

MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES: UMA FERRAMENTA EFICIENTE NA PREVENÇÃO DE ACIDENTES COM HELICÓPTEROS

Helio de Assis Pegado - D.Sc. ¹

Artigo submetido em 07/10/2009.

Aceito para publicação em 22/06/2010.

RESUMO: O propósito desse trabalho é mostrar, através de experiências de operadores de aeronaves, como programas eficientes de acompanhamento de parâmetros da aeronave podem evitar acidentes e incidentes, e melhorar os programas recomendados de manutenção. Nesta pesquisa são estudadas as influências dos parâmetros que monitoram a intensidade da vibração no espectro de frequências quando da ocorrência de panes em componentes de helicópteros.

PALAVRAS CHAVES: Vibrações. Monitoramento de Vibrações. Manutenção Preditiva.

1 INTRODUÇÃO

As vibrações são inerentes ao voo do helicóptero, a cada rotação do rotor as forças aerodinâmicas variam de acordo com sua posição azimutal gerando vibrações que são passadas pelo disco do rotor. Eliminar ou reduzir a vibração é importante para fornecer conforto à tripulação e aos passageiros, para minimizar a fadiga do rotor e da fuselagem, e para a proteção dos equipamentos eletrônicos da aeronave.

Toda máquina rotativa gera vibrações de grande amplitude quando é excitada na frequência natural de seus componentes. Um sinal periódico pode ser decomposto em harmônicos que são associados aos diferentes componentes da máquina.

Prouty (1985; 1993), Bramwell (1976) e Saunders (1985) apresentam o fundamento teórico para ocorrência de vibrações, explicam a natureza periódica das

¹ Coronel do Exército Brasileiro. Doutor pelo ITA em 2003, Mestre pelo ITA em 1998, Engenheiro Aeronáutico em 1993. Atualmente dirige o Arsenal de Guerra do Rio. helio.pegado@yahoo.com.br

vibrações em helicópteros e os modos clássicos de absorver as vibrações.

Arato Junior (2004) apresenta os conceitos de manutenção preditiva e as diversas técnicas empregadas para o monitoramento da condição de funcionamento de equipamentos rotativos. Estuda-se a técnica da manutenção preditiva pelo nível global de vibrações, as técnicas de monitoramento e diagnóstico de defeitos com base na análise do espectro de vibrações e as técnicas com base na média temporal síncrona, diagrama de órbita e demodulação.

Giurgiutiu et al (2000) e Grabil et al (2001) apresentam o sistema de monitoramento de vibrações conhecido como VMEP. É um sistema desenvolvido pelo Exército Americano e pela Guarda Nacional da Carolina do Sul para diagnosticar panes em rotores de helicópteros, motores e transmissão. O sistema foi desenvolvido para os helicópteros *Blackhawk*, *Apache* e *Kiowa Warrior* e foi implementado com sucesso. Essa pesquisa também mostra que o VMEP é complementar ao sistema conhecido como HUMS (*Health & Usage Monitoring Systems*).

Esse trabalho aborda o monitoramento de vibrações em helicópteros entendidos como convencionais. Esta aeronave é definida como aquela com rotor principal sobre a cabine, recebendo torque do motor através da transmissão principal, e com rotor traseiro fixado na cauda recebendo potência do motor para gerar forças antitorque.

Esse trabalho se enquadra no campo da manutenção preditiva objetivando prevenir acidentes que podem ocorrer durante a operação da aeronave. Através do monitoramento das vibrações podemos acompanhar o desgaste que está ocorrendo em peças e componentes da aeronave e atuar antes de atingir o momento da pane. Inicialmente são estudados alguns dos sistemas de monitoramento já existentes, são apresentadas as frequências geradas pela aeronave, são apresentados procedimentos para execução desse monitoramento e são apresentadas conclusões a respeito da importância do método.

2 SISTEMAS DE MONITORAMENTO EXISTENTES

No início dos anos noventa, o sistema de acompanhamento de vibrações (*Vibration Health Monitoring - VHM*) foi introduzido em quase todos os grandes helicópteros que voam no Mar do Norte no apoio a indústria de petróleo (operação “offshore”). Os operadores de aeronaves na Grã-Bretanha e Noruega UK tomaram esta decisão voluntariamente. Em junho de 1999, a autoridade aeronáutica civil britânica reconheceu seu potencial para a segurança e emitiu a diretriz adicional de aeronavegabilidade (*Additional Airworthiness Directive - AAD*) número 001-05-99 recomendando seu uso.

