

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Thais Migoto Monteiro

**Método de amortecimento em rotores com
utilização de pastilhas piezoelétricas**

Taubaté - SP

2017

Thais Migoto Monteiro

**MÉTODO DE AMORTECIMENTO EM ROTORES
COM UTILIZAÇÃO DE PASTILHAS
PIEZOELÉTRICAS**

Trabalho de graduação apresentada ao Departamento de Engenharia, da Universidade de Taubaté para obtenção do Título de Engenheiro Mecânico.

Orientador (a): Prof. Me. Artur Luiz Rezende Pereira

**Taubaté – SP
2017**

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

M775m

Monteiro, Thais Migoto

Método de amortecimento em rotores com utilização de pastilhas piezoelétricas. / Thais Migoto Monteiro. - 2017.

30f. : il; 30 cm.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) –
Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia
Mecânica e Elétrica, 2017

Orientador: Prof. Me. Arthur Rezende Pereira,
Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica.

1. Movimento de precessão. 2. Shunt damping. 3.
Pastilhas piezoelétricas. I. Título.

Thais Migoto Monteiro

Método de amortecimento em rotores com utilização de pastilhas piezoelétricas

Trabalho de graduação apresentada no departamento de Engenharia da Universidade de Taubaté para obtenção do Título de Engenheiro Mecânico.

Orientador (a): Prof. Me. Artur Luiz Rezende Pereira

Data: 03/10/2017.

Resultado: Aprovada.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Artur Luiz Rezende Pereira Universidade de Taubaté

Assinatura [Assinatura]

Prof. Pedro Carlos Russi Universidade de Taubaté

Assinatura [Assinatura]

Prof. _____ Universidade de Taubaté

Assinatura _____

RESUMO

A dinâmica de rotores é o ramo da engenharia que estuda a dinâmica de vibrações de máquinas com o objetivo principal de monitorar e controlar sistemas de pequeno a grande porte em que os níveis de vibrações podem afetar seu funcionamento no tocante a desempenho e segurança. Este trabalho propõe realizar uma revisão dos métodos de controle de vibrações aplicados a sistemas rotativos tendo em vista evitar problemas de fadiga causados pelo movimento de precessão. Ênfase será dada à técnica conhecida como *shunt damping*, no qual são colocadas pastilhas piezoelétricas que funcionam como atuadores e medidores de vibrações. A técnica consiste em acoplar essas pastilhas a base da estrutura, de forma que durante seu funcionamento a energia de vibração seja transferida para o circuito *shunt* que parcialmente a dissipa.

Palavras – chave: Movimento de Precessão, *Shunt Damping*, Piezoelétricas.

ABSTRACT

Rotator dynamics is the branch of engineering that studies the dynamics of machine vibrations with the primary purpose of monitoring and controlling systems from small to large in which vibration levels can affect their performance and safety. This work proposes a review of the vibration control methods applied to rotary systems in order to avoid fatigue problems caused by the precession movement. Emphasis will be given to the technique known as shunt damping, in which are placed piezoelectric tablets that function as actuators and vibration meters. The technique consists in coupling these inserts to the base of the structure, so that during its operation the vibration energy is transferred to the shunt circuit which partially dissipates it.

Key – words: Precise Movement, Shunt Damping, Piezoelectric

AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos pais Luiz Fernando e Eloisa por sempre acreditarem no meu potencial.

Em especial à minha avó Idalina que me mostrou que nunca é tarde para começar e nem tão cedo para terminar, sendo sempre o exemplo da mulher que um dia eu me transformarei, pela oportunidade de cursar uma universidade e ter uma profissão.

Ao meu noivo Rafael, pela motivação e apoio dado para trilhar este caminho árduo, juntamente com o meu sogro Evandro Luiz Anacleto.

Ao meu orientador Prof. Me. Artur Rezende que me estendeu a mão no momento de decisão.

A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.

Arthur Schopenhauer

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	Rotor de massa simples <i>Föppl / Jeffcott</i>	11
2.2	Movimento de um sistema rotativo.....	14
2.3	Fundamentos de piezeletricidade linear.....	19
2.4	Amortecimentos com materiais piezelétricos.....	21
3	METODOLOGIA	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5	CONCLUSÃO	27
	REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

Os rotores são componentes que, em uma turbina ou outro tipo de máquina realiza um movimento de rotação, esse conceito também é utilizado para designar especificamente o sistema que permite a sustentação de um helicóptero.

