
Os Riscos de *Mast Bumping* por Oscilação Induzida pelo Piloto em Helicóptero Bipá Monomotor a Pistão

Diego Antônio Ortega Cunha ¹

1 Pós-graduado em Segurança de Voo pela Universidade Anhembi Morumbi; Piloto comercial de helicóptero.

RESUMO: Os helicópteros bipás monomotores a pistão representam uma alternativa importante na formação do piloto e no uso profissional devido a sua menor complexidade e baixo custo quando comparado a aeronaves maiores. No entanto, devido a características inerentes à operação desse tipo de equipamento, o excesso de controle por parte do piloto ou a falta de aplicação de comandos no momento adequado podem gerar oscilações induzidas que entram em conflito com as frequências naturais do helicóptero, podendo causar acidentes. Eventos de oscilações induzidas pelo piloto têm sido reportados recentemente, e o governo da Nova Zelândia colocou a operação de helicópteros bipás de um fabricante em uma lista de alerta, devido a uma série de acidentes que envolveram, inclusive, a separação do rotor principal em voo. Acredita-se que um estudo mais aprofundado sobre o assunto não só seria pertinente como necessário. O objetivo deste estudo é avaliar os riscos de *mast bumping* causados por oscilações induzidas pelo piloto em helicópteros bipás monomotores a pistão, discutir as técnicas de pilotagem como aspectos contribuintes para os acidentes além de propor alternativas que possam mitigar os riscos na operação.

PALAVRAS CHAVE: Helicóptero. Oscilação. Risco.

Mast Bumping Risks Due to Pilot-Induced Oscillation'S in Two-Bladed Single - Engine Piston Helicopter

ABSTRACT: The piston single-engine two-bladed helicopters represent an important alternative in pilot training and professional use due to its lower complexity and low cost when compared to larger aircraft. However, due to inherent characteristics of the operation of this type of equipment, too much control by the pilot or the lack of application of commands at the appropriate time can generate induced oscillations that conflict with the natural frequencies of the helicopter and may cause accidents. Events of pilot-induced oscillations have been recently reported and the New Zealand government put the operation of a famous manufacturer's two-bladed helicopters on an alert list due to a series of accidents involving the separation of the main rotor in flight. We believe that further study on the subject would not only be relevant but necessary. The objective of this study is to evaluate the risks of mast bumping due to pilot-induced oscillations in single-engine piston two-bladed helicopters, discuss pilot techniques as contributing factors for accidents, and propose alternatives that may mitigate operational risks.

KEY WORDS: Helicopter. Oscillation. Risk.

Citação: Cunha, DAO. (2018) Os Riscos de *Mast Bumping* por Oscilação Induzida pelo Piloto em Helicóptero Bipá Monomotor a pistão. *Revista Conexão Sipaer*, Vol. 9, No. 1, pp. 26-39.

1 INTRODUÇÃO

No início da década de 60, o governo americano observou, durante o desenvolvimento de aviões e helicópteros militares, uma série de comportamentos inesperados envolvendo o controle das aeronaves. Inicialmente confundidos com dificuldades de manobras inerentes à construção de cada aeronave, aos poucos os fenômenos observados foram percebidos como um padrão específico.

Em oito de junho de 1959, o modelo X-15, criado pela North American, era um avião com motor de foguete construído para estudar os regimes de voo em condição hipersônica. Desenvolvido em parceria com a National Aeronautics and Space Administration – NASA, ele apresentou uma série de oscilações durante a aproximação e o pouso.

Em 26 de janeiro de 1960, um caça de treinamento fabricado pela Northrop denominado T-38 desenvolveu oscilações mais tarde relacionadas à alta velocidade *versus* distribuição de peso.

Em um período que vai de 1978 até 1985, três helicópteros trimotores à reação, do modelo CH-53-3, passaram por um fenômeno semelhante. Durante atividades de transporte de carga externa suspensas por cabo, entraram em oscilações de tal magnitude que a tripulação foi obrigada a alijar a carga para recuperar o controle da aeronave.

Nas três ocorrências descritas acima, as aeronaves foram envolvidas por um mesmo fenômeno envolvendo oscilações crescentes somadas à dificuldade de controle. Nascia então o estudo científico das oscilações induzidas pelo piloto ou em inglês, *Pilot Induced Oscillation* - PIO, que podem ser definidas como:

A oscilação induzida pelo piloto resulta da interação do piloto e da dinâmica do veículo que está sendo controlado. Ela pode ser causada ou afetada por inúmeros elementos do projeto da aeronave ou da tarefa de sua missão. A P.I.O. afeta a habilidade do piloto de cumprir uma determinada tarefa, de um espectro que parte de um movimento aleatório da aeronave impossibilitando o cumprimento da tarefa até, nos casos mais extremos, comprometendo a segurança da aeronave e da tripulação. Por ocorrer esporadicamente, as P.I.O. podem ser um dos mais insidiosos problemas referentes às qualidades de voo (KLYDE; MAYERS; MCRUER, 1995, p.3).

Desde então as oscilações induzidas têm sido pesquisadas por fabricantes de aeronaves e agências espaciais com o objetivo de entender o fenômeno e projetar veículos com uma menor predisposição às oscilações. Porém, a capacidade humana de adaptação e seu comportamento em voo tornam as oscilações difíceis de serem previstas.

Os três elementos responsáveis pelas oscilações induzidas são a aeronave, o piloto e o meio onde atuam, dividido este último em aspectos meteorológicos e operacionais. Fatores como o tipo de operação a ser realizada, além de variáveis envolvendo distrações; sobrecarga de trabalho; *stress*; e diferentes intensidades de vento, temperatura e turbulência; funcionam como um gatilho para o início das oscilações e devem ser levados em consideração.

Segundo a Federal Aviation Administration – FAA, em seu Helicopter Instructor’s Handbook de 2012, de uma maneira geral helicópteros são projetados e construídos para serem controláveis. Por sua vez, os aviões são projetados e construídos para serem estáveis. Os helicópteros possuem, por princípio, uma instabilidade dinâmica, e o seu pleno controle exige por parte do piloto dedicação, paciência e coordenação motora.

“As oscilações induzidas pelo piloto são com muita frequência de natureza repentina; a instabilidade das interações do sistema veicular do piloto de asas rotativas se desenvolve em poucos segundos até níveis incontroláveis para o piloto”. (PAVEL; YILMAZ; JUMP; LU, 2013, p.2). Diante dessa ameaça, faz-se necessária a ciência por parte de fabricantes, operadores e pilotos dos riscos envolvidos e uma pesquisa mais assertiva para um melhor entendimento do fenômeno e suas causas.

2 METODOLOGIA

Partindo da tríade do Centro de Investigação e Prevenção Aeronáutica - CENIPA, “A máquina, o homem, o meio”, o objetivo deste artigo científico é compreender as interações entre o helicóptero, o ser humano e o ambiente de atuação quando a sinergia entre esses elementos é conflitante, e as oscilações induzidas se desenvolvem, muitas vezes, de maneira catastrófica, como no caso de um *mast bumping* severo. Propor caminhos a partir das descobertas feitas para gerenciar o risco de oscilações induzidas pelo piloto nas operações envolvendo helicópteros bipás monomotores a pistão é o nosso objetivo.

2.1 A MÁQUINA, O HOMEM E O MEIO

Segundo o Helicopter Flying Handbook da Federal Aviation Administration - FAA, um helicóptero pode ser definido como uma aeronave cujas sustentação e propulsão se dão por meio de um ou mais rotores horizontais, possuindo cada rotor duas ou mais pás girando em volta de um mastro. Seu nome é uma adaptação da palavra hélicoptère, criada pelo francês Gustave de Ponton d’Amécourt em 1861, utilizando os termos gregos helikos (espiral) e pteron (asa).