Em 2000, a Guarda Nacional da Carolina do Sul (SCARNG), a unidade de manutenção da Aviação do Exército (AASF) e a Universidade da Carolina do sul (USC) desenvolveram um programa de gerenciamento de vibrações –“Vibration Management Enhancement Program” (VMEP). O propósito do programa era minimizar o custo de operação, reduzir os voos de manutenção, aumentar a disponibilidade de aeronaves e aumentar a segurança de voo. O programa foi elaborado com o objetivo de atender aos helicópteros *Apache* (AH-64), *Blackhawk* (UH-60) e *Kiowa Warrior* (OH-58D).

Atualmente, algumas aeronaves possuem sensores espalhados pela aeronave que geram diversos parâmetros e fornece-os para o *Health & Usage Monitoring Systems* (HUMS), possibilitando acompanhar a situação de diferentes componentes do helicóptero. Por comparação com os parâmetros de componentes em perfeito estado de funcionamento, descobrem-se diferentes panes. Esses dados também podem ser fornecidos para a vulgarmente conhecida Caixa Preta (CVR/FDR) onde são gravados os parâmetros da aeronave e do motor para serem usados em caso de investigação de acidentes e incidentes.

Esse trabalho se direciona para o campo do monitoramento de vibrações, não é aprofundado o estudo a respeito do monitoramento via HUMS. Entretanto, na elaboração de um programa de manutenção preditiva, o ideal e mais eficaz é

conjugar os dados dos sensores do HUMS aos dados de um programa de vibrações.

3 FREQUÊNCIAS GERADAS PELA AERONAVE

O rotor de um helicóptero é uma fonte de vibrações para o aparelho como um todo. As razões para esta excitação dinâmica podem ser provocadas, em voo estacionário, por um desajuste do equilíbrio estático e dinâmico do rotor, como, por exemplo, um problema de regulagem dos compensadores das pás. Em voo de translação, outro fator intervém, a dissimetria de sustentação, ou seja, as forças aerodinâmicas são diferentes de acordo com a posição no disco do rotor.

As forças verticais são compostas por diversos componentes distintos. No voo em regime permanente, as forças dinâmicas e aerodinâmicas de cada pá em rotação são as mesmas da volta anterior. Assim, as partes oscilantes devem ter frequência igual a rotacional do rotor ou algum múltiplo dela. A frequência consiste de 1 por volta chamada de 1Ω , 2 por volta - 2Ω e assim por diante.

As únicas harmônicas que permanecem na direção vertical são as múltiplas do número de pás. Como se observa na tabela abaixo, em um rotor de 3 pás passam da cabeça para a fuselagem somente as harmônicas de frequência 3Ω , 6Ω , 9Ω ... Se as pás não estiverem com seus compensadores ("tabs") corretamente ajustados, ou o rotor não estiver balanceado outras frequências poderão aparecer.

Tabela 1: Resposta da Fuselagem a forças verticais (Prouty, 1993).

Harmônicas verticais que excitam a cabeça do rotor principal	Número de pás						
	2	3	4	5	6	7	8
1Ω	-	-	-	-	-	-	-
2Ω	2Ω	-	-	-	-	-	-
3Ω	-	3Ω	-	-	-	-	-
4Ω	4Ω	-	4Ω	-	-	-	-
5Ω	-	-	-	5Ω	-	-	-
6Ω	-	6Ω	-	-	6Ω	-	-
7Ω	-	-	-	-	-	7Ω	-
8Ω	8Ω	-	8Ω	-	-	-	8Ω

Na direção horizontal e longitudinal atuam forças ou torques laterais e longitudinais conforme se observa na Tabela 2.

Tabela 2: Resposta da Fuselagem a forças verticais (Prouty, 1993).

Harmônicas horizontais e longitudinais que excitam a cabeça do rotor principal	Número de pás						
	2	3	4	5	6	7	8
1Ω	-	-	-	-	-	-	-
2Ω	-	3Ω	-	-	-	-	-
3Ω	2Ω e 4Ω	-	4Ω	-	-	-	-
4Ω	-	3Ω	-	5Ω	6Ω	-	-
5Ω	4Ω e 6Ω	6Ω	4Ω	-	-	-	-
6Ω	-	-	-	5Ω	-	7Ω	-
7Ω	6Ω e 8Ω	6Ω	8Ω	-	6Ω	-	8Ω
8Ω	-	9Ω	-	-	-	7Ω	-

Além das vibrações geradas no rotor existem outras fontes de vibração. Na tabela 3 apresentam-se as velocidades de rotação de diferentes componentes de uma aeronave.

