de engenharia que foi criado na história pelo maior Engenheiro foi o ser humano.”
(JOSÉ GILDENYS C. DOS SANTOS)

RESUMO

No campo tecnológico, as aplicações de vibrações na engenharia são de grande importância, sendo um grande desafio para os fabricantes de helicópteros. Por causa do desbalanceamento das pás do helicóptero, que resulta em vibrações de baixa frequência, uma manutenção de controle de vibração deve ser realizada para melhorar a eficiência da tripulação, proporcionar uma operação com segurança, fornecer conforto aos passageiros, garantir confiabilidade dos equipamentos eletrônicos e mecânicos e minimizar a fadiga do rotor e da fuselagem da aeronave. O monitoramento da vibração para uma melhor operação seja no fator material como no fator humano é de suma importância. Esse trabalho tem como objetivo realizar uma manutenção de balanceamento no helicóptero “Fennec” Airbus AS 550 A2 utilizado pela Aviação do Exército para o emprego de reconhecimento e ataque. Para isso foi realizada uma pesquisa quantitativa, onde se traduz os números que correspondem às vibrações para a classificação e análise de informações, utilizando-se recursos e técnicas estatísticas. Com o objetivo de despertar todos que trabalham com helicópteros para o monitoramento das vibrações, tendo em vista a segurança de voo, uma pesquisa descritiva utilizando-se práticas normalizadas de coleta de dados foi realizada, assim como uma pesquisa bibliográfica foi de suma importância neste trabalho. Todos os passos até chegar num resultado de medição, enquadrado na tolerância especificada pelo fabricante são mostrados nesse estudo. O método utilizado é uma análise de vetores a partir do nível de vibração indicado pelo aparelho Aces Model 2020 Probalancer Analyser com os acelerômetros da Aces Systems model 991D-1. Concluindo-se que a análise de vibrações é uma ferramenta poderosa no auxílio à prevenção de falhas, diminuindo o custo de manutenção, prolongando a vida útil de um helicóptero e preservando o bem maior que é o fator humano.

Palavras-chave: Vibrações, helicópteros, desbalanceamento, segurança de voo.

ABSTRACT

In the technological field, the applications of vibrations in engineering are of great importance, being a great challenge for helicopter manufacturers. Because of the unbalance of the helicopter blades, which results in low frequency vibrations, a maintenance of vibration control must be performed to improve the efficiency of the crew, provide a safe operation, provide passenger comfort, ensure reliability of electronic and mechanical equipment, and minimize aircraft rotor and fuselage fatigue. Monitoring the vibration for a better operation whether in the material factor or in the human factor is of paramount importance. This work aims to perform a maintenance of balancing on the "Fennec" Airbus AS 550 A2 helicopter used by Army Aviation for the use of reconnaissance and attack. For this, a quantitative research was carried out, where the numbers that correspond to the vibrations for the classification and analysis of information are translated, using statistical resources and techniques. In order to awaken all those who work with helicopters for the monitoring of vibrations, in view of flight safety, a descriptive research using standardized data collection practices was carried out, just as a bibliographical research was of great importance in this work. All steps up to a measurement result, within the tolerance specified by the manufacturer, are shown in this study. The method used is a vector analysis from the vibration level indicated by the Aces Model 2020 Probalancer Analyzer with Aces Systems model 991D-1 accelerometers. Concluding that vibration analysis is a powerful tool in helping to prevent glitches, reducing maintenance costs, prolonging the life of a helicopter and preserving the greater patrimony that is the human factor.

Keywords: Vibrations, helicopters, unbalance, flight safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelagem mecânica do corpo humano.....	20
Figura 2 - Ponte de Tacoma Narrows durante vibração induzida pelo vento.....	21
Figura 3 - Frequências naturais de órgãos do corpo humano	23
Figura 4 - AIRBUS AS 550 A2 no pátio da Aviação do Exército em Taubaté-SP	30
Figura 5 - Acs Model 2020 com seus acessórios e acelerômetros.....	31
Figura 6 - Rastreabilidade do Aces Model.....	32
Figura 7 - Posição da colocação dos pesos no RC.....	33
Figura 8 - Gráfico de correção no regime nominal do Rotor de Cauda.....	33
Figura 9 - Gráfico de correção do Eixo Curto.....	36
Figura 10 - Posições de colocação de pesos no EC.....	36
Figura 11 - Gráfico de correção do RP no solo e no pairado.....	38
Figura 12 - Adição de plaquetas de balanceamento no RP.....	38
Figura 13 - Haste de comando de passo do RP.....	40
Figura 14 - Gráfico de correção do RP no voo.....	40
Figura 15 - Ajuste dos tabs.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais sintomas relacionados com a frequência da vibração.....	22
Tabela 2 - Valores da medição do 1º giro no solo para o RC.....	32
Tabela 3 - Valores da medição do 2º giro no solo para o RC.....	34
Tabela 4 - Valores da medição do 3º giro no solo para o RC.....	34
Tabela 5 - Valores das medições dos giros no solo para o EC.....	35
Tabela 6 - Raciocínio para colocação das plaquetas.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MET	Manual de Manutenção
A.C.	antes de Cristo
fR	frequência de rotação do rotor
ISO	International Organization For Standardization
ADS	atenuadores dinâmicos sincronizados
SI	Sistema Internacional de Unidades
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
rpm	rotações por minuto
RC	rotor de cauda
IPS	inches per second
EC	eixo curto
NR	rotações no rotor principal
RP	rotor principal
Plq	plaquetas
PMC	potência máxima contínua
RM	resultados da medição
RB	resultado base
IM	incerteza de medição

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1 Importância do estudo da vibração	14
2.2 Vibrações: conceitos básicos	15
2.3 Vibração no helicóptero.....	16
2.4 Vibração no homem	19
2.5 Sistema homem-máquina.....	23
2.6 Segurança de voo	24
3 METODOLOGIA.....	27
3.1 Classificação dos métodos de pesquisa	27
3.1.1 De acordo com a abordagem.....	27
3.1.2 De acordo com o objetivo.....	28
3.1.3 De acordo com os procedimentos técnicos	28
4 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODO	30
4.1 Medição do nível de vibração	32
4.2 Medição do nível de vibração no Rotor de Cauda (RC)	32
4.3 Medição do nível de vibração no Eixo Curto (EC).....	35
4.4 Medição do nível de vibração no Rotor Principal (RP)	37
4.4.1 Rotor principal no solo, pairado e voo	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
6 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS.....	45
ANEXO A – MEDIÇÕES DE VIBRAÇÕES NO ROTOR PRINCIPAL	48

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, no campo tecnológico, as aplicações de vibrações na engenharia são de suma importância, sendo um grande desafio para os fabricantes de helicópteros. O desbalanceamento das pás do helicóptero resulta em vibrações de baixa frequência, estas precisam ser controladas para melhorar a eficiência da tripulação, proporcionar uma operação com segurança, fornecer conforto aos passageiros, garantir confiabilidade dos equipamentos eletrônicos e mecânicos e minimizar a fadiga do rotor e da fuselagem da aeronave (ROSEN, 1997). A vibração está sempre presente, de fato nada está parado na natureza. Na maioria das atividades humanas se encontra alguma forma de vibração. Vê-se porque ondas luminosas se propagam, ouvi-se porque o tímpano vibra. Os batimentos cardíacos são movimentos vibratórios do coração, a respiração está associada à vibração dos pulmões, a fala se fundamenta na vibração das cordas vocais e os movimentos humanos envolvem oscilações de braços e pernas (RAO, 2011). Em diversos campos da atividade humana, fenômenos apresentam variáveis cujo comportamento é oscilatório (biologia, física, química, economia, etc.). Na engenharia, projetos de máquinas, motores, estruturas, fundações, turbinas, sistemas de controle, e outros, questões relacionadas a vibrações são exigidas e levadas em conta, até porque em vários sistemas de engenharia, o homem atua como parte integrante do mesmo. O homem recebe a vibração resultando desconforto e perda de eficiência. Por isso a redução dos níveis vibratórios de uma máquina é um dos propósitos importantes do estudo.

A vibração é um fator constante para quem opera com helicópteros, pois possui vários componentes rotativos. Com isso, o helicóptero, os pilotos e mecânicos são os que mais sofrem com esse fenômeno físico. Por isso é de suma importância o controle das vibrações nas máquinas rotativas, pois auxilia na prevenção de falhas, diminui o custo de manutenção, prolonga a vida útil de um helicóptero e preserva o bem maior que é o fator humano.

Na Engenharia Mecânica, o controle de vibrações é um campo de estudo bastante relevante, cujo principal objetivo reside em diminuir e controlar as vibrações de um sistema.

Logo este trabalho visa despertar para o monitoramento de vibrações como uma ferramenta eficiente na prevenção de acidentes com helicópteros, realizando uma manutenção de análise de vibração do helicóptero “Fennec”, AIRBUS AS 550 A2, pelo processo de medição do Manual de Manutenção da Aeronave (MET), e a partir dos resultados obtidos, utilizar um método geométrico, por meio de vetores, para o balanceamento do rotor de cauda (frequência de vibração moderada), eixo curto (frequência de vibração alta) e rotor principal (frequência de vibração baixa), cuja finalidade é manter a aeronave dentro do nível de vibração especificado pelo fabricante.

A partir desta proposta tem-se:

- no Capítulo 2 – “Fundamentação teórica”- uma abordagem teórica do assunto em questão, trazendo a importância do estudo do tema, e alguns conceitos de modo que o leitor possa ter uma noção prévia das peculiaridades do trabalho. Faz-se também uma revisão bibliográfica onde são apresentados os principais trabalhos encontrados na literatura técnico-científica sobre o tema e a importância da segurança de voo.

- no Capítulo 3 – “Metodologia” - uma abordagem sobre os métodos de pesquisa.

- no Capítulo 4 – “Materiais, equipamentos e método” - todos os materiais, equipamentos que foram utilizados para a realização da manutenção, bem como os métodos empregados. Nesta seção são expostos os meios dos quais foram utilizados para execução do trabalho.

- no Capítulo 5 – “Resultado e discussão” - os resultados encontrados na manutenção, seguido de uma discussão, onde se faz uma análise crítica dos resultados comparando-os com as especificações do fabricante.