Os rotores ou eixos rotativos são empregados em variada gama de máquinas industriais como por exemplo geradores de energia, turbinas de vapor e gás, motores de combustão interna, elementos de transmissão de potência, nas mais variadas atividades de prospecção mineral como nas indústrias de óleo e gás. O aumento da demanda por maiores velocidades e maiores vãos entre mancais tem tornado os rotores mais flexíveis e, portanto, os estudos do movimento de vibração têm se tornado essenciais para o projeto dessas máquinas.

Esses eixos estão sujeitos a vibrações axiais que ocorrem ao longo do eixo do rotor, vibrações torcionais que causam torções em torno do eixo do rotor e vibrações laterais (flexão) que causam deslocamentos perpendiculares ao eixo do rotor. A combinação desses movimentos produz um movimento orbital num plano perpendicular ao eixo de rotação denominado precessão. Essas vibrações se levadas a valores próximos de suas frequências naturais podem induzir elevadas tensões que por sua vez podem resultar em baixos ciclos de fadiga. Podem ser causadas por vários fatores como desbalanceamento residual ou uma eventual carga lateral. A determinação precisa de seus parâmetros modais como frequências naturais, modos de vibrar e amortecimento são essenciais parâmetros de projeto para evitar tais movimentos que podem levar a danos irreversíveis e ainda a falhas catastróficas com prejuízos materiais e humanos.

O movimento de precessão pode ser direto ou inverso. Quando de forma direta, o movimento da rotação do rotor é no mesmo sentido de sua órbita. Porém, de forma inversa ou retrógrada a rotação do rotor e da órbita está em sentido oposto.

Na literatura vários tipos de solução tem sido apresentados, como aplicação de amortecedores entre mancais, absorvedores de vibração, utilização de mancais magnéticos e outros. Uma solução amplamente utilizada para reduzir ou até mesmo sanar a precessão é a utilização de pastilhas piezoelétricas, onde será acoplada na estrutura base para servir de sensores que juntamente com um sistema de controle

de voltagem dissiparam as vibrações indesejáveis, esse tipo de sistema é conhecido como *shunt damping*, o qual será tratado neste trabalho.

2 Revisão da Literatura

2.1 Rotor de massa simples *Föppl / Jeffcott*

Dinâmica do rotor é o ramo da engenharia que estuda as vibrações laterais e torção

de eixos, com o objetivo de prever as vibrações do rotor e que contém o nível de vibração em um limite aceitável de giro. O eixo ou rotor é o componente rotativo do sistema. Muitas aplicações industriais têm rotores de flexíveis, onde o eixo é projetado em uma geometria relativamente longa e fina para maximizar o espaço disponível para os componentes. (YOON ET AL, 2013)

Além disso, as máquinas são operadas em rotor de alta velocidades que aumentam a potência de saída. Como já foi dito anteriormente, o ramo da engenharia que estuda a dinâmica de vibrações das máquinas é a dinâmica dos rotores. (YOON ET AL, 2013)

Se observarmos o sistema dinâmico de um rotor, encontraremos uma dinâmica complexa onde somente encontraremos soluções analíticas em casos simples. (YOON ET AL, 2013)

Com a evolução tecnológica, soluções numéricas para análise dinâmica de rotores em 2D e 3D tornaram-se algo comum. Porém é preciso uma análise mais profunda, na qual é obtida pela derivação de uma solução analítica. Mas, mesmo realizando essa análise dificilmente será encontrada a solução final. (YOON ET AL, 2013)

Em 1895 na Alemanha, era desenvolvida a teoria da vibração para um sistema dinâmico de rotor. Com o auxílio de um sistema de rotor/ rolamento simplificado, foi desenvolvido a teoria básica pré-dicção. (YOON ET AL, 2013)

Situado no centro axial do veio, encontramos o rotor disco de massa m . Nos pontos $(u_x C, u_y C)$, localiza-se o centro geométrico do disco, simbolizado pela letra C . A massa do disco (G), situada no centro do disco nas coordenadas $(u_x G, u_y G)$. O vetor que ligam os pontos G e C , representado pela letra \mathbf{e}_u , representa o desequilíbrio de excentricidade, ou seja, o desequilíbrio do disco do rotor. Com o auxílio de ω (velocidade de rotação do disco), declaramos que \mathbf{e}_u no instante em que $t=0$, esse vetor é paralelo ao eixo x . O vetor de deslocamento (\mathbf{u}_c) com o ângulo θ ,

no qual são conectados o ponto C e a origem. Por fim, φ que vem a ser o ângulo entre os vetores \mathbf{e}_u e \mathbf{u}_c . (YOON ET AL, 2013)