Apesar do conceito antigo e de trabalhos extraordinários de pioneiros como Juan de La Cierva em 1922 e Herman Fokker em 1938, o helicóptero, tal qual conhecemos hoje, foi desenvolvido em 13 de fevereiro de 1942, por Igor Sikorski, com seu modelo R-4. Ele consistia em uma aeronave dotada de um rotor principal, um rotor de cauda e motorização a pistão. Esse tipo básico de helicóptero viria a ser um dos mais populares pela simplicidade de projeto e menor custo.

Para o estudo foi observado o modelo denominado Robinson 22 - R22, fabricado pela Robinson Helicopter Company desde 1979, em Torrance, Califórnia. Segundo o Pilot Operating Handbook - POH, em sua seção de número sete, o R22 é descrito como um helicóptero de dois lugares com rotor principal único, monomotor, construído principalmente em metal e equipado com trem de pouso tipo esqui. É uma máquina cuja hora de voo é relativamente barata e utilizada como porta de entrada para a formação de pilotos em geral.

O rotor principal de um R22 é classificado como semirrígido, constituído por um cubo e duas pás de metal com articulações que podem variar seu ângulo de passo.

A articulação de passo é considerada, por Cruz, a mais importante entre as demais. É por intermédio dessa articulação que o piloto atua na variação coletiva e cíclica do passo das pás. Variando o passo, as forças aerodinâmicas existentes no conjunto dos rotores principal e de cauda aumentam ou diminuem, produzindo os deslocamentos do helicóptero (LÍRIO *apud* CRUZ, 2012).

As pás também possuem uma articulação para modificar sua altura em relação ao eixo longitudinal do cubo do rotor, o que é conhecido por batimento. O rotor é conectado à caixa de transmissão principal por um longo mastro e essa, por sua vez, é

acoplada ao motor por meio de correias acionadas por embreagem. Da transmissão principal sai um eixo que movimentava a transmissão do rotor de cauda, constituído por duas pás de metal com uma revolução de cinco para um em relação ao rotor principal. O motor carburado, com quatro cilindros opostos, refrigerado a ar e com sistema de cárter úmido é responsável por fornecer a potência necessária à aeronave em todos os regimes de voo. Um ventilador acoplado diretamente ao eixo do motor é responsável pela refrigeração do grupo motopropulsor.



Figura 1 – Helicóptero modelo Robinson 22 (Fonte: HELICOPTER TOUR, 2016).

Uma das primeiras coisas que chama a atenção em relação a um helicóptero acionado é a quantidade de partes móveis, sua vibração e seu ruído. Rotor principal, rotor de cauda, motor e transmissão trabalham com velocidades diferentes gerando frequências distintas.

A respeito dos controles do helicóptero, inicialmente temos o cíclico, cuja função é modificar a direção da aeronave alterando o ângulo de passo das pás ciclicamente. A cada revolução das pás do rotor principal, o helicóptero pode ser conduzido para frente, para trás ou para os lados, sendo o cíclico um comando primário de velocidade e secundário de altura.

Um segundo comando chamado de coletivo é responsável pelo ganho ou perda de altura da aeronave ao alterar coletivamente o passo das duas pás do rotor principal. Essa alavanca, ao ser puxada para cima, aumenta a sustentação da aeronave e, ao ser empurrada para baixo, a diminui. O coletivo é um comando primário de altura e secundário das rotações por minuto desenvolvidas pelo motor.

Um manete de potência é acoplado à alavanca do comando coletivo e pode ser acionado pelo piloto para modificar o regime de rotações por minuto do motor, ou até mesmo reduzi-lo para a marcha lenta.

Por fim, os pedais alteram o ângulo de passo das pás do rotor de cauda e permitem o giro do aparelho para esquerda ou direita em relação ao seu eixo vertical. Outro aspecto importante é a interdependência dos comandos do helicóptero durante o voo. A aplicação de cada comando interfere nos demais e exige, por parte do piloto, uma coordenação harmônica entre eles, segundo o Helicopter Instructor's Handbook - FAA.

A título de exemplo, o rotor principal e a fuselagem possuem tempos distintos de atuação que devem ser respeitados. Ao se deslocar a aeronave para a frente, o rotor principal se inclina nessa direção ao mesmo tempo em que, por questões envolvendo a inércia, a fuselagem tende a manter a posição original. Algum tempo depois é que a fuselagem acompanha o movimento do rotor gerando um comportamento em voo mais conhecido como efeito pendular. Isso significa que um helicóptero possui um padrão de oscilação natural que tende a aumentar com o tempo e pode resultar na possibilidade da perda de controle do aparelho, devendo então ser corrigido e controlado pelos comandos do piloto.

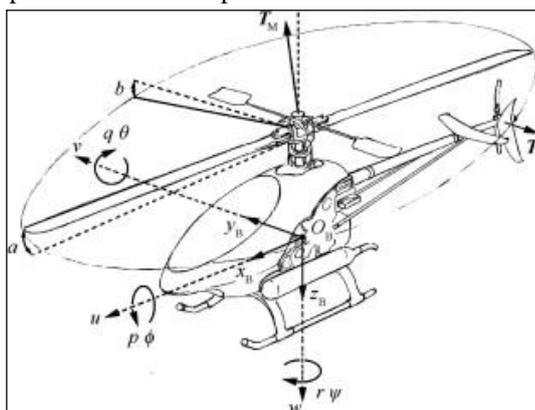


Figura 2 – Eixos de movimento de um helicóptero (Fonte: SCIENCE DIRECT, 2015)

Em se tratando de oscilação induzida pelo piloto pode-se dizer que os comandos aplicados podem entrar em conflito com a oscilação natural do aparelho, ampliando e agravando a sua atuação durante o voo. Segundo o Rotorcraft Flying Handbook produzido pela FAA em 2000:

Por conta da natureza do atraso da resposta da aeronave, é possível que as correções estejam fora de sincronia em relação aos movimentos da aeronave e agravem as indesejadas mudanças de atitude da mesma. O resultado é que o PIO, ou oscilações não intencionais podem crescer rapidamente. (FAA, 2000).

A consequência de tal atitude pode ser desde a dificuldade ou impossibilidade do piloto de realizar a tarefa a qual se propôs até a destruição da aeronave e morte de seus ocupantes.

Até agora foram descritas as características relativas à dinâmica do helicóptero, sua dificuldade natural de aprendizado e sua participação no fenômeno da oscilação induzida. A seguir será abordado o segundo componente necessário para essa condição: o elemento humano.

Segundo David Klyde em seu Unified Pilot Inducing Oscillation Theory: PIO Analysis with Linear and Nonlinear Effective Vehicle Characteristics, Including Rate Limiting de 1995, as capacidades humanas de adaptação e aprendizado permitem ao piloto modificar a dinâmica do voo em si e ao mesmo tempo se ajustar a cada nova modificação do sistema.

Referente ao fator humano, as respostas aos estímulos dentro da cabine de um helicóptero podem ser divididas em duas vertentes: biomecânicas e comportamentais.

Segundo o dicionário Houaiss de língua portuguesa a definição da palavra Biomecânica é: “Ramo da biologia que se ocupa da aplicação das leis da mecânica às estruturas orgânicas vivas, especialmente ao aparelho locomotor do ser humano”. Por sua vez, a capacidade de um organismo manter a saúde do corpo recebe o nome de Homeostase.