Tabela 3: Velocidade de Rotação de componentes de um helicóptero genérico.

Frequência de rotação	Componente
393 rpm	Rotor
732 rpm	Engrenagem epicicloidial
1707 rpm	Árvore espirocônica
2088 rpm	Rotor Traseiro
5808 rpm	Árvore da bomba hidráulica
100 rpm	Árvore de entrada

4 MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES

Na década de 70, iniciou-se a medição de vibrações com o uso do equipamento conhecido como “Vibrex” da Chadwick-Helmuth. Essa medição era voltada para verificar se as pás estavam corretamente balanceadas, caso não estivessem, eram tomadas medidas para ajuste das pás. Por volta de 1980, com 54 helicópteros para manter, a Guarda Nacional da Carolina do Sul começou a usar o “Vibrex” para medir vibração dos componentes rotativos do Huey. As medidas economizaram muito tempo em diagnósticos e durante mais de 15 anos diversas falhas foram detectadas por intermédio da medição de vibrações. Visando sistematizar e automatizar um programa de controle de vibrações nasceu o VMEP.

Muitas empresas e as forças armadas empregam a medição das vibrações apenas para corrigir o balanceamento das pás quando se detecta um aumento do nível vibratório na aeronave. Hoje, a DMAvEx está pesquisando um programa de monitoramento de vibrações através do acompanhamento da amplitude de vibração que é observada pelos espectros de frequência.

Como já foi comentado, as cargas nas pás variam de acordo com a posição da pá e, em voo permanente, as cargas são periódicas. Forças e momentos no rotor provocam vibração que é transmitida à cabeça pelas articulações que as transmite para a fuselagem. Esses esforços originam-se da aerodinâmica do rotor principal e são geradas pelo movimento de batimento e arrasto. Além desses esforços no rotor principal, as forças do rotor de cauda também podem produzir considerável vibração.

A idéia básica adotada pelo programa de monitoramento de vibrações é que as estruturas das máquinas, excitadas pelos esforços dinâmicos decorrentes de seu funcionamento, respondem com sinais vibratórios cuja frequência é idêntica àquela dos esforços que a provocam. O sinal de vibração, medido em algum ponto do equipamento, será a soma das respostas vibratórias da estrutura às diferentes frequências dos esforços excitadores. Este sinal pode ser decomposto e apresentado num espectro de frequência, como na Figura 1. Em um helicóptero de configuração convencional, atuam numerosas forças cíclicas sobre a estrutura como consequência dos equipamentos rotativos. As cargas cíclicas de baixa frequência provêm do rotor principal (de 3 a 40 Hz) e do rotor de cauda (de 25 a 110 Hz), enquanto as frequências mais elevadas originam-se dos componentes da transmissão e do motor (de 500 a 1000 Hz).

Considerando que a deterioração do equipamento traduz-se por um aumento na amplitude de vibração, pode-se, a partir da medição do sinal em pontos determinados, acompanhar a evolução desses sinais e identificar o aparecimento dos esforços dinâmicos novos ou aumento da amplitude da resposta, que são indicadores do surgimento de defeitos ou degradação do funcionamento.