- no Capítulo 6 – “Conclusão” – algumas considerações finais sobre o trabalho realizado, que abrange um pequeno alerta sobre a vibração no helicóptero e uma conclusão, mostrando mais uma vez a grande importância do estudo do tema definido no trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.

- e por fim as Referências de consulta utilizadas neste Trabalho de Graduação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DA VIBRAÇÃO

Segundo Soeiro (2008), desde o começo da História da Humanidade a vibração estava presente. Instrumentos rudimentares como tambores e apitos têm na sua essência e princípio de funcionamento um problema vibratório. Tempos depois foram criados os instrumentos musicais (percussão, cordas, metais, etc.), aproveitando movimentos vibratórios, geradores de ondas sonoras.

O avanço das ciências básicas que derivam a matemática e mecânica geral impulsionou o desenvolvimento da teoria da vibração. Historicamente, originou-se nos antigos filósofos gregos do primeiro milênio antes de Cristo (A.C). A partir de Pitágoras de Samos (cerca de 570 – 497 A.C.), como fundador da acústica, surgiram outros vários estudiosos que somaram para a construção dessa teoria, por exemplo: Aristóteles – o primeiro a utilizar o termo “acústica” num texto, Galileu – estabeleceu uma relação entre o comprimento do pêndulo e o seu período de oscilação formalmente e observou a ressonância entre dois corpos, com a mesma frequência natural, Bernoulli - propôs o princípio da superposição linear de harmônicas, Hooke - enunciou a Lei da Elasticidade, dentre outros nomes importantes na área (SOEIRO, 2008).

O ser humano está envolvido por vibrações, sendo um risco físico abordado em termos de segurança no trabalho, causando no homem cansaço, irritação, dores dos membros, dores na coluna, doença do movimento, artrite, problemas digestivos, lesões ósseas, lesões dos tecidos moles, lesões circulatórias, etc. (SANTOS, 201-?). Contudo, observa-se a grande importância do conhecimento e aplicação de vibrações na engenharia.

Os primeiros estudos de vibrações em engenharia foram motivados pelo problema de balanceamento em motores (SOEIRO, 2008). Conforme Rosen (1997), o desbalanceamento das pás do helicóptero, por exemplo, resulta em vibrações de baixa frequência, estas precisam ser controladas para melhorar a eficiência da tripulação, proporcionar uma operação com segurança, fornecer conforto aos passageiros, garantir confiabilidade dos equipamentos eletrônicos e mecânicos e minimizar a fadiga do rotor e da fuselagem da aeronave.

Vários problemas que são originados em pás e rotores de turbinas ainda são um desafio de resolução para os engenheiros. De Soeiro (2008), as estruturas que são projetadas para suportar máquinas centrífugas pesadas (turbinas, motores compressores, bombas, etc.) também estão sujeitas a vibração. Partes dessas estruturas podem sofrer fadiga devido à variação cíclica de tensões induzidas. A vibração também provoca ruídos excessivos por causa do desgaste mais rápido de mancais e engrenagens. Em máquinas, parafusos são afrouxados por causa da vibração. Em processos de usinagem, um pobre acabamento superficial causado por trepidação que é oriundo da vibração é uma realidade.

De acordo com Sampaio (2004), existem várias razões para se estudar as vibrações, dentre elas: terremotos e ventos, música, acústica, análise modal, testes de vibração (análise modal, resistência de equipamentos, testes de recepção), choques, isolamento (cancelamento ativo e passivo), controle de condição (Manutenção Industrial).

2.2 VIBRAÇÕES: CONCEITOS BÁSICOS

Segundo Hibeller (2005), vibração é todo movimento periódico de um corpo ou sistema de corpos interligados, em torno de uma posição de equilíbrio, ou seja, qualquer movimento que se repete, regular ou irregularmente, depois de um intervalo de tempo. O movimento de um pêndulo e da corda de um violão são exemplos simples de vibrações no mundo real. Em engenharia estes movimentos ocorrem em elementos de máquinas e nas estruturas, quando estes estão submetidos a ações dinâmicas. Em geral há dois tipos de vibração, livre e forçada.

A *vibração livre* ocorre quando o movimento se mantém por forças restauradoras gravitacionais ou elásticas, como, por exemplo, o movimento de vai-e-vem de um pêndulo ou a vibração de uma barra elástica (HIBELLER, 2005).

Uma *vibração forçada* é causada por uma força externa periódica ou intermitente aplicada ao sistema (HIBELLER, 2005). O movimento de um rotor desbalanceado é típico de uma vibração forçada.

Ambos os tipos de vibração podem ser amortecidos ou não. Vibrações livres *não amortecidas* podem continuar indefinidamente, quando se consideram desprezíveis os efeitos das forças de atrito. Como na realidade tanto as forças de atrito internas quanto externas estão sempre presentes, o movimento de vibração de qualquer corpo é *sempre amortecido* (HIBELLER, 2005, p. 496).

O sistema oscilatório também pode ser dividido em Linear e Não linear.

Vibrações Lineares: obedecem ao Princípio da Superposição dos Efeitos, ou seja, existe uma proporcionalidade entre excitação e resposta (SOEIRO, 2008).

Vibrações Não-Lineares: não obedecem ao Princípio da Superposição (SOEIRO, 2008).

Segundo Soeiro (2008), as forças que atuam sobre o sistema podem ser determinísticas – onde se podem prever todas as características do movimento vibratório em qualquer instante de tempo, ou aleatórias - as não determinísticas, não sendo possível prever o que irá acontecer no movimento vibratório.

Para Aquino (2011), todas as máquinas rotativas produzem vibrações, a sua presença é normalmente caracterizada como um problema sério em diversas aplicações. Com isso, um sistema de controle de vibração é aplicado com o intuito de reduzir os danos provenientes de níveis de vibrações mais altos.

Tomando-se o helicóptero como foco, é inevitável que as vibrações não existam, contudo podem ser minimizadas no intuito de garantir o maior tempo de vida da máquina e seus componentes e preservar os operadores desse risco físico causador de vários danos orgânicos (SÉRVULO; SABA, 2009).

2.3 VIBRAÇÃO NO HELICÓPTERO

De Sérvulo e Saba (2009), por ter asas (pás de rotor), e muitas partes rotativas, inúmeros desbalanceamentos ou reações que podem provocar vibrações surgem no helicóptero. E se tratando dessa máquina a vibração não é tão aceitável, isso por causa de problemas estruturais e problemas orgânicos que os pilotos, mecânicos e passageiros podem sofrer.

É comum dividir as vibrações de helicópteros em três categorias: (a) alta frequência, onde a frequência de vibração (f) é muito alta em comparação com a frequência de rotação do rotor (fR), ($f \geq 20 fR$) – estas vibrações são principalmente pelo motor ou pela caixa de engrenagens; (b) frequência moderada ($20 fR > f \geq 5 fR$) – o rotor de cauda; (c) baixa frequência ($5 fR > f$) que é causada principalmente pelo rotor principal - estas vibrações são as que tem mais efeitos na tolerância humana e fadiga de partes mecânicas (ROSEN, 1997).

Para Sérvulo, Saba (2009) e Machado (2011), a vibração de baixa frequência é causada pelo rotor principal, pois é a parte que menos gira no helicóptero. É fácil de ser localizada e contada, é do tipo 1:1 (uma vibração para cada volta do rotor principal) de 100 a 400 ciclos por minutos de intensidade.

Pode ser de dois tipos: vertical e lateral (horizontal).

a) Vertical – é causada quando a pá está fora de pista (tracking), isso faz com que o helicóptero seja sacudido na vertical, conhecido como galope. Este galope é acentuado com o aumento da velocidade, porém permanecendo de baixa frequência. Problemas nas hastes de mudança de passo (pitch links), rolamentos de perfilamento (rolamento de mudança de passo) ou TAB (compensador da pá) podem ser os causadores dessa vibração (SÉRVULO; SABA, 2009. MACHADO, 2011).

b) Lateral – o desbalanceamento do rotor principal é o causador dessa vibração, ela sacode o helicóptero na horizontal (tanto da frente para trás como de um lado para o outro). A força centrífuga puxa o helicóptero para o lado que está mais pesado do rotor principal. Este tipo de vibração permanece constante em todas as velocidades do helicóptero, pois a rotação por minuto deve permanecer constante. Esta vibração pode ser causada por problemas no centro de massa da pá, rolamentos do cubo (batimento) ou damper (SÉRVULO; SABA, 2009. MACHADO, 2011).

Segundo Sérvulo, Saba (2009) e Machado (2011) a vibração intermediária, ou moderada, pode ser causada por vários elementos separados ou em conjunto, sendo difícil sua localização e também difícil de ser contada. É do tipo 2:1, ou 2Ω (ômega) (duas vibrações por volta), de 1000 a 2000 ciclos por minuto.

Como diz Sérvulo e Saba (2009), um tipo de vibração intermediária é aceitável, considerada normal àquela causada quando o helicóptero atinge a

velocidade aproximada de 13 knots (6,7 m/s). Esta vibração vai sacudir o helicóptero na lateral, sendo causada pela composição ou decomposição do arrasto de fuselagem, pela saída ou entrada do efeito solo, pela perda ou ganho da sustentação de deslocamento e pela atuação do fluxo transversal, sendo que após este fato a vibração desaparecerá. Qualquer outra vibração tipo intermediária é considerada anormal, necessitando de uma manutenção na aeronave.

Já a vibração de alta frequência, para Sérvulo e Saba (2009), acontece quando as partes que giram em alta rotação por minuto estão desbalanceadas, tais como: rotor de cauda e seu eixo de acionamento, motor e ventoinha. É possível de ser contada, a partir de 2000 ciclos.

Obs. 1: Caso o rotor de cauda for o causador dessa vibração, o piloto irá sentir um formigamento na área dos pedais (mais fácil de perceber) ou no assento.

Obs. 2: a vibração pode ocorrer por causa de um forte vento cruzado, devido ao batimento excessivo do rotor de cauda, para desaparecer com ela basta aproar ao vento (SÉRVULO; SABA, 2009).

É inevitável as vibrações nos helicópteros por serem máquinas que possuem componentes rotativos.