Homeostase foi o termo criado a partir dos radicais gregos homeo “igual” e stasis “ficar” pelo fisiologista americano Walter Cannon em 1929. “A homeostasia é a propriedade autoreguladora de um sistema, ou organismo, que permite manter o estado de equilíbrio de suas variáveis físico-químicas essenciais ou de seu meio ambiente”. (CANNON, 1929)

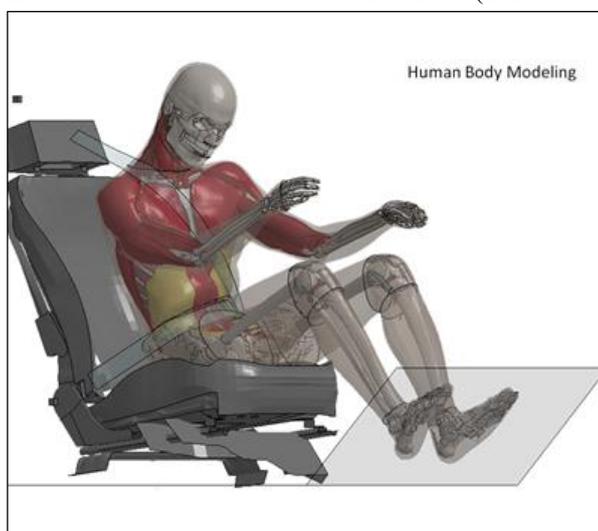


Figura 3 – Biomecânica do ser humano (Fonte: NBCI, 2007)

No volume I do Harrison’s Principles of Internal Medicine de 1998, a temperatura oral média global dos indivíduos sadios com idade de 18 a 40 anos é de $36,8 \pm 0,4^\circ\text{C}$. Temperaturas corporais abaixo de 35°C ou acima de 40°C já são classificadas como hipotermia e hipertermia. Umidades relativas do ar menores que 12% são consideradas perigosas para a saúde e pressões inferiores a 522.6 mmHg aumentam rapidamente a fadiga e prejudicam a capacidade de julgamento. Isso significa que, para manter seu equilíbrio, o corpo humano precisa trabalhar dentro de uma estreita faixa de temperatura, umidade e pressão.

A ergonomia possui também um papel importante na relação piloto-máquina uma vez que a postura dentro da cabine muitas vezes não é a mais adequada. A coluna vertebral normalmente está rotacionada, com o tronco desalinhado em relação aos braços e pernas estimulando a assimetria muscular que somada à proximidade das vibrações do mastro do rotor produz dores intermitentes ou crônicas.

Complementando os aspectos biomecânicos temos os comportamentais, que são divididos em três categorias: Compensatório, Perseguição e Pré-Cognitivo. O comportamento Compensatório “está presente caracteristicamente quando os comandos e perturbações apresentam aparência randômica e quando a única informação recebida pelo piloto consiste em erros sistemáticos ou resultados de ação da aeronave” (KYLE; MCRUER; MYERS, 1995, p.6).

Já o comportamento de Perseguição pode ser definido como uma antecipação de cenário por parte do piloto e consequentemente com comandos corretivos nas perturbações percebidas, geralmente no sentido oposto. Por exemplo, a

aeronave começa a subir, e o piloto aplica coletivo para baixo com a intenção de anular o movimento e retornar à condição de equilíbrio anterior (IDEM, 1995).

A última categoria é denominada Pré Cognitiva e representa, em termos de controle do equipamento, o ápice da integração homem-máquina. As perturbações não apenas são percebidas como antecipadas, e a aplicação dos comandos é proporcional às perturbações. O comportamento do helicóptero é perfeitamente controlado pelo piloto em todos os seus aspectos, e no jargão aeronáutico é dito que o piloto “vestiu” a máquina, tal como uma peça de roupa feita sob medida. Quando se atinge esse grau de excelência, o comportamento Pré-Cognitivo recebe o nome de Sincrônico (IBIDEM, 1995).

Os comportamentos citados anteriormente evoluem de seu grau mais básico, no caso o Compensatório, para o mais elevado, o Sincrônico, dependendo de inúmeros fatores como por exemplo a experiência do piloto, seu bem-estar e sua capacidade de concentração. No entanto, comportamentos anormais podem surgir e serem os precursores das oscilações induzidas; um “inapropriado comportamento organizacional, uma adaptação ruim ao equipamento, excesso de comando, uma transição entre as categorias de comportamento como de Perseguição para Compensatório, Pré-Cognitivo para Compensatório...” (IBIDEM, 1995, p.10).

As oscilações induzidas pelo piloto, para fins de pesquisa, também são divididas em três categorias, numeradas em algarismos romanos de I a III. Ainda que para o piloto saber se está sofrendo a categoria I, II ou III não faça diferença, para o cientista a análise dos dados obtidos ajudam no sentido de compreender as causas do problema e, assim, desenvolver projetos de aeronaves menos propensas às oscilações (IBIDEM, 1995).

A categoria I descrita por Klyde, McRuer e Myers (1995) engloba as oscilações chamadas de Lineares, as quais o comportamento do piloto pode ser Compensatório, Perseguição ou Pré-Cognitivo com o diferencial de que não existe uma transição de comportamentos durante a pilotagem, e tampouco existe uma frequência de variação irregular nas características dinâmicas da aeronave, ou seja:

“As oscilações piloto-aeronave nessa categoria podem ser casuais, facilmente repetidas, facilmente eliminadas por um controle mais brando e geralmente não constituem uma ameaça”. (IBIDEM, 1995, p.12)

Apenas com uma aplicação de comando mais brusca essa oscilação pode se tornar uma ameaça, e as características principais da categoria são intervalos de atraso na aplicação dos controles.

Segundo os mesmos autores, a categoria II ou Semilinear é bem mais severa, com oscilações que chegam até o limite dos controles e possuem um desenvolvimento mais errático, sendo portanto, mais difíceis de se prever e de se eliminar.

Já a categoria III é a mais rara e a mais perigosa de todas as três. Essencialmente não-linear, é difícil de ser prevista até mesmo por equações complexas e, normalmente, cresce rapidamente em amplitude até a destruição da aeronave em um intervalo de poucos segundos. Ela reúne características de instabilidade do projeto com alternâncias de comportamento do piloto (KLYDE, MCRUER, 1995).

Essas oscilações induzidas fundamentalmente dependem de transições não lineares tanto do efetivo controle dos elementos dinâmicos, ou do comportamento dinâmico do piloto. As mudanças dos elementos dinâmicos controlados podem estar associadas com a intensidade das respostas do piloto, ou podem ser devido a mudanças internas simultaneamente envolvendo o sistema de controle ou configurações de propulsão/aerodinâmicas, mudanças de comportamento, etc. (IBIDEM, 1995, p.12)

Durante a instrução de voo, a dificuldade de adaptação em uma aeronave, uma organização deficiente de cabine e os excessos de comando são situações comuns, e é possível que, por conta delas, surjam oscilações induzidas pelo piloto. Por sua vez, segundo McRuer (1995), a transição entre os comportamentos independe da experiência do piloto e, também, podem ser causados por fatores externos ou internos que serão apresentados a seguir.

Encerrando o fator humano, é preciso que se fale ainda de um comportamento denominado “Retenção de Pós Transição”. Esta ação pode ser definida como uma tendência conservativa de comportamento em relação a uma determinada condição de equilíbrio (IBIDEM, 1995).