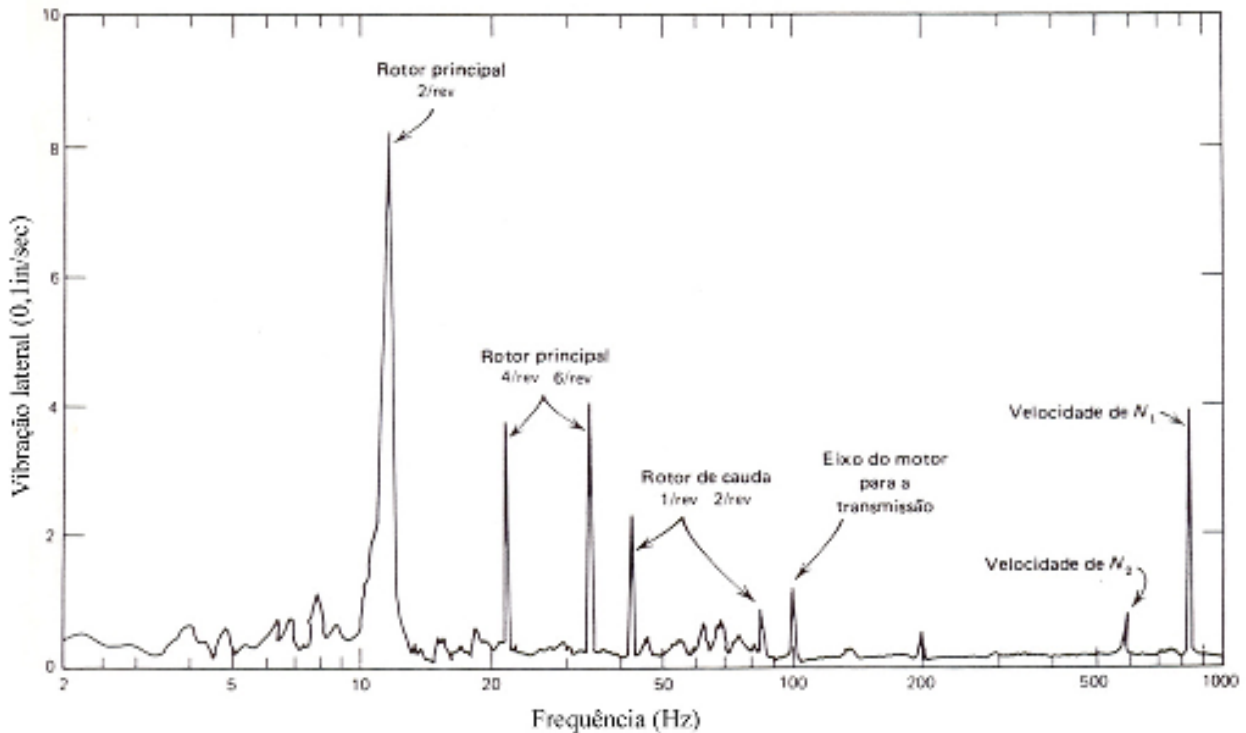


Figura 1: Espectro de frequências de um helicóptero genérico (Saunders,1985)

O procedimento se baseia em um princípio comparativo, ou seja, o que se analisa é a evolução histórica do equipamento a partir de um instante tomado como referência, ou, por comparação com dados estatísticos baseados em equipamentos semelhantes. O instante escolhido para referência seria após uma manutenção de grande porte, ou mesmo após o restabelecimento operacional decorrente de uma manutenção corretiva. E, posteriormente, a cada 100 horas de voo, os espectros de frequência seriam comparados com os obtidos após uma grande inspeção. Se fosse obtido um aumento de amplitude numa faixa de frequência, seriam identificadas as possíveis panes.

Qualquer aumento do nível de vibrações durante o funcionamento da aeronave é um indício forte do avanço do desgaste ou o crescimento de um defeito. Mesmo um leve desbalanceamento do rotor pode levar a grandes níveis de vibração na estrutura da aeronave e a falha prematura dos componentes.

A Figura 2 - a seguir - apresenta dois espectros de frequência do rotor de cauda medidos por acelerômetros na caixa de transmissão traseira de uma aeronave Pantera. A figura da direita apresenta um espectro de vibração da aeronave em plenas condições de operação. A da esquerda é a aeronave com uma pane no rotor de cauda. Observa-se um aumento da amplitude de 0,12 para 0,36 ips em 3600 rpm (velocidade do rotor de cauda é 3665 rpm) e também por volta de 7200 rpm.