Helicópteros são inerentemente associados com a ocorrência de vibrações devido a diversos fatores, como por exemplo, folgas ou envelhecimento de componentes, desbalanceamento e efeitos aerodinâmicos indesejados. As pás que estão avançando podem entrar em regime transônico devido a alta velocidade relativa do escoamento do ar (velocidade do helicóptero somada com a velocidade da pá) e ocorrer o surgimento de ondas de choque, além disso, as pás no retorno (velocidade do helicóptero subtraída da velocidade da pá) podem apresentar estol dinâmico. Esse fenômeno induz vibrações que são transferidas para a fuselagem, causando desconforto aos passageiros e pilotos. A frequência de vibração transferida para a fuselagem depende do número de pás do rotor e resulta em uma faixa geralmente entre 2 Hz e 8 Hz (ou seja, na faixa entre 1/rev e N/rev, onde N é o número de pás do rotor) (ANICÉZIO, 2015, p.26).

2.4 VIBRAÇÃO NO HOMEM

A vibração frequentemente é considerada apenas um problema de engenharia, porém deve ser também um problema médico quando está relacionado ao ser humano (PEREIRA, 2005).

Tratando-se do homem as vibrações podem ser:

- De corpo inteiro – são vibrações transmitidas ao corpo do indivíduo sentado (reclinado ou não) em pé ou deitado. Normalmente ocorrem em trabalhos com máquinas pesadas como tratores, caminhões, ônibus, aeronaves, máquinas de terraplanagem, grandes compressores, máquinas industriais (CPSOL, 201-?, p. 4).
- Localizadas - são vibrações que atingem certas regiões do corpo, principalmente as mãos, braços e ombros. Normalmente ocorrem em operações com ferramentas manuais vibratórias como martelos, britadores, rebidadeiras, compactadores, politrizes, motosserras, lixadeiras, peneiras vibratórias, furadeiras (CPSOL, 201-?, p. 4).

A ISO 2631-1 (1997), na Seção 7 (saúde) trás os efeitos da vibração periódica, aleatória e transiente em pessoas saudáveis, expostas a vibrações no corpo inteiro durante viagens, no trabalho e atividades de lazer. A gama de frequência considerada é:

- 0.5 Hz a 80 Hz para a saúde, o conforto e a percepção, e
- 0.1 Hz a 0.5 Hz para o enjoo ao movimento

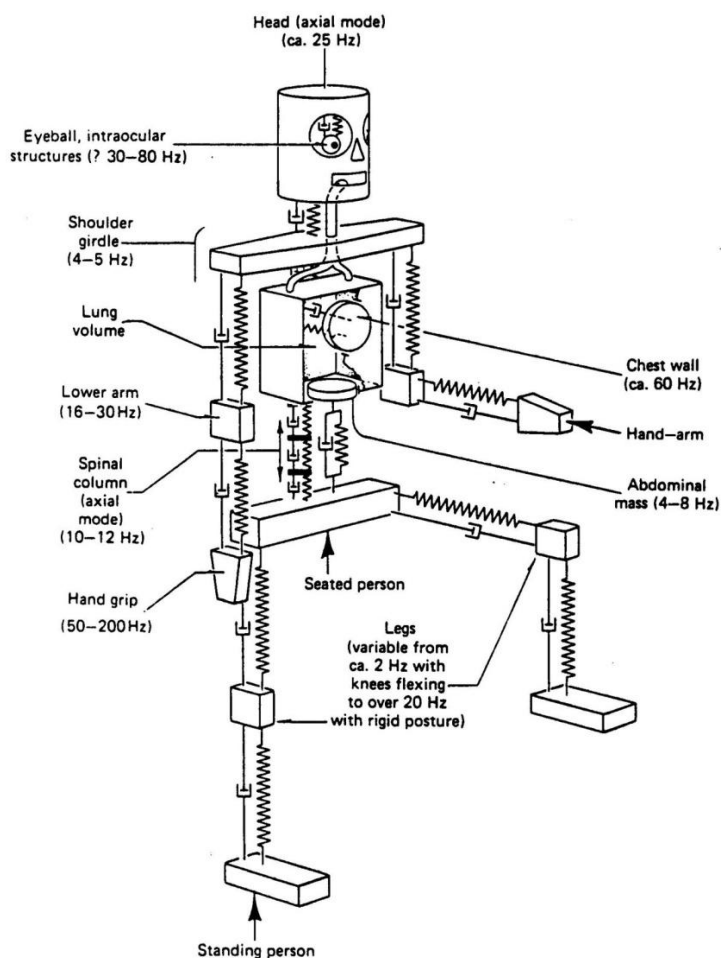
Segundo Pereira (2005), as vibrações no corpo inteiro podem causar dor de cabeça, fadiga e insônia após ou durante as exposições. Os sintomas são similares àquele que muitas pessoas sentem após uma longa viagem de carro. Estudos em motoristas de ônibus e caminhões mostraram que a exposição à vibração pode ter contribuído para o aparecimento de um número de distúrbios circulatórios, no intestino, respiratórios, musculares e na coluna, sendo os efeitos combinados da postura, hábitos alimentares e vibração são as possíveis causas destes distúrbios.

Para Chaffin et al (1999 apud BALBINOT, 2001), os efeitos biológicos da exposição à vibração são evidentes e esforços grandiosos devem ser realizados com intuito de reduzir tais exposições.

O corpo humano é uma estrutura biomecânica extremamente complexa, como afirma Pereira (2005), sendo sua sensibilidade à vibração dependente de diversos fatores, tais como, postura, tensão muscular, frequência, amplitude, duração e direção da vibração. Segundo Griffin (1996, apud PEREIRA, 2005), para uma faixa de frequência de 2 a 30 Hz, o corpo humano pode ser modelado como um sistema linear, podendo ser aproximado ao simples sistema massa-mola-amortecedor.

Dependendo da faixa de frequência da excitação, cada parte do corpo humano pode tanto amortecer, como amplificar as vibrações. As amplificações ocorrem quando partes do corpo passam a vibrar em frequências próximas às suas frequências fundamentais. Este fenômeno é conhecido como ressonância. Os efeitos de vibração direta sobre o corpo humano por períodos prolongados podem ser extremamente graves, provocando danos permanentes em alguns órgãos do corpo (PEREIRA, 2005).

Figura 1 - Modelagem mecânica do corpo humano



Fonte: CPSOL (201-?)

Esses danos no ser humano causados pela vibração – nas frequências baixas – ocorrem por causa da ressonância das partes do corpo humano, que pode ser considerado como um sistema mecânico complexo, Figura 1. Acima de 100 Hz, as partes do corpo absorvem a vibração, não ocorrendo ressonância (CPSOL, 201-?).

A ressonância é um fenômeno conhecido pelo fato de sempre que uma frequência natural de vibração de uma máquina ou estrutura coincide com a frequência da força externa atuante, levando a grandes deformações e falhas mecânicas. Um desses exemplos é o da ponte Tacoma Narrows, Figura 2, nos Estados Unidos, inaugurada em julho de 1940, caindo em 7 de novembro do mesmo ano quando entrou em ressonância induzida pelo vento (SOEIRO, 2008).

Figura 2 - Ponte de Tacoma Narrows durante vibração induzida pelo vento



Fonte: RAO (2011)

Segundo PET Engenharia Civil (2010), a ponte Rio-Niterói, no Rio de Janeiro, também oscilou significativamente em algumas ocasiões, de acordo com registro de câmeras de vídeo. Quando os ventos do sentido norte-sul ou sul-norte da baía alcançam os 52 km/h, atingem a frequência natural da ponte, que começa a oscilar, induzida pelas formações de vórtices (turbilhões), no escoamento do ar que passa pela estrutura. O movimento chega a 300 mm de amplitude, mas acontece só na vertical, porque a própria estrutura da ponte impede a movimentação na horizontal.

Embora estas oscilações não representem riscos à estrutura da ponte, o pânico causado pode ter consequências devastadoras. Atualmente, o Projeto de Atenuadores Dinâmicos Sincronizados (ADS) desenvolvido e patenteado pelo

professor Ronaldo Battista diminuiu as oscilações em 80% (PET Engenharia Civil, 2010).

Com foco no ser humano, observando a Figura 1, tem-se que a exposições à vibração vertical, na faixa de 5 a 10 Hz geralmente causam ressonância no sistema tórax-abdomen, na faixa de 20 a 30 Hz no sistema cabeça-pescoço-ombros e de 30 a 60 Hz no sistema ocular (PEREIRA, 2005).

Para a realização de um estudo sobre os efeitos da vibração no corpo humano, deve-se considerar não apenas a resposta do sistema biomecânico, mas também os efeitos patológicos, fisiológicos e psicológicos provocados pela vibração (PEREIRA, 2005, p. 24).

Os efeitos diretos da vibração estão diretamente relacionados com a saúde da pessoa. Estes efeitos são provocados por vibrações que atingem os órgãos internos do organismo, sendo dependentes das frequências naturais dos mesmos. Por outro lado, os efeitos indiretos dizem respeito à dificuldade na execução de tarefas e desconforto pela vibração (PEREIRA, 2005).

Os principais sintomas relacionados com a frequência da vibração estão relacionados na Tabela 1.

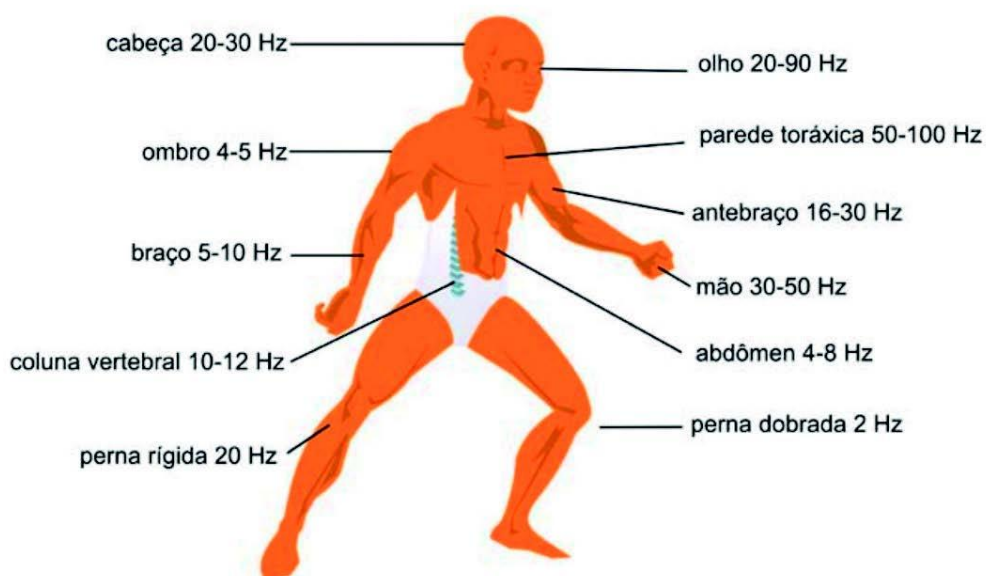
Tabela 1 - Principais sintomas relacionados com a frequência da vibração.