Por exemplo, um piloto está aplicando os comandos de maneira adequada para uma determinada situação de voo e, subitamente, a aeronave sofre uma perturbação. Diante do novo cenário, existe uma tendência presente no piloto de manter por um pequeno intervalo de tempo a mesma aplicação dos controles da condição inicial. Durante essa mudança existe um intervalo de adaptação por parte do ser humano visando a uma aplicação diferente nos controles que satisfaça a nova condição e restaure um novo equilíbrio. O homem e a máquina, em sua busca pela correta integração, agora dependem também de um terceiro elemento: o meio.

O meio é o elemento responsável por iniciar o fenômeno da oscilação induzida atuando na máquina ou no ser humano ou ainda em ambos os elementos. Devido a essa característica, o meio pode ser chamado de evento desencadeador ou gatilho, e a quantidade de fatores contribuintes pertencentes ao meio são de tal maneira variadas que o entendimento mais completo do fenômeno torna-se bastante difícil.

Os eventos desencadeadores podem causar mudanças súbitas na dinâmica da aeronave e nas reações do piloto, as quais induzem a aplicações corretivas que iniciam os eventos de oscilação induzida. Os eventos externos principalmente, contém manobras evasivas, tesoura do vento, rajadas de vento, vórtices, formação de gelo e turbulência de ar claro. Eventos gatilho relacionados ao sistema da aeronave principalmente incluem mau funcionamento das superfícies de controle, oscilação nos sistemas de voo, modificações nas configurações e falha no sistema de controle da potência. (LIU, 2012, p.6)

A meteorologia tem um papel importante como evento gatilho. A atmosfera é um ambiente dinâmico com variações de temperatura, pressão, precipitações, direção e intensidade dos ventos. É nesse ambiente que o helicóptero opera, e é nele que as perturbações são sentidas com mudanças marcantes em questão de minutos. Um exemplo comum é uma corrente ascendente atingindo a aeronave que precisa se manter à determinada altitude em um corredor visual. O piloto precisa compensar o incremento de altura com uma aplicação efetiva de coletivo para baixo, afim de se manter dentro dos limites estipulados de altitude para o referido corredor visual.

O voo em uma terminal congestionada é outro fator que exige muita atenção. É necessário que as aeronaves mantenham comunicação constante para se assegurar das posições de cada uma delas dentro do espaço aéreo. Dessa forma é possível se mantenha uma separação segura entre as aeronaves. A proximidade excessiva pode levar a manobras evasivas que podem disparar as oscilações induzidas associadas a uma alta carga de trabalho por parte do piloto.

A instrução de voo e a adaptação a uma nova aeronave são outros fatores contribuintes para as oscilações. Os movimentos de um aluno iniciante em uma máquina que exige suavidade no manejo normalmente são amplos e, algumas vezes, até agressivos. A interdependência entre os comandos e o nervosismo por parte de quem está aprendendo colaboram para tirar o equipamento de seu equilíbrio em um padrão oscilatório crescente e exigindo uma atuação antecipada e efetiva por parte do instrutor. No caso da adaptação, os hábitos adquiridos na aeronave anterior podem se manifestar no modelo atual e interferir na pilotagem, independente da experiência de quem estiver nos comandos.

O risco de colisão com fauna ou balões são eventos que exigem uma atitude imediata por parte do piloto e podem ser desencadeadores de oscilações, além de distrair o piloto de suas tarefas. Em caso de impacto, as pás do rotor principal podem sofrer alterações e prejudicar o controle da aeronave, criando uma situação de emergência e uma sobrecarga de trabalho. Isso se deve ao fato de que a sustentação de um helicóptero e sua propulsão fazem parte de um mesmo conjunto e estão integradas em seu rotor principal (LÍRIO apud ANDRADE, 2012).

Em seu artigo Levels of Pilot Gain de 2011, Frank Lombardi descreve o termo “ganho” como a razão de resposta de um piloto a um erro, ou o nível de agressividade na aplicação dos comandos. Isso depende de características pessoais, stress, tipo de missão, características da aeronave e o treinamento que cada piloto recebeu. Para um melhor entendimento, ele cita o exemplo de alguém conduzindo uma bicicleta em uma rua larga e pouco movimentada, na qual a condução da bicicleta é feita de maneira suave e com correções mínimas ou de “baixo ganho”. Se a mesma pessoa decide pedalar em uma rua movimentada e sobre uma estreita faixa branca entre os carros, suas correções serão mais agressivas, e os controles da bicicleta serão pressionados com mais força, em uma atitude de “alto ganho”.

Transportando esse conceito para os helicópteros, uma apreensão mais rígida dos comandos ou de “alto ganho”, seja pela dificuldade da missão, fadiga ou stress, pode eliminar uma coordenação efetiva do controle do helicóptero e criar uma propensão maior às oscilações induzidas. O ambiente operacional é igualmente desafiador e representa outro gatilho para as perturbações na aeronave. Voos de instrução, de transporte de passageiros, de natureza agrícola, de transporte aeromédico, em plataformas marítimas ou de içamento de cargas, entre outros, possuem especificidades próprias e devido ao grau de dificuldade inerente de cada missão podem fazer o piloto ter uma resposta mais agressiva aos comandos, gerando oscilações não desejadas.



Figura 4 -R 22 sobrevoando um campo de neve (Fonte: WIDE LENS FILMS, 2017)

Características do projeto da aeronave são importantes para entender o propósito para o qual o helicóptero foi construído, quais são os valores determinantes em sua fabricação e como estes valores podem ter influenciado em uma maior ou menor propensão às oscilações induzidas pelo piloto. Quando Frank Robinson saiu da Hugues Helicopter Company e fundou a Robinson Helicopter Company, em junho de 1973, ele tinha em mente a construção de uma aeronave de asas rotativas de baixo custo, fácil manutenção e que pudesse ser mais acessível. O primeiro modelo da companhia, o R22, recebeu a certificação da FAA em 1979, após três anos e meio de testes e análises. Desde então a Robinson Helicopter Company tem tido muito sucesso nas vendas de seus modelos R22, R44 e R66, tendo atingido a marca de 11.900 aeronaves produzidas em 2016. No Brasil existem, segundo dados do Registro Aeronáutico Brasileiro, 183 aeronaves modelo R22 e 469 aeronaves modelo R44.

2.2 OS ACIDENTES ENVOLVENDO O *MAST BUMPING*

Em outubro de 2016, a Transport Accident Investigation Commission, - TAIC incluiu as aeronaves modelo R22 e R44 em sua lista de alerta devido ao alto número de acidentes ocorridos na Nova Zelândia nos últimos dez anos. O número de fatalidades envolvendo acidentes com os modelos de aeronaves fabricados pela Robinson Helicopter tem aumentado a uma taxa considerada alarmante pelas autoridades neozelandesas. Segundo o jornal New Zealand Herald, os R22 e R44 tem uma participação de mais de 35% na frota de helicópteros do país, mas respondem por 49% dos acidentes da última década. Em 100% dos casos fatais o motivo é relacionado com a ruptura e separação do rotor principal com a fuselagem num fenômeno conhecido por *mast bumping*.