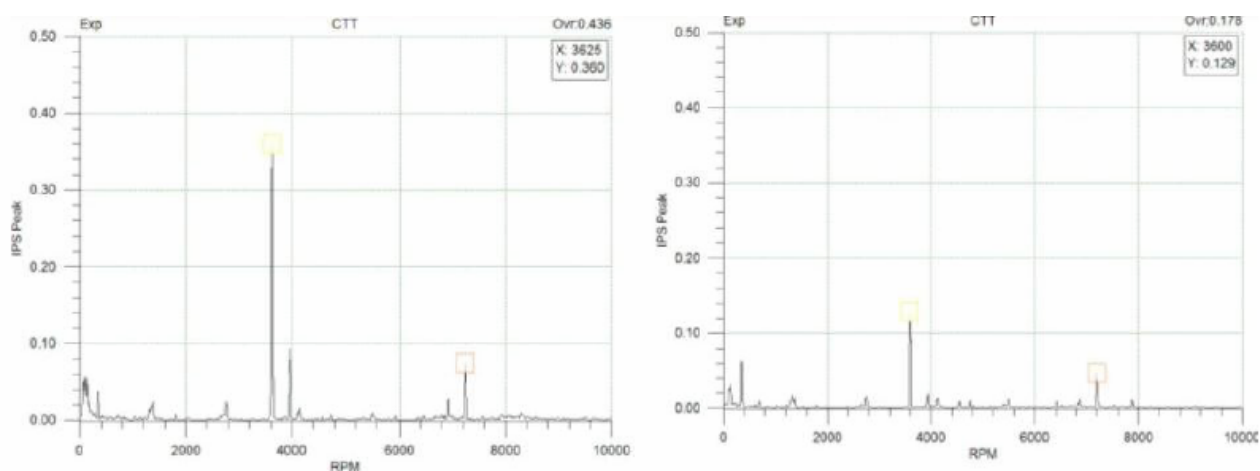


Figura 2: Espectro de vibração com uma pane no rotor de cauda e da mesma aeronave sem panes (Damy, 2008).

Caso, numa análise do espectro de frequências de uma aeronave, houvesse um aumento de amplitude, por exemplo, na frequência de 731rpm, poderia indicar um problema na engrenagem epicicloidial (Tabela 3). O procedimento padrão é medir a amplitude de vibração na frequência de cada componente com a aeronave em plenas condições (após grandes inspeções ou com a aeronave nova) e periodicamente medir a amplitude de sua vibração. O aumento de amplitude em alguma frequência é um indício de defeito do componente.

5 CONCLUSÃO

O eficiente controle do nível vibratório de aeronaves de asas rotativas traz benefícios para a manutenção evitando panes não programadas e acidentes que

podem acontecer, e conduzir a prejuízos humanos e materiais. Este acompanhamento pode ser feito juntamente com o monitoramento efetuado por sensores espalhados em diversos pontos na aeronave obtendo maior eficiência e eficácia na descoberta de panes.

REFERÊNCIAS

ARATO JUNIOR, A. **Manutenção Preditiva usando Análise de Vibrações**. Ed. Manole: Barueri, 2004.

BRAMWELL, A. R. S. **Helicopter Dynamics**. Ed. Edward Arnold: London, 1976.

GRÃ-BRETANHA. **Helicopter Vibration Health Monitoring (VHM)**. Civil Aviation Authority, jun 2006.

DAMY, L. F. **Relatório Técnico nº 001/2008**. Batalhão de Manutenção e Suprimento de Aviação do Exército, 2008.

GRABILL, P. et al. Automated Helicopter Vibration Diagnostics for the US Army and National Guard. In: FORUM ANUAL DA AMERICAN HELICOPTER SOCIETY, 57, 2001, Washington, DC. *Anais...* Washington, DC, 2001.

GIURGIUTIU, V. et al, D. Helicopter Health Monitoring and Failure Prevention Through Vibration Management Enhancement Program. In: MEETING OF THE SOCIETY FOR MACHINERY FAILURE PREVENTION TECHNOLOGY, 54, 2000, Virginia Beach, VA. *Anais...* Virginia Beach, VA, 2000.

PROUTY, R. W. **Helicopter Aerodynamics**. Ed. Phillips Publishing Inc: Potomac, 1985.

PROUTY, R. W. **Even More Helicopter Aerodynamics**. Ed. Phillips Business Information Inc: Potomac, 1993.

SAUNDERS, G. H. **A Dinâmica de Voo do Helicóptero**. Ed Livros Técnicos e Científicos: São Paulo, 1985.

VIBRATION MONITORING: AN EFFICIENT TOOL IN THE PREVENTION OF HELICOTPER ACCIDENTS

ABSTRACT: This research aims at showing, by means of successful experiences of helicopter operators, how an efficient helicopter parameter monitoring program is able to prevent accidents and incidents, and improve maintenance programs. It also studies the influence of the different parameters that monitor the intensity of vibration on the frequency spectrum when failures of the helicopter components occur.

KEYWORDS: Vibration. Vibration Monitoring. Predictive Maintenance.