SINTOMAS	FREQUÊNCIA
Sensação geral de desconforto	4-9
Sintomas na cabeça	13-20
Maxilar	6-8
Influência na linguagem	13-20
Garganta	12-19
Dor no peito	5-7
Dor abdominal	4-10
Desejo de urinar	10-18
Aumento do tônus muscular	13-20
Influência nos movimentos respiratórios	4-8
Contrações musculares	4-9

Fonte: CPSOL (201-?)

Os sintomas relacionados acima são por causa da ressonância dos órgãos do corpo humano. A Figura 3 mostra as frequências de ressonância de alguns órgãos do corpo humano considerando o corpo como uma massa unitária.

Figura 3 - Frequências naturais de órgãos do corpo humano



Fonte: SIMÕES (2014)

2.5 SISTEMA HOMEM-MÁQUINA

Assim como o homem sofre com o fenômeno da ressonância, nos helicópteros também podem ocorrer esse fenômeno físico que dependendo do amortecimento existente, produz oscilações divergentes e pode causar o colapso da estrutura do helicóptero (DAMY, 2006).

Para se compreender melhor o inimigo que cerca os pilotos, mecânicos e passageiros, é necessário saber o que é frequência. Segundo Bonjorno et. al. (1999), vale a relação:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

onde f é a frequência e T , o período. Atenta-se também para unidade de frequência considerada no trabalho, o Hertz (Hz), que expressando em unidades do Sistema Internacional (SI) de base é equivalente a s^{-1} , onde s é a unidade de tempo

denominada segundo, e s^{-1} significa rotações ou ciclos por segundo (INMETRO, 2007).

À luz do Manual de Manutenção (AIRBUS, 2017) do helicóptero AIRBUS AS 550 A2 (Fennec) da Aviação do Exército, observa-se que a rotação do rotor principal é em torno de 382 rotações por minuto (rpm) no solo. Ora, se o rotor gira 382 vezes em um minuto, em um segundo ele faz aproximadamente 6,4 rotações, que é o mesmo de 6,4 Hz. Frequência tal que observando a Tabela 1, é prejudicial ao ser humano.

Como exemplo, podem ser citados estudos referente a dor de coluna em pilotos e mecânicos. Com a vibração produzida pelo helicóptero, agravada pela postura dos mesmos, normalmente, verifica-se o surgimento desta dor após 300 horas de voo, podendo ser ainda mais precoce se os tripulantes apresentarem alguma deformidade na coluna. Os sintomas aparecem quando o voo é prolongado ou com grande carga de trabalho, ou seja, está associado à intensidade do voo (mais de cinco horas por dia e 50 horas por mês) (DAMY, 2006).

O exposto acima é mais agravado quando há aumento no nível vibratório do helicóptero durante a sua operação normal. É notório o grande número de reportes, seja por mecânicos ou pilotos, sobre o estado vibratório das aeronaves que necessitam de um estudo mais detalhado. Entretanto, apesar da necessidade, a área de vibração é justamente a que os encarregados de manutenção de helicópteros mais carecem de conhecimento (DAMY, 2006).

2.6 SEGURANÇA DE VOO

De acordo com Koch (201-?), uma parte integrante de uma operação aérea eficiente é a segurança de voo. Para que ela tenha resultado positivo, deve-se começar com o projeto, amadurecendo com o plano e resultando num cumprimento bem sucedido de suas recomendações. Quando se fala de segurança de voo, não se fala de um modo restrito. Ela caminha junto com a missão e os demais procedimentos, não sendo aplicada somente quando surge a necessidade.

Conforme Lira (2015), todos que trabalham diretamente ou indiretamente com a atividade aérea devem ter um pensamento unânime e constante da corporação do

trabalho com a filosofia de segurança de voo. Esta filosofia leva ao conhecimento de seus colaboradores quanto à prevenção de acidentes e incidentes aeronáuticos. Todo profissional que incorpora na área de aviação deve frequentar cursos, palestras, reuniões e seminários que envolvam a segurança de voo, tornando-se ciente dos fatores materiais, humanos e operacionais que afetam a atividade aérea.

Prevenir acidentes é fundamental em qualquer organização. Na esfera comercial, onde o lucro é o fator relevante para o sucesso, a evasão de capital para a recuperação de aeronaves acidentadas e o pagamento de indenizações pode causar a inviabilidade econômica da empresa. Logo a segurança de voo é um elemento essencial para que bons resultados na operação sejam alcançados. Independente da sua motivação seja humanitária ou financeira, os custos usados com a segurança de voo são muito mais suportáveis que o preço pago sem ela. Matematicamente falando, o dinheiro usado para substituir um helicóptero depois de um acidente, suportaria os custos da prevenção de acidentes em qualquer empresa (KOCH, 201-?).

Contudo, os acidentes não ocorrem por acaso, na verdade, são os resultados da ausência de avaliação e controle dos riscos envolvidos na operação. Quando se acontece um acidente aeronáutico, principalmente aquele que envolve perdas de vidas, todo sacrifício e esforço utilizados na obtenção do material e na instrução e treinamento do pessoal para manter, apoiar e operar, são parcialmente perdidos sem volta. Isto tudo sem considerar o fator humano, até mesmo porque o valor de uma vida humana não tem preço (KOCH, 201-?).

Logo, a segurança de voo tem o objetivo de contribuir para resguardar o potencial operacional de uma empresa através da execução de medidas preventivas ou corretivas adequadas para que os recursos humanos, materiais e financeiros existentes possam ser conservados (KOCH, 201-?).

De Koch (201-?), para se alcançar o objetivo, procura-se identificar as razões porque os acidentes acontecem, estudando os processos para que as causas dos acidentes sejam eliminadas, adaptando as medidas destinadas a criar condições que permitam operar sempre com eficiência, mesmo perante as condições mais adversas. A segurança de voo deve estar presente em todas as atividades de uma empresa, com o intuito de limitar os custos dos danos, materiais e financeiros,

mantendo-se a mais elevada capacidade operacional compatível com os recursos disponíveis.

Segundo Koch (201-?), para se prevenir os acidentes, algumas premissas são fundamentais:

- a) Acidentes podem e devem ser evitados;
- b) A prevenção de acidentes deve ter elevada prioridade em toda operação;
- c) A chave para uma operação bem planejada, embasada, executada e segura é a utilização eficiente do pessoal, material e informação;
- d) O único índice de acidentes aceitáveis é zero;
- e) As ações devem ser aplicadas visando as causas dos acidentes e não os seus efeitos.

3 METODOLOGIA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE PESQUISA

De acordo com Creswell (1994), a composição de um trabalho científico inicia-se pela seleção do foco da pesquisa, que é a definição primordial a ser investigada, constituída por meio de um amplo trabalho de revisão da bibliografia, recomendação de amigos, pesquisadores, ou desenvolvido a partir do conhecimento, que sustenta a definição da metodologia.

3.1.1 De acordo com a abordagem

Ao se definir o foco, o passo seguinte é a escolha do modelo de pesquisa que orientará as próximas ações. Pela perspectiva da maneira da abordagem do problema, esse modelo de pesquisa pode ser qualitativo ou quantitativo (PEREIRA, 2007; DA SILVA, 2005).

Conforme Da Silva (2005), a pesquisa quantitativa julga todas as coisas que podem ser quantificáveis, significando a tradução em números para a classificação e análise de opiniões e informações, sendo necessária para isto a utilização de recursos e técnicas estatísticas. Por sua vez, a pesquisa qualitativa julga a existência de uma inter-relação entre o mundo real e o indivíduo, ou seja, um elo intrínseco entre o mundo objetivo e a intangibilidade do indivíduo, não requerendo a tradução dos números nem necessitando de recursos e técnicas estatísticas.

Para Bryman (1989), as análises quantitativas são clássicas, com preceitos e metodologias claras, fixas e de baixo risco, da mesma forma como os instrumentos e, com menor tempo gasto, o que não se apresenta, nas análises qualitativas, pois estas não possuem preceitos e metodologias claras e fixas, tendo a necessidade de acolher os riscos pertencentes aos procedimentos que admitem dúvidas.

3.1.2 De acordo com o objetivo

Tendo-se em foco os objetivos, as pesquisas podem ser classificadas em Pesquisa Exploratória, Pesquisa Descritiva e Pesquisa Explicativa (GIL, 1991).

A Pesquisa Exploratória proporciona maior intimidade com o problema a fim de torná-lo compreensível e propiciar um sólido conceito para a elaboração das hipóteses, envolvendo investigação bibliográfica, entrevistas com indivíduos que presenciaram experiências práticas com o problema de pesquisa e a interpretação de modelos que possam estimular o entendimento, sendo evidenciadas normalmente pelas pesquisas bibliográficas e estudos de caso (GIL, 1991; MALHOTRA, 2004).

A Pesquisa Descritiva descreve os atributos de uma determinada população ou episódios ou a definição dos vínculos entre variáveis, com a utilização de práticas normalizadas de coleta de dados, como questionários e análises sistemáticas, sendo assumidas geralmente na forma de levantamento (GIL, 1991).

A Pesquisa Explicativa identifica os princípios que estabelecem ou colaboram na ocorrência dos fenômenos, explicando a razão das coisas devido ao aprofundamento cognitivo. Em ciências naturais há a necessidade da utilização do método experimental, e nas ciências sociais, da utilização do método observacional, assumindo, geralmente, a forma de Pesquisa Experimental e Pesquisa Expo-facto (GIL, 1991).