O *mast bumping* pode ocorrer no sistema de rotor do tipo gangorra quando um excessivo batimento do rotor principal for o resultado de um baixo “G” (fator de carga abaixo de 1,0 gravidade) ou em um movimento abrupto de comando. Uma condição de voo de baixo “G” pode ser o resultado de um abrupto movimento para trás e para a frente do cíclico em voo reto e nivelado. Alta velocidade à frente, turbulência e glissada excessiva podem acentuar os efeitos adversos destes movimentos de comando. O batimento excessivo resulta em um choque dos componentes da cabeça do rotor com o mastro do rotor principal e uma subsequente separação entre o sistema do rotor principal e o resto do helicóptero. (Robinson POH, 2012)

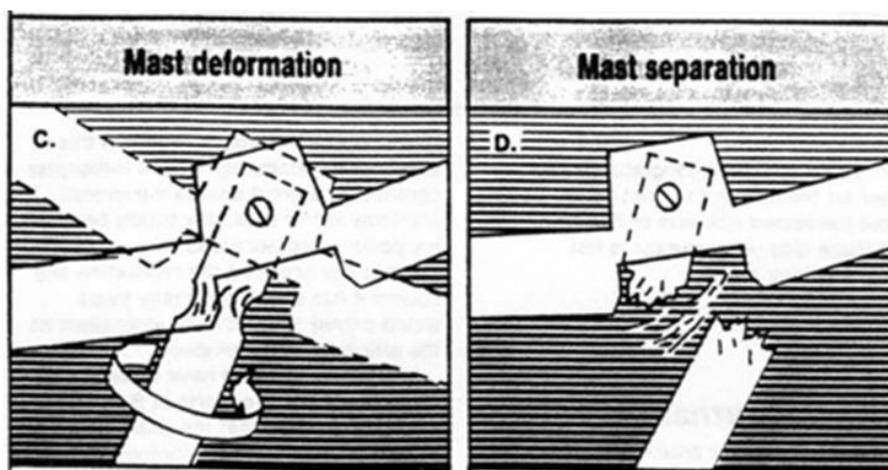


Figura 5 –Separação do rotor principal (Fonte: FORTWORTH- STAR TELEGRAM, 1984)

Para efeito de comparação, a Nova Zelândia possui atualmente 300 aeronaves modelos R22 e R44 e sua taxa de acidentes relacionados com *mast bumping* é nove vezes maior que a encontrada nos Estados Unidos, com uma frota de 2700 aeronaves, segundo dados de 2016 da Transport Accident Investigation Commission -TAIC. Esses acidentes envolvem muitas vezes pilotos experientes em um cenário de geografia montanhosa e tem sido objeto de comoção e debate entre fabricantes, pilotos, engenheiros e especialistas na tentativa de entender se esses índices são resultado de um problema de projeto, se são fruto de uma geografia desafiadora ou resultado de técnicas de pilotagem inadequadas.

O fenômeno do *mast bumping* no entanto, refere-se ao contato do cubo do rotor principal com o mastro ou das pás do helicóptero com a fuselagem ou o cone de cauda e nem sempre nessa situação existe a separação de seus componentes. O que existe são danos em maior ou menor grau nas partes atingidas e apenas em uma condição severa pode haver a separação dos componentes em pleno voo.

Outra coisa que se deve ressaltar é que o *mast bumping* e as oscilações induzidas pelo piloto compreendem fenômenos distintos, e que não dependem um do outro para ocorrerem em um helicóptero. Mas, uma vez associados, existe uma possibilidade de que as oscilações induzidas pelo piloto resultem em um *mast bumping* severo seguido de uma separação de componentes, como no acidente descrito a seguir.

No Brasil registrou-se a ocorrência de um acidente com *mast bumping* envolvendo uma aeronave modelo R66 no Rio de Janeiro em 20 de novembro de 2013. Apesar de ser um helicóptero com motor à reação ele possui duas pás e um cubo de rotor principal do mesmo tipo dos modelos a pistão fabricados pela Robinson Helicopter. Segundo o Relatório Final divulgado pelo Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos - CENIPA de número A-207/CENIPA/2013, a aeronave de matrícula PR-MXM decolou do aeródromo de Jacarepaguá (SBJR) para um heliponto em Mangaratiba, na parte da manhã, para um voo de traslado. Durante o procedimento de descida para o local de pouso e voando a 400 ft de altitude, a aeronave perdeu o controle e se rompeu em três partes em pleno ar, vindo a cair na água e matando seu único tripulante.

Dados da investigação indicam que a região por onde a aeronave passou possuía ventos de média e forte intensidade no sentido do continente para o mar e uma topografia elevada contribuindo para a formação de turbulências orográficas. Essa condição constitui cenário favorável à ocorrência do fenômeno *mast bumping* e, apesar de não ter sido possível determinar o quanto a pilotagem contribuiu para o acidente, o Relatório Final não descartou que uma aplicação inadequada dos comandos por parte do piloto possa ter agravado uma condição de baixo “G” e contribuído para um choque entre o rotor principal e o cone de cauda e, posteriormente, na separação deste rotor em voo. Existe a possibilidade de que as oscilações induzidas pelo piloto tenham contribuído para o acidente em questão.

Em 14 de julho de 2014 o CENIPA publicou uma Divulgação Operacional - DIVOP referente ao acidente do PR-MXM, recomendando a todos os pilotos que respeitassem a velocidade estipulada pelo fabricante para voo em ar turbulento, principalmente próximo de elevações. E o mais importante: ao perceber uma condição de baixo “G” e uma tendência de rolagem para a direita nunca comandar o cíclico à esquerda na tentativa de corrigir a aeronave e, sim, aplicar suavemente o cíclico para trás ou completar uma curva à direita para evitar a ocorrência de *mast bumping*.

2.3 A INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DE PROJETO

Tom McCready, engenheiro de helicópteros especialista em acidentes em sua entrevista para o jornal New Zealand Herald, na edição de 4 de abril de 2017, atribui o alto índice de acidentes encontrados nos modelos fabricados pela Robinson às características únicas do cubo do rotor principal, peça compartilhada pelos modelos R22, R44 e R66. Em um helicóptero bipá semirrígido, as pás irão se comportar como uma gangorra durante o voo, com uma pá subindo enquanto a outra desce pivotadas por um único pino durante a resposta do rotor às forças aerodinâmicas existentes. No caso dos modelos fabricados pela Robinson, o cubo do rotor utiliza três pinos com o objetivo de tornar a aeronave mais manobrável, mas, em contrapartida, segundo McCready, essa característica aumenta a probabilidade de ocorrência de *mast bumping* nos modelos. O fenômeno ocorreria tão rápido que um instrutor não poderia recobrar o comando da aeronave após uma aplicação indevida por parte do aluno, por exemplo. Para o engenheiro, que já esteve em investigações de 30 acidentes dos modelos citados e trabalha com este tipo de rotor de helicóptero desde 1978, apesar da propensão que todas as aeronaves bipás tem de desenvolver o *mast bumping*, os modelos fabricados pela Robinson possuem uma propensão maior comparada com os modelos de outros fabricantes. McCready acredita que, somente redesenhando o cubo do rotor o risco de *mast bumping* seria reduzido.



Figura 6 – Cubo do rotor de um R22 (Fonte: QORA, 2017)

Por outro lado Kurt Robinson, filho do fundador da Robinson Helicopter e presidente da companhia desde 2010, defende seus modelos afirmando que eles estão presentes em todo o mundo e em nenhum lugar, com exceção da Nova Zelândia, existe um índice tão alto de acidentes causados por *mast bumping*. Ele acredita que isso se deve ao modo como se pilota o helicóptero no país. A Federal Aviation Administration - FAA, em 1990, estudou o modelo de cubo de rotor fabricado pela *Robinson* e não detectou nenhuma diferença no modelo de três pinos que pudesse aumentar a propensão ao *mast bumping*.