Analisando de forma que a rigidez da massa não é afetada pelo disco do rotor, é possível calcular a rigidez de flexão lateral no centro axial, a fórmula é dada pela equação 2.1

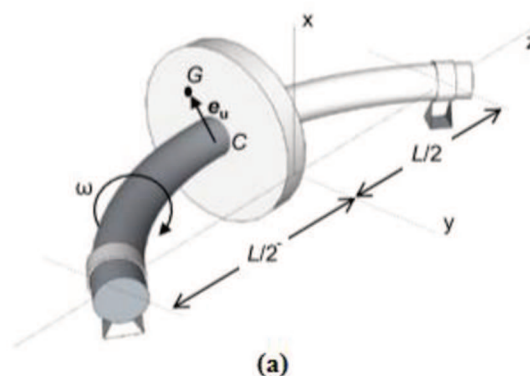
$$K_s = \frac{48EI}{L^3} \quad (2.1)$$

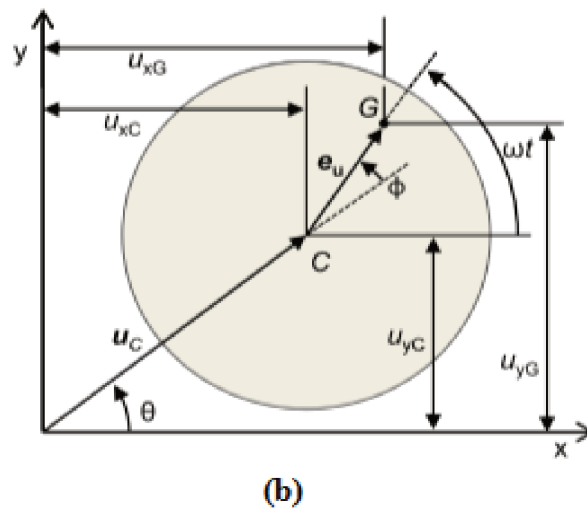
no qual E é o módulo de elasticidade do feixe, L que vem a ser o comprimento entre os mancais e \mathbf{e}_u (I) é o momento de inércia referente a área do eixo. Em um eixo cilíndrico uniforme, onde D é o diâmetro, a equação do momento de inércia é dada pela equação. 2.2

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \quad (2.2)$$

Admitimos que exista um amortecimento efetivo de pequena intensidade. O amortecimento correspondente constante e o movimento lateral do disco no meio do vão do rotor são simbolizados por c_s . Com a associação do eixo estrutural do amortecimento do fluido devido ao fluxo em turbo máquinas, e os amortecimentos efetivos dados pelos rolamentos criam um amortecimento viscoso. (YOON ET AL, 2013)

Figura 1- Massa Individual Jeffcott. Rotor em rolamentos rígidos. (a) vista lateral, (b) vista traseira da massa.





Fonte: (Yoon et al,2013) - adaptado pelo autor

As equações dinâmicas do rotor são derivadas pela aplicação da lei de movimento. Supondo-se que o eixo não tenha) sem massa, as forças de inercia e de rigidez atuarão sobre o disco. E o amortecimento é produzido pela deformação lateral. As equações laterais do movimento x e y mostrado na Figura 1 são encontradas para ser

$$m\ddot{u}_{xG} = -K_S u_{xC} - c_s \dot{u}_{xC} \quad (2.3 a)$$

$$m\ddot{u}_{yG} = -K_S u_{yC} - c_s \dot{u}_{yC} \quad (2.3 b)$$

onde $(u_{xG} \ u_{yG})$ e $(u_{xC} \ u_{yC})$ são respectivamente a massa do disco e o centro geométrico do disco. Outra forma que as coordenadas do centro de massa podem se apresentar em relação ao centro geométrico do disco (C) e o ângulo do rotor de ωt no tempo t

$$u_{xG} = u_{xC} + e_u \cos(\omega t) \quad (2.4 a)$$

$$(2.4 b)$$

$$u_{yG} = u_{yC} + e_u \sin(\omega t)$$

Utilizando a substituição da derivada segunda das Equações (2.4 a), (2.4 b) nas Equações (2.3 a), (2.3 b), será encontrado a equação do movimento *Föppl / Jeffcott* do rotor em relação ao centro geométrico, dado pelas equações 2.5 a e 2.5 b

$$\ddot{m}u_{xC} + k_S u_{xC} + c_S \dot{u}_{xC} = m e_u \omega^2 \cos(\omega t) \quad (2.5 a)$$

$$(2.5 b)$$

$$\ddot{m}u_{yC} + k_S u_{yC} + c_S \dot{u}_{yC} = m e_u \omega^2 \sin(\omega t)$$