3.1.3 De acordo com os procedimentos técnicos

De acordo com os procedimentos técnicos, as pesquisas, segundo Gil (1991), são classificadas em: pesquisa Bibliográfica, quando desenvolvida por referências teóricas já publicadas, composta essencialmente de livros, artigos de periódicos e nos dias atuais por teorias publicadas na Internet; pesquisa Documental, elaborada a partir de materiais sem procedimento de análise crítica; pesquisa Experimental, por meio da determinação de um elemento de estudo, distinguindo-se os fatores que são qualificados para sua influência, conceituam-se os modelos de controle e de observação das influências dos fatores sobre o objeto; Levantamento, por meio da

interrogação direta dos indivíduos cujas atitudes se pretendem conhecer; estudo de caso, quando se aprofunda laboriosamente no estudo de um único ou alguns elementos, permitindo uma abrangência significativa e detalhada no conhecimento destes elementos; pesquisa *expost-facto*, tendo a execução dos experimentos após os fatos; pesquisa ação, quando desenvolvida e executada em estreita combinação com uma ação ou com a solução de uma dificuldade global, e possui o envolvimento cooperativo ou participativo dos pesquisadores e integrantes representativos da circunstância ou do problema e a pesquisa participante, desenvolvida a partir da influência recíproca entre pesquisadores e elementos integrantes das ocorrências investigadas.

4 MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E MÉTODO

Abordando a vibração do helicóptero e seus efeitos no ser humano, uma pesquisa quantitativa foi realizada, traduzindo-se os números que correspondem às vibrações para a classificação e análise de informações, utilizando-se recursos e técnicas estatísticas.

Com o objetivo de despertar todos que trabalham com helicópteros para o monitoramento das vibrações, tendo em vista a segurança de voo, uma pesquisa descritiva utilizando-se práticas normalizadas de coleta de dados foi realizada.

Como foi necessário a consulta de livros, artigos, internet, e outros documentos relacionados à vibração no helicóptero e que elas podem causar no homem, a pesquisa bibliográfica teve sua grande participação neste trabalho.

Para se controlar a vibração num helicóptero é preciso seguir um processo de medição encontrado no Manual de Manutenção da Aeronave. O helicóptero utilizado para a medição do nível de vibração desse trabalho é um AIRBUS AS 550 A2, Figura 4, da Aviação do Exército, uma aeronave leve e polivalente.

Figura 4 - AIRBUS AS 550 A2 no pátio da Aviação do Exército em Taubaté-SP



Fonte: Próprio autor

A análise de vibração foi feita no pátio da Aviação do Exército situado na cidade de Taubaté-SP, o equipamento utilizado foi o Aces Model 2020 Probalancer Analyser com seus acessórios e acelerômetros da Aces Systems model 991D-1, como pode ser observado na Figura 5.

A partir dos resultados obtidos, foi utilizado um método geométrico, por meio de vetores, para o balanceamento do rotor de cauda, eixo curto e rotor principal, cuja finalidade é manter a aeronave dentro do nível de vibração especificado pelo fabricante.

4.1 MEDIÇÃO DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO

Primeiramente a aeronave deve ser preparada para a medição do nível de vibração no rotor de cauda, eixo curto, e rotor principal. Tais procedimentos são encontrados no MET, nos cartões de trabalho 64.10.00.604 (AIRBUS, 2015), 65.10.00.603 (AIRBUS, 2013) e 62.10.00.603 (AIRBUS, 2017) respectivamente.

4.2 MEDIÇÃO DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO NO ROTOR DE CAUDA (RC)

Eliminar o desbalanceamento excessivo devido à dispersão de peso de um elemento rotativo do conjunto do rotor traseiro é o objetivo dessa medição (AIRBUS, 2015).

Como instrui o AIRBUS (2015), posicionou-se o helicóptero aproado ao vento (sem rajadas) e não superior a 15 kt (7,7 m/s) em superfície plana e horizontal. Logo se efetuou a medição durante um giro no solo com regime intermediário - rotor principal a 270 rotações por minuto (rpm) e velocidade de rotação do rotor traseiro de aproximadamente 1432 rpm - e regime nominal (velocidade de rotação do rotor traseiro de aproximadamente 2040 rpm no solo), obtendo-se os valores relacionados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores da medição do 1º giro no solo para o RC.

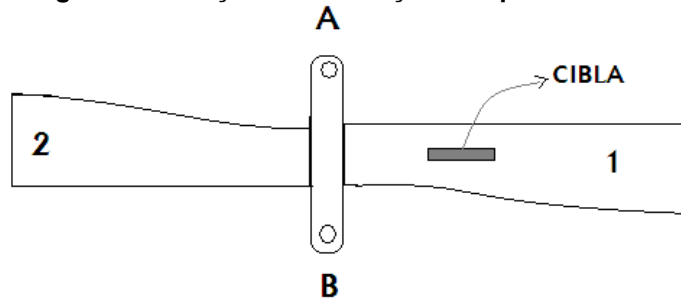
	270 rpm	NOMINAL
AMPLITUDE (IPS)	0,24	0,62
FASE HORÁRIA (h)	3,02	12,02
CORREÇÃO	-	10 g em B

Fonte: Elaborado pelo autor

Tendo em vista as tolerâncias descritas no MET, o balanceamento é considerado satisfatório para um nível de vibração igual ou inferior a 0,35 IPS (polegadas por segundo) no regime intermediário e no regime nominal no solo.

Para correção usam-se pesos na envergadura (1 ou 2 da Figura 7) de no mínimo 0,35 g e no máximo 5,35 g e na corda (A ou B da Figura 7) de no máximo 30 g, utilizando uma balança com precisão de 1/100 para se obter esses pesos (AIRBUS, 2015).

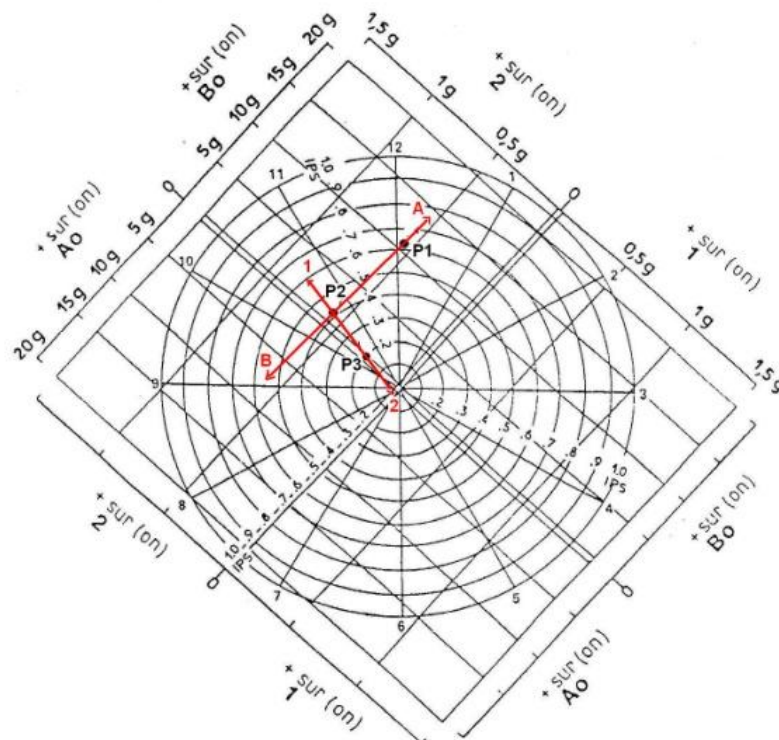
Figura 7 - Posição da colocação dos pesos no RC



Fonte: AIRBUS (2015) - adaptado pelo autor

Observa-se, pela Tabela 2, que para o regime nominal o nível vibratório não está satisfatório, requerendo uma correção, esta realizada utilizando o seguinte gráfico da Figura 8.

Figura 8 - Gráfico de correção no regime nominal do Rotor de Cauda



Fonte: AIRBUS (2015) – adaptado pelo autor

No gráfico acima, o ponto P1 mostra a posição da vibração medida no regime nominal. Observa-se então que, a princípio, é preciso colocar aproximadamente 0,5 g em 2 e 10 g em B.

Deve-se realizar uma correção por vez, primeiramente no sentido da corda, para se descobrir a tendência do vetor.

Nesse caso foi colocado 10 g em B e feita uma nova medição encontrando os resultados descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores da medição do 2º giro no solo para o RC

	270 rpm	NOMINAL
AMPLITUDE (IPS)	0,10	0,43
FASE HORÁRIA (h)	10:30	10:34
CORREÇÃO	-	0,6 g em 2

Fonte: Elaborado pelo autor

Observando os valores e analisando o gráfico da Figura 8, tendo o ponto P2 locado no gráfico, pode-se observar o sentido do vetor da corda e conclui-se que é preciso fazer uma correção na envergadura 2 colocando 0,6 g. Após a correção uma nova medição foi realizada obtendo os valores vistos na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores da medição do 3º giro no solo para o RC

	270 rpm	NOMINAL
AMPLITUDE (IPS)	0,17	0,20
FASE HORÁRIA (h)	8:00	10:30
CORREÇÃO	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Posicionando o ponto P3 no gráfico da Figura 8, nota-se o sentido do vetor da envergadura.

Com este nível de vibração enquadrado na tolerância pelo fabricante, conclui-se que o balanceamento é satisfatório, finalizando a manutenção de vibração no RC.