Helicópteros como o R22 não possuem qualquer tipo de Flight Data Recorder - FDR que pudesse ser usado para obter os dados de voo e de seus acidentes no intuito de entender a causa raiz do problema. Utilizar pilotos em voos de teste para obter os dados é considerado muito arriscado, devido às características imprevisíveis ao se entrar em uma condição de gravidade negativa ou de baixo 'G' em uma aeronave bipá. Segundo a Transport Accident Investigation Commission -TAIC, o uso de modelos computacionais devido à alta tecnologia disponível atualmente poderia resolver a questão.

Em 1998, a escola tecnológica de engenharia aeroespacial da Geórgia conduziu testes em computadores para simular o efeito de mast bumping nos helicópteros bipás, mas, por falta de fundos, as pesquisas foram interrompidas. Além disso, a própria FAA concluiu, na época, que os testes teriam uma "aplicação limitada" e, subsequentemente, sua validação ainda incluiria testes de voo arriscados demais para serem autorizados.

3 AS TÉCNICAS DE PILOTAGEM COMO MITIGAÇÃO DAS OSCILAÇÕES

A sustentação e a tração de um helicóptero básico são conseguidas por meio de seu rotor principal. O cubo do rotor principal, onde as pás estão fixadas, sustenta o mastro, o grupo motopropulsor e a fuselagem do helicóptero durante o voo e é o responsável pela sustentação e deslocamento da aeronave. "Simplificadamente, pode-se dizer que o piloto de um avião pilota a fuselagem da aeronave, enquanto que o piloto de helicóptero pilota o rotor principal" (LÍRIO, 2012). Para que o rotor principal possa mudar a direção da aeronave e sua velocidade é preciso que haja uma gravidade positiva atuando sobre ele.

Quando durante uma manobra brusca, a título de exemplo, o helicóptero entre em uma condição de 'G' negativo, o rotor principal trabalha sem carga, mas o rotor de cauda continua atuando. Pelo fato de o rotor de cauda estar acima do centro de gravidade do helicóptero e produzir uma força defasada em 90° em relação ao rotor principal, acaba provocando um rápido movimento de rolagem. Com o rotor principal "descarregado" esse movimento não poderá ser contido pelo piloto mesmo que ele aplique todo o cíclico para o lado oposto. A aplicação excessiva de comando faz com que a cada ciclo o cubo do rotor vá desgastando o mastro. Esse contato do cubo ou da raiz das pás com o mastro recebe o nome de *mast bumping* e pode significar desde um pequeno dano no mastro até em uma condição extrema, a ruptura e separação do rotor principal ou que as pás desse rotor atinjam a cabine ou a cauda do helicóptero. No entanto, é preciso ressaltar que nem toda condição de "G" negativo provoca necessariamente a ocorrência de um *mast bumping*, sendo este apenas uma possibilidade, um risco presente neste tipo de manobra.

No caso dos acidentes citados na Nova Zelândia, a geografia pode ter um papel preponderante nas ocorrências. Por ser uma região montanhosa, a incidência de fortes ventos pode provocar turbulências capazes de fazer o helicóptero atingir uma condição de "G" negativo. Somada a essa condição, na visão do fabricante, o comportamento do piloto pode ser decisivo para a ocorrência do acidente.

O manual do fabricante alerta para esse risco e sugere a prática de um voo coordenado, com uma velocidade entre 60 e 70 kt, sem movimentos amplos e abruptos do cíclico. Caso o piloto acabe entrando na condição favorável ao *mast bumping* ele deve, suavemente, aplicar o comando do cíclico para trás com o intuito de "recarregar" o rotor principal para então contrariar o movimento de rolagem provocado pelo rotor de cauda.

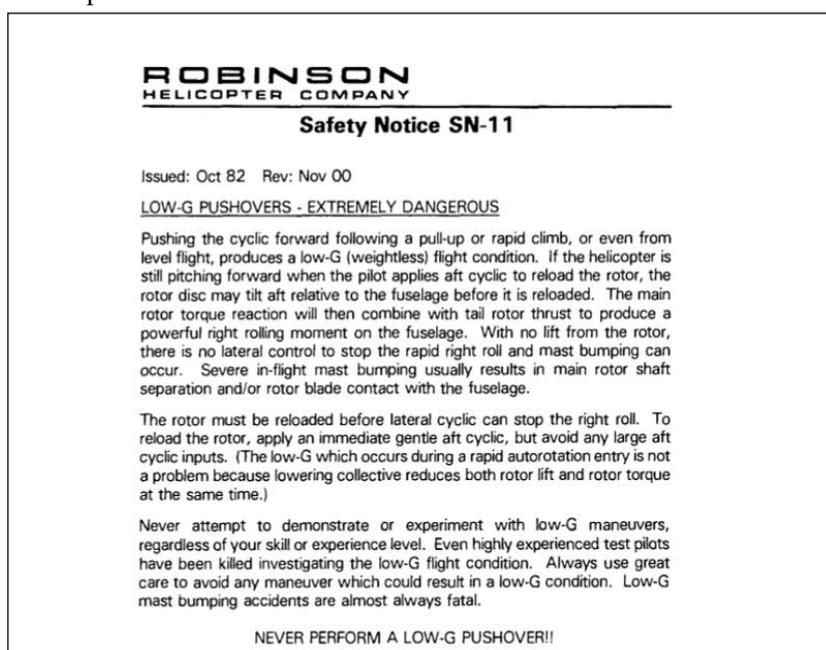


Figura 7 – Nota de segurança do manual do R22 (Fonte: ROBINSON POH, 2012).

Enquanto as discussões entre as características de projeto versus as técnicas de pilotagem não são conclusivas no que se refere aos acidentes de *mast bumping*, ressalta-se a importância de desenvolver um estudo sobre as oscilações induzidas pelo

piloto no modelo de helicóptero Robinson 22. Independentemente da possibilidade de uma maior propensão desse modelo bipá ao fenômeno do *mast bumping*, a aplicação de comandos ou a falta destes no tempo adequado por parte do piloto podem agravar a situação.

Dada popularidade do R22 em todo o mundo, destaca-se a ausência de dados sobre oscilação induzida por pilotos para esse modelo de helicóptero básico. Os estudos encontrados, desenvolvidos na Europa e Estados Unidos, contemplam aeronaves maiores com um ou mais motores à reação e com três pás ou mais em seu rotor principal. O projeto Aristotel, desenvolvido pela França em parceria com outros países da Europa, busca disseminar as informações obtidas em suas pesquisas e, no caso das oscilações induzidas, a aeronave estudada foi o modelo alemão BO-105, com peso máximo de decolagem de 2.300 kg. Em 2011 uma comissão militar americana desenvolveu um estudo sobre as P.I.O. a partir de um acidente envolvendo um Chinook Ch-47D, aeronave com dois rotores em tandem, fabricada pela Boeing, com peso máximo de decolagem de 22.680 kg. Um artigo escrito por pesquisadores na Romênia, em 2014, traz dados de manobrabilidade obtidos com o modelo computacional do helicóptero francês Puma 330, aeronave quadripá, com dois motores à reação e peso máximo de decolagem de 7.000 Kg. Todos os modelos citados são aeronaves de médio e grande porte, de grande complexidade.



Figura 8 – Helicóptero modelo BO-105 (Fonte: WIKIPEDIA, 2017).