4.3 MEDIÇÃO DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO NO EIXO CURTO (EC)

Esta medição tem o objetivo de eliminar o desbalanceamento excessivo causado pela diferença de peso de um elemento rotativo da transmissão traseira. (AIRBUS, 2013)

De acordo com AIRBUS (2013), com o helicóptero face ao vento (sem rajadas) e inferior a 15 kt (7,7 m/s) em superfície plana e horizontal, fez-se uma medição do nível de vibração no EC durante o funcionamento da aeronave com o rotor principal no regime nominal - regime da transmissão traseira de aproximadamente 6110 rpm e NR (rotações do rotor principal) aproximadamente 382 rpm no solo - obtendo-se os valores encontrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores das medições dos giros no solo para o EC

GIROS	1º	2º	3º
AMPLITUDE (IPS)	0,92	0,7	0,4
FASE HORÁRIA (h)	8:19	10:14	9:00
CORREÇÃO	5 g em C	2 g em B	-

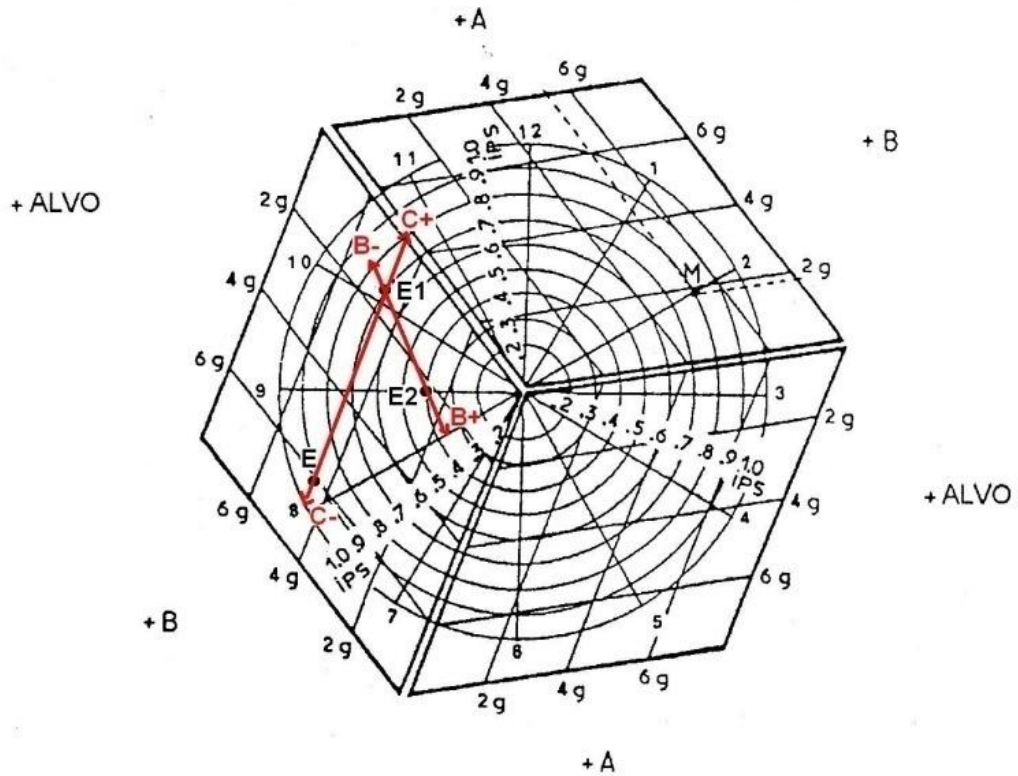
Fonte: Elaborado pelo autor

Observando as tolerâncias no MET o balanceamento é obtido quando o nível de vibração é inferior ou igual a 0,8 IPS.

Para a correção usam-se pesos, obtidos por uma balança com precisão de 1/100, de no máximo 5,6 g (arruela com 26 mm de diâmetro) em um parafuso de fixação do flector (AIRBUS, 2013).

Observando a Tabela 5, concluí-se que o nível de vibração, no primeiro giro, está fora da tolerância.

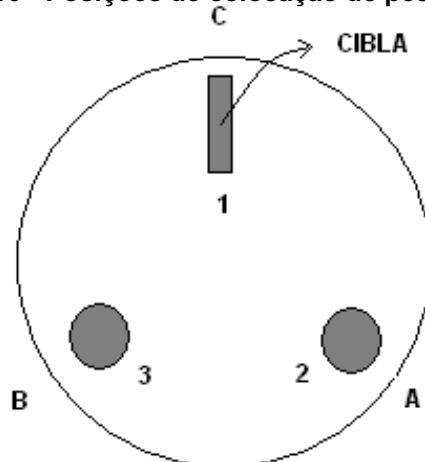
Figura 9 - Gráfico de correção do Eixo Curto



Fonte: AIRBUS (2013) – adaptado pelo autor

Locando o ponto E no gráfico da Figura 9, observa-se que é preciso, inicialmente, adicionar aproximadamente 6 g em C (Alvo) e 4,5 g em B, locais estes mostrados na Figura 10, tendo em vista o peso máximo aceitável de 5,6 g, aplicar 6 g em C é inviável, utilizando-se do bom senso foi colocado 5 g em C, local este que é posicionado a cibra refletora.

Figura 10 - Posições de colocação de pesos no EC



Fonte: AIRBUS (2013) – adaptado pelo autor

Após realizada a correção, foi feita uma segunda medição como se observa na Tabela 5.

Observando a Figura 9, locando o ponto E1, segunda medida, conclui-se que seria preciso por 4,5 g em B. Mais uma vez usando o bom senso, foi colocado 2 g em B e feita uma terceira medição encontrando os resultados na Tabela 5.

Tendo o novo valor E2 em foco, conclui-se que não é mais preciso fazer correções pelo fato do nível de medição para o eixo curto estar dentro da tolerância especificada pelo fabricante.

4.4 MEDIÇÃO DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO NO ROTOR PRINCIPAL (RP)

O objetivo dessa medição é eliminar o desbalanceamento excessivo devido à dispersão de massa de um elemento rotativo do rotor principal e ao desajuste de tracking (AIRBUS, 2017).

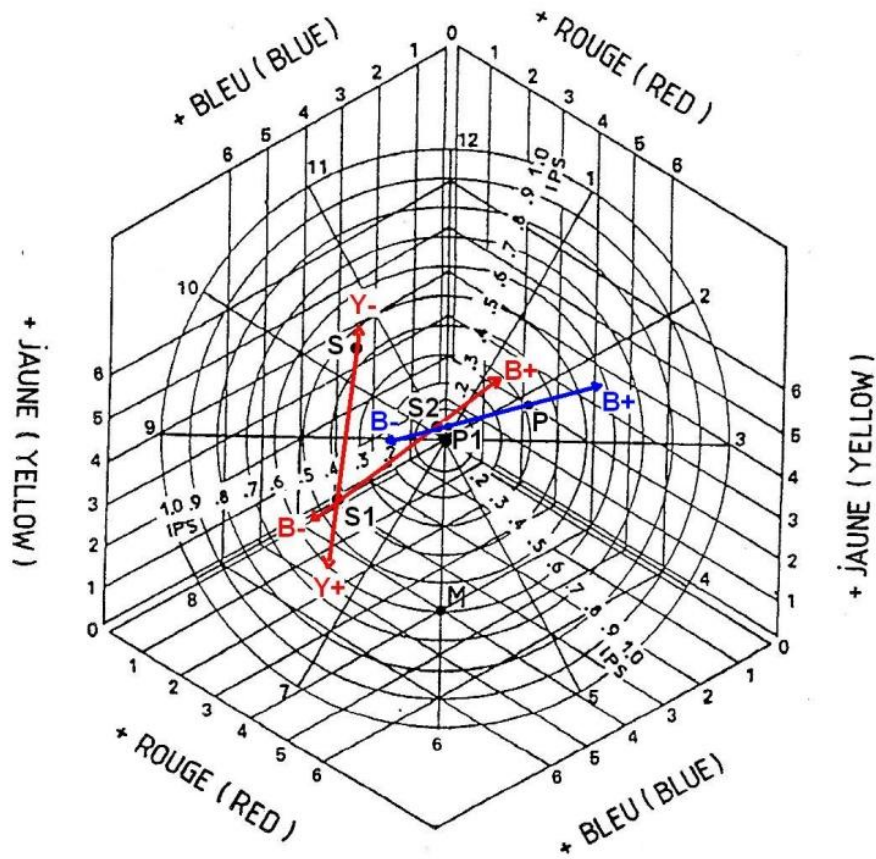
4.4.1 Rotor principal no solo, pairado e voo

Para as medições no solo posicionou-se o helicóptero aproado ao vento (sem rajadas), menor que 15 kt (7,7 m/s), em uma superfície plana e horizontal (AIRBUS, 2017).

Durante um giro no solo com regime regulado foi visualizado o tracking da extremidade da pá e feita as medições das vibrações no sentido vertical e lateral registrados no Anexo A.

Com o resultado da 1ª medição no solo e à luz do gráfico de correção do rotor principal, Figura 11, e locando o ponto S, de acordo com a medição de vibração lateral, observa-se que seria preciso 2,5 plaquetas no punho da pá azul (BLUE) e 3,5 plaquetas no punho da pá amarela (YELLOW). Como o objetivo é descobrir a direção dos vetores das pás, foi feita uma só correção, colocando 4 plaquetas no punho da pá amarela. A Figura 12 trás o local de colocação das plaquetas.

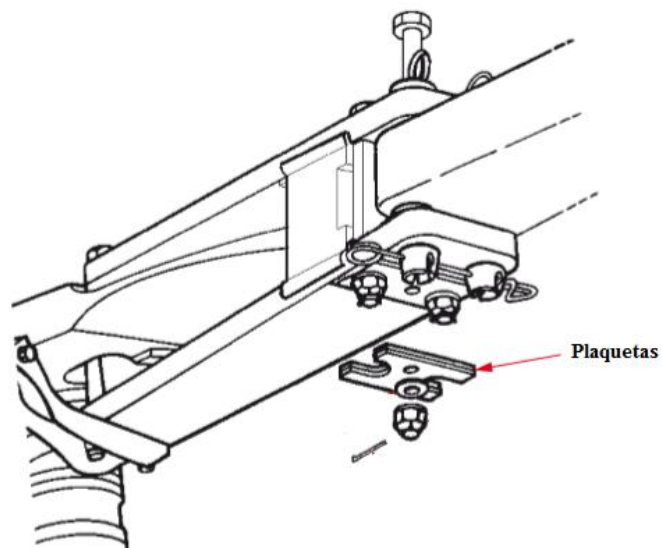
Figura 11 - Gráfico de correção do RP no solo e no pairado



Fonte: AIRBUS (2017) – adaptado pelo autor

Feita a primeira correção, foi-se para a segunda medição, com o resultado da 2ª medição, ponto S1, observa-se a direção do vetor da pá amarela.

Figura 12 - Adição de plaquetas de balanceamento no RP.



Fonte: AIRBUS (2017) – adaptado pelo autor

Ao analisar o ponto S1, verifica-se que é preciso colocar 3 plaquetas no punho da pá azul. Sabendo-se que a configuração inicial de plaquetas nos punhos de acordo com AIRBUS (2017) é: 4 plaquetas no punho vermelho, 6 plaquetas no punho amarelo e nenhuma plaqueta no punho azul, e tendo em vista as tolerâncias sobre o número de plaquetas a serem colocadas nos punhos descritas no AIRBUS (2017) são: 12 plaquetas no punho vermelho, 12 plaquetas no punho amarelo e 5 plaquetas no punho azul, e que ao final do balanceamento, um dos punhos não deve ter plaquetas de balanceamento, colocar 3 plaquetas no punho da pá azul não estaria correto, logo se faz o seguinte raciocínio de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Raciocínio para colocação das plaquetas

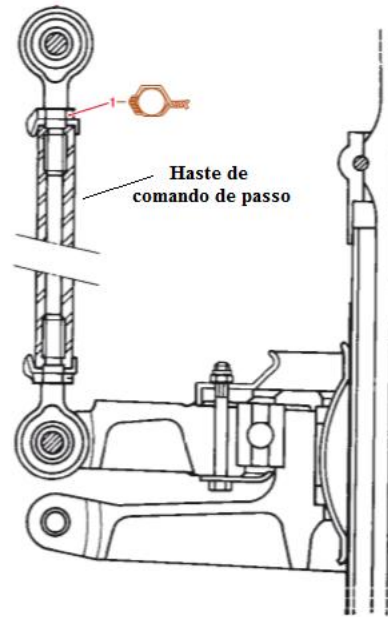
Configuração inicial das plaquetas (Plq) de balanceamento no punho	R (Pá vermelha): 4 Plq Y (Pá amarela): 6 Plq B (Pá azul): 0 Plq
Correção realizada na 1ª operação	R: 4 Plq Y: 10 Plq B: 0 Plq
Correção calculada na 2ª operação usando o gráfico (Figura 11)	R: 0 Plq Y: 0 Plq B: +3 Plq
Número total teórico	R: 4 Plq Y: 10 Plq B: 3 Plq
Configuração atual das plaquetas de balanceamento no punho	R: 1 Plq Y: 7 Plq B: 0 Plq

Fonte: Elaborado pelo autor

Feito o raciocínio, concluiu-se que foi preciso retirar 3 plaquetas dos punhos amarelo e vermelho. Feita a correção, fez-se uma nova medição no solo, e como a nova medição estava de acordo com a especificação do fabricante se efetuou um pairado obtendo um nível de vibração desfavorável.

Desta vez uma intervenção na haste de comando de passo foi realizada. Locando o ponto P no gráfico da Figura 11, observa-se que seria preciso colocar 2 plaquetas no punho vermelho e 2 no punho amarelo, ou seja, abaixar essas pás, ou subir a pá azul interferindo no seu ângulo de passo pela haste. Então se efetuou uma correção de 2 “flats” para cima, ou seja, 2 sextavados da haste de comando de passo, Figura 13, da pá azul para cima.

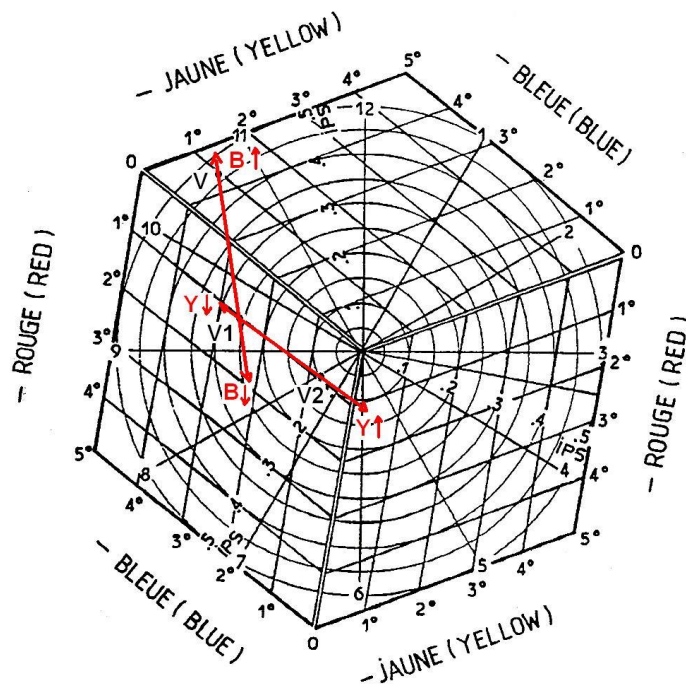
Figura 13 - Haste de comando de passo do RP



Fonte: AIRBUS (2017) – adaptado pelo autor

Com a referida correção uma nova medição foi feita no solo e pairado, e tendo os níveis de vibração satisfatórios, realizou-se um voo em potência máxima contínua (PMC). Com o nível de vibração vertical fora da tolerância, foi analisada a possível correção de acordo com o gráfico da Figura 14 no ponto V.

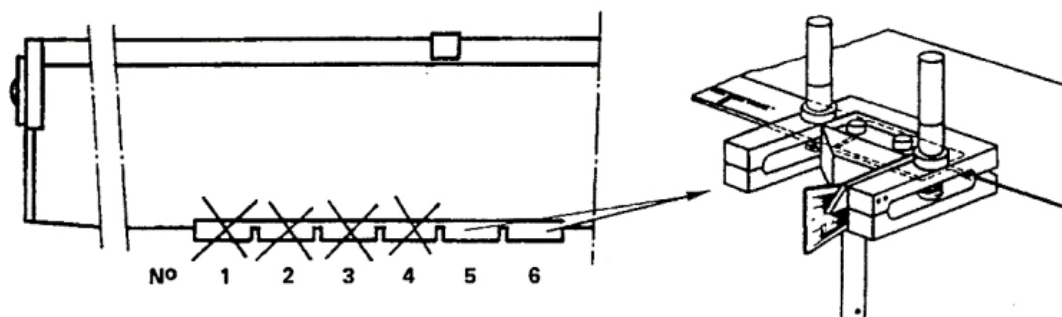
Figura 14 - Gráfico de correção do RP no voo



Fonte: AIRBUS (2017) – adaptado pelo autor

Concluindo, então, que seria preciso $4,5^\circ$ na pá azul (BLUE), e 1° na pá amarela (YELLOW). No caso dos graus eles são aplicados nos 5º e 6º tabs de acordo com a Figura 15.

Figura 15 - Ajuste dos tabs



Fonte: AIRBUS (2017)

Tendo em vista que o objetivo inicial é descobrir a direção dos vetores das pás, foi ajustado o tab da pá azul com 4° , de forma que 2° foi colocado no quinto tab e 2° no sexto tab, ambos para baixo.

Com outro acionamento dos motores, outra medição foi realizada, no solo e no pairado, como as vibrações estavam dentro dos conformes, foi realizado o segundo voo. Observada a vibração e locada no gráfico da Figura 14 com o ponto V1.

Descobrimos a direção do vetor da pá azul e observando que seria preciso uma nova correção de 1° no tab da pá vermelha (RED) e $2,5^\circ$ no tab da pá azul. Concluiu-se que, deveria abaixar as pás vermelha e azul, logo, subir a amarela, usando-se do bom senso foi realizada uma correção de 4° na pá amarela, de forma que 2° no quinto tab e 2° no sexto tab, ambos para cima.

Com a próxima medição, felizmente, no solo, pairado e voo em PMC os níveis de vibração estavam de acordo com as especificações do fabricante, logo foi realizada uma curva de 45° para verificar se estava dentro da tolerância. E com a 6ª e última operação se concluiu a manutenção do balanceamento com êxito.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao terminar a manutenção de balanceamento, foram analisados os resultados da medição (RM) que é expresso pela equação abaixo segundo Albertazzi e Souza (2008).

$$RM = (RB \pm IM) \text{ unidade} \quad (2)$$

Onde RB é o resultado base e IM é a incerteza de medição.

A IM é obtida de acordo com a equação seguinte:

$$IM = k \cdot \mu_C \quad (3)$$

Sendo k o fator de abrangência e μ_C a incerteza combinada, esta é obtida pela equação:

$$\mu_C = \sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2} \quad (4)$$

Onde μ_A é a incerteza tipo A e μ_B é a incerteza do tipo B.

Nesse trabalho não foi utilizada a incerteza do tipo A. A incerteza do tipo B analisada foi a da resolução do aparelho de medição que é de $\pm 5\%$.

Utilizando a incerteza padrão pela distribuição retangular temos:

$$\mu_B = \frac{\frac{\text{Resolução}}{2}}{\sqrt{3}} = \mu_R \quad (5)$$

Onde μ_R é a incerteza da resolução.

Tendo em vista a última operação realizada, os resultados base para o solo, pairado, voo em PMC, curva de 45° , rotor de cauda (regime intermediário), rotor de cauda (regime nominal) e eixo curto são respectivamente: 0,08; 0,12; 0,1; 0,12; 0,17; 0,2 e 0,4 IPS. Para o solo e pairado se observa somente a vibração lateral, para o voo em PMC e a curva de 45° somente a vibração vertical.

Com a resolução de 0,05 e aplicando em (5) encontramos $\mu_B = 0,01$, aplicando em (4) temos $\mu_C = 0,01$.

Como já se conhece a incerteza combinada, basta descobrir o fator de abrangência k , que nesse caso adotou-se $k = 2$ para um grau de confiança de 95,45%.

Aplicando k em (3) temos $IM = 0,02$.

Então os resultados finais para a manutenção de balanceamento são:

- Rotor de Cauda: $RM = (0,17 \pm 0,02)$ IPS para o regime intermediário e $RM = (0,20 \pm 0,02)$ IPS para o regime nominal.
- Eixo Curto: $RM = (0,40 \pm 0,02)$ IPS
- Rotor Principal: $RM = (0,08 \pm 0,02)$ IPS no solo; $RM = (0,12 \pm 0,02)$ IPS no pairado; $RM = (0,10 \pm 0,02)$ IPS no voo em PMC; e $RM = (0,12 \pm 0,02)$ IPS na curva de 45° .

Tendo por fim todos os resultados dentro da tolerância especificada pelo fabricante, finaliza-se a manutenção de medição e correção da vibração com êxito.

Para concluir essa manutenção de controle de vibração foi preciso 12 operações de giro e/ou voo decorridos em 4 dias de trabalho. Trabalho esse cansativo, porém de grande valia tendo em vista a segurança de voo no que diz respeito à prevenção de acidentes. Uma conscientização por parte dos gerentes, pilotos e mecânicos sobre a vibração deve ser realizada. Experiências vividas por tripulações mostram que a vibração causa problemas no ser humano, e com certeza à máquina. Para se prevenir de males que podem acontecer no futuro deve existir um monitoramento desse fenômeno físico que é a vibração. Outros tipos de análise e monitoramento da vibração podem ser feita, por exemplo, por espectro de frequência. Não importa o método de análise, o interessante é manter a rotina de monitoramento como uma boa ferramenta para a prevenção de acidentes e incidentes com helicópteros. Esse assunto tão importante, porém pouco observado, deve ser difundido para todos que diretamente ou indiretamente se relacionam com as vibrações.