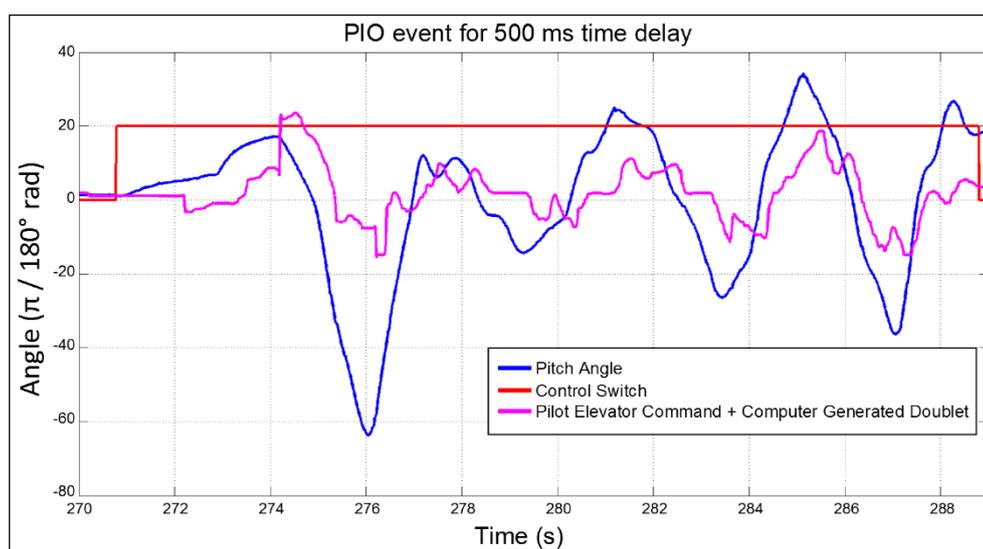


Figura 9 – Evento de oscilação induzida por tempo (Fonte: AEROSPACE, 2016)

3.1 GERENCIAMENTO DE RISCO NAS OPERAÇÕES

O manual de sistema de gerenciamento de segurança publicado pela International Civil Aviation Organization - ICAO em 2013, terceira edição, denominado documento 9859 – *Safety Management Manual*, tem por objetivo utilizar ferramentas de gerenciamento operacional para aumentar a segurança de voo. Naquele mesmo ano ele faria parte de um documento maior que estava sendo elaborado, o Anexo 19 da ICAO - *Safety Management*.

A ideia principal do documento era desenvolver uma ferramenta de gestão de segurança voltada para a aviação. A definição de segurança apresentada pelo documento é a seguinte:

“O estado em que o risco de lesões às pessoas ou de danos aos bens se reduz e se mantém em um nível aceitável, ou abaixo deste, por meio de um processo contínuo de identificação de perigos e gerenciamento dos riscos”.
(DOC 9859, Cap. 2, 2013, p. 1)

Segundo o documento 9859, Perigo seria “Condição, objeto ou atividade que pode potencialmente causar lesões às pessoas, danos ao equipamento ou estruturas, perda de material, ou redução da habilidade de desempenhar uma determinada função”. Já o gerenciamento dos Riscos “é a avaliação das consequências de um perigo, expressa em termos de probabilidade e severidade, tomando como referência a pior condição previsível”.

		Severidade				
		5 Catastrófica	4 Perigoso	3 Grande	2 Pequena	1 Desprezível
Probabilidade de Ocorrência	1 Extremamente Improvável	5 Revisar	4 Aceitável	3 Aceitável	2 Aceitável	1 Aceitável
	2 Improvável	10 Inaceitável	8 Revisar	6 Revisar	4 Aceitável	2 Aceitável
	3 Remota	15 Inaceitável	12 Inaceitável	9 Revisar	6 Revisar	3 Aceitável
	4 Ocasional	20 Inaceitável	16 Inaceitável	12 Inaceitável	8 Revisar	4 Aceitável
	5 Frequente	25 Inaceitável	20 Inaceitável	15 Inaceitável	10 Inaceitável	5 Revisar

Figura 10 – Matriz de gerenciamento de risco (Fonte: REVISTA ESPACIOS, 2013)

Para tanto o documento utiliza uma tabela relacionando a probabilidade de um evento ocorrer em uma escala de um a cinco, sendo um, “extremamente improvável” até cinco, “frequente”. O valor encontrado deve então ser associado a uma série de colunas onde a severidade do evento vai da letra “A” até “E”, sendo “E” descrito como “desprezível” ou escala um, e “A” como “catastrófica” ou escala cinco. Com a classificação dos riscos feita, as combinações de números e letras numa matriz podem estar entre um de três resultados possíveis: região aceitável, região tolerável e região intolerável. A primeira opção não é um problema para a operação; a segunda depende de uma melhor avaliação e a terceira não permite que a operação seja realizada. O objetivo é criar ações que movam a operação da região mais crítica para a região tolerável ou idealmente para a região aceitável, mitigando os riscos.



Figura 11 – Triângulo invertido das regiões de risco (Fonte: PILOTO POLICIAL, 2013).

Acredita-se que a avaliação correta dos riscos de uma operação envolvendo um helicóptero bipá monomotor a pistão pode contribuir para mitigar o risco de oscilações induzidas pelo piloto. A matriz de gerenciamento dos riscos permite ajudar o piloto em seu processo de decisão para seguir com sua tarefa ou tomar medidas precaucionais para operar com um nível aceitável de segurança ou, ainda, não operar o equipamento até que as condições de voo se tornem favoráveis.

Usaremos, por exemplo, uma situação típica de instrução como o aprendizado de uma manobra conhecida como “pairado”. Segundo o “Guia de Procedimentos e Manobras da Rangel Escola de Aviação Civil” (2014, p.17), seu objetivo é: “manter o helicóptero imóvel sobre um ponto da superfície com altura e proa constantes”. É uma manobra executada normalmente à baixa altura e exige grande coordenação por parte do aluno que tem de estar atento ao vento, parâmetros do helicóptero, características do terreno, presença de obstáculos e distrações, entre outras coisas. O instrutor tem de considerar todos os elementos citados acima e incluir também o grau de experiência e o nervosismo do aluno, presentes durante o processo de instrução. A partir da avaliação dos riscos, ele pode dar uma ênfase maior no *briefing* da manobra, ou explicar o fenômeno das oscilações induzidas para seu aluno. O instrutor pode ainda suspender o ensino da manobra por condições meteorológicas desfavoráveis, ou esperar que o aluno esteja com uma maior proficiência em relação aos comandos antes de permitir que ele realize o pairado. Isso irá ajudar o aluno a avaliar todos os fatores que devem ser levados em conta, aumentando a consciência situacional do mesmo.



Figura 12 – Helicóptero R22 durante o pairado (Fonte: JITZE COUPERUS, 2010),

4 CONCLUSÃO

Ao fim do estudo, pode-se compreender um pouco melhor o que são as oscilações induzidas pelo piloto e sua história, concomitante ao próprio desenvolvimento da aviação, além dos riscos que representam para a operação das aeronaves quando associadas com o *mast bumping*.

O trabalho manteve o foco em helicópteros bipás e monomotores a pistão, representados nesse artigo pelo modelo Robinson 22. Foram exploradas as peculiaridades do voo do helicóptero, suas características aerodinâmicas, a interdependência entre seus comandos e os tipos de frequências assim como a interação biomecânica dos seres humanos e os desafios apresentados pelo meio onde homem e máquina atuam.