6 CONCLUSÃO

A vibração está sempre presente, como outrora falado por Soeiro (2008), nada está parado na natureza. A maioria das atividades humanas envolve alguma forma de vibração. Tendo em vista a importância da vibração, todos devem ter conhecimento da mesma.

No campo da engenharia mecânica, a manutenção de máquinas e equipamentos é uma das principais aplicações das vibrações. A manutenção preditiva tem como um dos seus pilares a análise qualitativa e quantitativa das vibrações (SOEIRO, 2008). Basicamente este estudo das vibrações teve três passos: a medição da vibração; a análise do sinal medido; e o controle da vibração. Tudo em prol da segurança de voo.

As vibrações são perigosas e desconfortáveis, perigosas pois: (1) os elementos do rotor trabalham em condições de grandes esforços (risco de deterioração por fadiga); e (2) o controle do helicóptero se torna difícil (HELIBRAS, 1992).

Conclui-se, então, que o controle da vibração nos helicópteros traz benefícios para a manutenção – evitando problemas e acidentes que podem acontecer, e para o ser humano – evitando problemas de saúde, contudo uma ferramenta poderosa para a segurança de voo.

Para se evitar problemas irreparáveis tanto na máquina como no homem é necessário que engenheiros e mecânicos entendam mais sobre esse fenômeno intrigante que é a vibração.

Quando o foco é o helicóptero, um conhecimento mais profundo sobre o mesmo é requisito fundamental para o entendimento dos acontecimentos.

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

- Um estudo sobre a dinâmica do helicóptero tratando de toda uma teoria relacionada ao rotor do helicóptero;
- Manutenções de análise de vibrações, como feito nesse trabalho, em outros tipos de helicópteros;
- Modelagem da dinâmica e análise de vibrações em helicópteros;

REFERÊNCIAS

AIRBUS HELICOPTERS. **Maintenance Manual AS550**, 62-10-00-603 – Main rotor blades – Inspection / Check, Verification and correction of horizontal (y) and vertical (z) vibrations due to imbalance and tracking misadjustment, 2017.

AIRBUS HELICOPTERS, **Maintenance Manual AS550**, 64-10-00-604 – Tail rotor blade – Inspection / Check, Balancing the tail rotor on long shaft TGB aircraft, 2015.

AIRBUS HELICOPTERS, **Maintenance Manual AS550**, 65-10-00-603 – Tail rotor drive shafts – Inspection / Check, Balancing the tail rotor drive shaft, 2013.

ALBERTAZZI, Armando, SOUZA, André R. de. **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**. São Paulo: Manole, 2008. Disponível em: www.labmetro.ufsc.br/livroFMCI/slides_powerpoint.html. Acesso em 14/09/2017.

ANICÉZIO, Marcela de Melo. **Atenuação de Vibrações em Pás de Helicópteros utilizando Circuito Piezelétrico Semi-Passivo**. São Carlos-SP, 2015. Disponível em: www.teses.usp.br/teses/marcelaanicezio. Acesso em 08/09/2017.

AQUINO, Alberdan Santiago de. **Controle de Vibração de Um Sistema sob Desbalanceamento Rotativo Utilizando Atuador de Liga com Memória de Forma**. Universidade Federal da Paraíba, Tese de Doutorado. João Pessoa, 2011.

BONJORNO, Regina Azanha, BONJORNO, José Roberto, BONJORNO, Valter, RAMOS, Clinton Marcico. **Física fundamental - Novo**: volume único, 2º Grau, São Paulo: FTD, 1999.

BRYMAN, A. **Research Method and Organization Studies**. London, New Fetter Lane, 1989.

CHAFFIN, D. B., ANDERSON, G. B.J., MARTIN, B.J. **Occupational biomechanics**. USA: Wiley-Interscience, 1999 *apud* BALBINOT, A. **Caracterização dos Níveis de Vibração em Motoristas de Ônibus**: Um Enfoque no conforto e na Saúde. 2001. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CPSOL, SOLUÇÕES EM PREVENÇÃO. **Noções sobre vibrações**. [201-?]. Disponível em: livrozilla.com/doc/1408697/noções-sobre-vibrações---cp-soluções-em-prevenção. Acesso em 06/09/2017.

CRESWELL, J. W. **Research Design: qualitative & quantitative approaches**. Resumofeitopor Elisabeth Adriana Dudziack. London: Sage, 1994.

DAMY, Luiz Fabiano. **Análise do Espectro de Frequência de Vibração da Aeronave Esquilo AS-355 F2**. 2006. 66f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

- DA SILVA, E. L. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 138 p. 4 ed. rev. Atual – Florianópolis: UFSC, 2005.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 1991.
- GRIFFIN, M. J. **Handbook of Human Vibration**. London: Academic Press, 1996. *apud* PEREIRA, Cristiano Cária Guimarães. **Curvas de percepção e conforto humano para vibrações verticais**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto-Escola de Minas. Ouro Preto-MG, 2005.
- HELIBRAS, Helicópteros do Brasil S.A., **Manual de Instrução para Mecânicos – THM Esquilo**, 1992.
- HIBELLER, R.C., **Dinâmica: mecânica para engenharia**, São Paulo-SP. 10ª ed, Pearson - Prentice Hall, 2005.
- INMETRO. **Sistema Internacional de Unidades**. 8ª Edição (Revisada). Rio de Janeiro, 2007.
- ISO 2631-1, INTERNATIONAL STANDARD. **Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements**, 1997.
- KOCH, Sergio, ASAS DO CONHECIMENTO. **Filosofia da Segurança de Voo**. [201-?]. Disponível em: <https://sites.google.com/site/invacivil/seguranca-de-voos-1/seguranca-de-voos>. Acesso em 12/09/2017.
- LIRA, Wescley José. **Segurança de Voo**. Aero TD Escola de Aviação Civil, 2015. Disponível em: <http://www.aerotd.com.br/decoleseufuturo/wp-content/uploads/2015/05/SEGURAN%C3%87A-DE-VOO-.pdf>. Acesso em: 12/09/2017.
- MACHADO, Alessandro José; REISDORFER, Marcio Leandro. **Conhecimento geral dos helicópteros**: livro didático, Palhoça: UnisulVirtual, 2011.
- MALHOTRA, N. K. **Pesquisa de Marketing: Uma Orientação Aplicada**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- PEREIRA, Cristiano Cária Guimarães. **Curvas de percepção e conforto humano para vibrações verticais**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto-Escola de Minas. Ouro Preto, 2005.
- PEREIRA, V. R. **Necessidades do cliente do setor automobilístico: um estudo das percepções de agentes dos elos da cadeia automotiva**. – 112p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
- PET Engenharia Civil. **A ação do Vento em edificações – Parte 2**. 2010. Disponível em: <https://blogpetcivil.com/rio-niteroi>. Acesso em 04/09/2017.
- RAO, Singiresu S. **Mechanical vibrations**. 5th ed. Pearson – Prentice Hall, 2011.

ROSEN, A., BEN-ARI, R., **Mathematical Modelling of Helicopter Rotor Track and Balance: Theory**. Journal of Sound and Vibration, 1997, 200, pp. 589 – 603.

SANTOS, Zelãene dos. **Segurança no trabalho e meio ambiente**. NR-9 – Riscos ambientais (Atual: Programa de Controle Médico de Saúde Ambientais – PPRA). [201-?]. Disponível em: http://www.if.ufrgs.br/~mittmann/NR-9_BLOG.pdf. Acesso em 09/09/2017.

SAMPAIO, Chedas. **Conceitos básicos vibrações**. Escola Náutica I.D. Henrique, 2004. Disponível em :<https://www.scribd.com/document/87490092/VIBRACAO>. Acesso em 10/09/2017.

SÉRVULO, Paulo; SABA, Nicolau. **Apostila de helicóptero: Conhecimentos técnicos**. São Paulo, 2009.

SIMÕES, Sara Cristina Domingos. **Ruídos e Vibrações no Corpo Humano**. Avaliação de Ruídos e Vibrações – LAUAK PORTUGUESA – Indústria Aeronáutica, LTDA. Projeto Individual. Mestrado em Segurança e Higiene no Trabalho- 1º ano (7ª Edição. Instituto Politécnico de Setúbal, 2014.

SOEIRO, Newton Sure. **Curso de fundamentos de vibrações e balanceamento de rotores**. Apostila de curso oferecido a Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A, Belém-PA, 2008.

ANEXO A

MEDIÇÕES DE VIBRAÇÕES NO ROTOR PRINCIPAL

OPERAÇÕES	1ª		2ª		3ª		4ª		5ª		6ª		
	L	V	L	V	L	V	L	V	L	V	L	V	
SOLO	0,44	0,46	0,4	0,20	0,02	0,1	0,09	0,08	0,05	0,09	0,08	0,1	IPS
	10:34	10:40	08:00	08:30	11:00	10:30	08:27	10:30	08:30	10:32	11:00	11:30	FH
													TRACKING
	+4 Plq em Y		- 3 Plq em Y - p Plq em R		---		---		---		---		CORREÇÃO
PAIRADO	---	---	---	---	0,32	0,12	0,1	0,1	0,12	0,11	0,12	0,14	IPS
	---	---	---	---	2,07	12,01	12:00	10:52	12:30	11:00	13:00	11:10	FH
													TRACKING
	---	---	---	---	2 Flt	B	---		---		---		CORREÇÃO
VOO PMC	---	---	---	---	---	---	0,1	0,47	0,02	0,26	0,07	0,1	IPS
	---	---	---	---	---	---	05:15	10:39	04:15	09:30	03:30	08:00	FH
													TRACKING
	---	---	---	---	---	---	4°	B	4°	Y	---		CORREÇÃO
CURVA 45°	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0,1	0,12	IPS
	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	03:55	08:12	FH

Legenda:	
L: Vibração Lateral	: Tracking das pás
V: Vibração Vertical	R Y B
Plq: Plaquetas de balanceamento	Flt: 1 Face da haste de comando de passo
R: Pá Vermelha	FH: Fase Horária
Y: Pá Amarela	: Pá para baixo
B: Pá Azul	: Pá para cima