Pesquisou-se os acidentes significativos ocorridos na Nova Zelândia envolvendo o fenômeno de *mast bumping* e um acidente com essas características ocorrido com um modelo da Robinson no Brasil. Além das implicações relativas às perdas humanas e materiais percebe-se a necessidade de pesquisas sobre as oscilações induzidas por pilotos em aeronaves de asas rotativas ditas básicas. O baixo custo, versatilidade e popularidade desses modelos justificam o investimento necessário para uma melhor compreensão dos fenômenos físicos envolvidos, da mesma maneira que o desenvolvimento de padrões de pilotagem que façam frente aos riscos associados.

Na impossibilidade a curto prazo de obter esses dados, sugere-se o uso do gerenciamento de risco nas operações realizadas por esses helicópteros, utilizando o sistema de identificação de perigos e de classificação dos riscos desenvolvido pelo documento 9859 e parte integrante do anexo 19 da ICAO, Safety Management. O objetivo é chamar a atenção de fabricantes, operadores, pilotos e órgãos reguladores para o problema e mitigar os riscos de operação. Um trabalho que conte com a participação de todos os atores da aviação de asas rotativas na busca de soluções que aumentem a segurança sem sacrificar ou inviabilizar financeiramente as operações.

Helicópteros, por sua natureza e versatilidade, são máquinas fascinantes, mas, em contrapartida, exigem daqueles que as operam um cuidado especial e, principalmente, uma boa dose de humildade e respeito. Essa lição deve ser sempre lembrada por todos e pode ser encontrada em uma nota de segurança SN-18 do Pilot's Operating Handbook - POH da aeronave Robinson 22:

“Quando pilotado de forma apropriada e conservativa, os helicópteros são potencialmente as aeronaves mais seguras já construídas. Mas os helicópteros são também, provavelmente, os que menos perdoam erros. Eles devem ser sempre voados na defensiva. O piloto deve permitir a si mesmo uma margem de segurança sempre maior àquela que ele julgar necessária, por via das dúvidas” (Robinson POH, 2013, p.8).

REFERÊNCIAS

- AFLOARE A., IONITA A., Prediction of the Handling Qualities and Pilot-Induced Oscillation Rating Levels, Incas Bulletin, Volume 6, pp. 3-13, Romania, 2014.
- CENIPA. Cenipa Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos, Relatório Final A-207/CENIPA/2013, Disponível em: <http://prevencao.potter.net.br/Public/media/media/pt/RF_A-207CENIPA2013_PR-MXM_1.pdf> Acesso em: 11 de jun. 2017.
- D. H. KLYDE, D. T. MCRUER, T. T. MYERS, Unified Pilot-Induced Oscillation Theory Volume I: PIO Analysis with Linear and Nonlinear Effective Vehicle Characteristics including Rate Limiting, 1995.
- DIETERICH O., GÖTZ J., VU DANG, et al., Adverse Rotorcraft-Pilot Coupling: Recent Research Activities in Europe, 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/27353916_Adverse_rotorcraft-pilot_coupling_recent_research_activities_in_Europe> Acesso em: 2 mar. 2017.
- D.T. MCRUER, Pilot-Induced Oscillation and Human Dynamic Behavior, NASA CR4683, USA, 1995
- FAA FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION FAA –H -8083-21A -Helicopter Flying Handbook, Washington, USA, 2012.
- FAA FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION FAA –H -8083-4 -Helicopter Instructor’s Handbook, Washington, USA, 2012.
- FAA FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, Flight Lessons for April 29, 2010 - Suggested by this week’s aircraft mishap reports. Disponível em: <<https://www.faasafety.gov/files/gslac/library/documents/2010/Apr/43066/FLYING%20LESSONS%20100429.pdf>> Acesso em: 30 mai. 2017.
- FAA FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION, Flight Lessons for April 29, 2010 - Suggested by this week’s aircraft mishap reports. Disponível em: <<https://www.faasafety.gov/files/gslac/library/documents/2010/Apr/43066/FLYING%20LESSONS%20100429.pdf>> Acesso em: 30 mai. 2017.
- FRANK LOMBARDI, Levels of Pilot Gain, 2011. Disponível em: <<http://www.rotorandwing.com/2011/12/01/levels-of-pilot-gain/>> Acesso em: 30 mai. 2017.
- FAUCI A., BRAUNWALD E., ISSELBACHER K., WILSON J., et al. Harrison Medicina Interna – Volume I, 14ª edição, Rio de Janeiro, Editora McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda, 1998. 1499 p. p.94. Inclui índice. ISBN 85-86804-03-7
- KATAYANAGI R., Pilot-Induced Oscillation Analysis with Actuator Rate Limiting and Feedback Control Loop, American Institute of Aeronautics Astronautics AIAA 2004-4998, 19 ago. 2004. Disponível em: <<http://r-katayanagi.air-nifty.com/a4/y041008aiaa20044998pio.pdf>> Acesso em: 02 mar. 2017.
- LIU Q., Pilot-Induced-Oscillation Detection and Mitigation, Dec. 2012. Disponível em: <<https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/7998>> Acesso em: 2 mar. 2017.
- LÍRIO, Thiago Alexandre, Guia Técnico de Investigação de Acidentes Aeronáuticos com Helicópteros para Investigadores do Sipaer, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <http://www.bd.bibl.ita.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2127>. Acesso em: 19 abr. 2018.
- M.D. PAVEL, D. YILMAZ, B. DANGVU, M. JUMP, L. LU, et al.. Adverse Rotorcraft-Pilot Couplings-Modelling and Prediction of Rigid Body RPC. Sketches from the Work of European Project ARISTOTEL 2010-2013. 39th European Rotorcraft Forum, Sep2013, MOSCOU, Russia.
- M.D. PAVEL, PADFIELD D., Understanding the Peculiarities of Rotorcraft-Pilot-Couplings, 2008. Disponível em: <<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:6d780387-ab74-419e-84ea-1c5da80e8e3d?collection=research>> Acesso em: 2 mar. 2017.
- NASA NATIONAL AERONAUTIC AND SPACE ADMINISTRATION, Pilot-Induced Oscillations and Human Dynamic Behavior, Report 4683, Jul. 1995.
- PHIL TAYLOR, New Zealand Herald, Undetermined Reasons: Are Robinson Helicopters too Dangerous?, 1 abr., 2017. Disponível em: <http://www.nzherald.co.nz/nz/news/article.cfm?c_id=1&objectid=11823337> Acesso em: 3 abr. 2017.
- RANGEL ESCOLA DE AVIAÇÃO CIVIL, Manual de Procedimentos e Manobras – PP, PC, INVH, 2014.
- ROBINSON HELICOPTER CO., R22 Pilot Operating Handbook, rev. jun. 2012.

-
- TAIC TRANSPORT ACCIDENT INVESTIGATION, Watchlist – Robinson Helicopters: Mast bumping Accidents in NZ, 2016. Disponível em: <<http://www.taic.org.nz/Watchlist2016/RobinsonhelicoptersmastbumpingaccidentsinNZ/tabid/293/language/en-US/Default.aspx>> Acesso em: 13 mai. 2017.
- TOD G., Rotorcraft Bioaeroelasticity Using Bond Graphics, l'École Nationale Supérieure d'Arts e Métiers, ENAM 0042, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/299799711_Rotorcraft_bioaeroelasticity_using_bond_graphs> Acesso em: 2 mar. 2017.
- VENROOIJ J., YILMAZ D., PAVEL D., QUARANTA G., et al. Measuring Biodinamyc Feedtrough in Helicopters, Paper No. 199, 2011. Disponível em: <http://www.kyb.tuebingen.mpg.de/fileadmin/user_upload/files/publications/2011/ERF-2011-Venrooij.pdf> Acesso em: 30 mai. 2017.