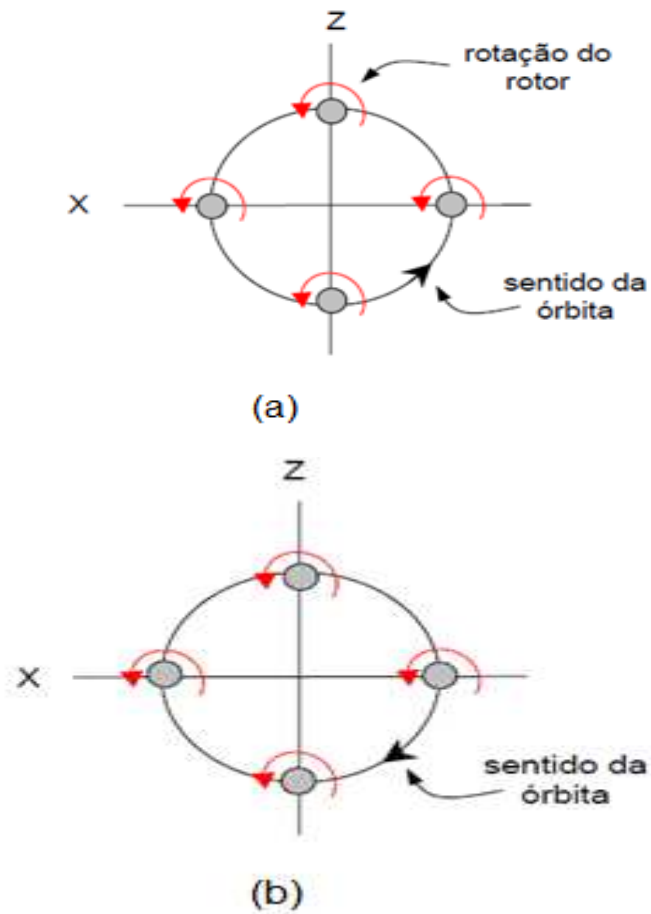
Pode-se notar que, como os mancais são tidos como ilimitadamente rígidos e o disco do rotor não inclina, neste tipo não está incluso o efeito giroscópico que age sobre o rotor. O eixo é fixado nos locais dos mancais, assim estão alinhados sempre no centro do rolamento. (YOON ET AL, 2013)

2.2 Movimento de um sistema rotativo

Um sistema rotativo é composto essencialmente de eixo, disco e mancais, onde são realizados dois movimentos: rotação própria ou precessão, onde na rotação própria (*spin*), ele realiza a rotação em torno de si mesmo, e na precessão (*whirl*) esse movimento é feito em torno de um eixo com configurações não defletidas. A precessão pode ser realizada de duas formas: direta ou inversa (também conhecida como retrógrada). (PEREIRA, 2005)

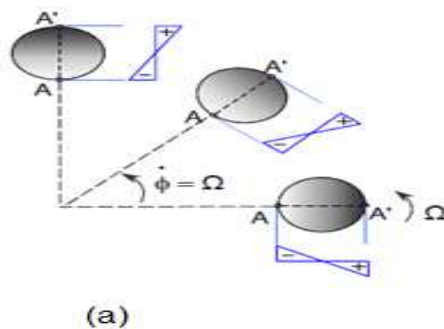
Na precessão direta a rotação da órbita do centro geométrico está no mesmo sentido que a rotação do rotor, ou seja, estão em sentidos iguais. Por outro lado, a precessão retrógrada, os movimentos de rotação do rotor e do centro geométrico estão em sentidos opostos, logo esse movimento pode causar danos irreversíveis. É possível observar essa rotação através da Figura 2 e Figura 3. (PEREIRA, 2005)

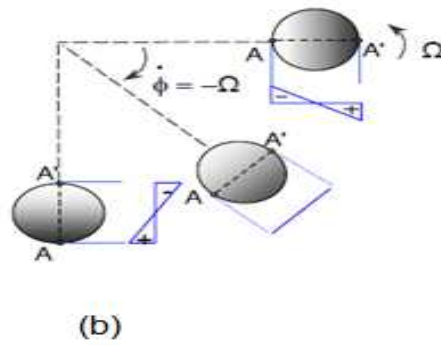
Figura 2-Movimento de precessão (a)direita (*forward*) e (b) inversa (*backward*)



Fonte: (Pereira, 2005) - adaptado pelo autor

Figura 3- (a)Precessão direta e (b) precessão inversa (ambos síncronos)

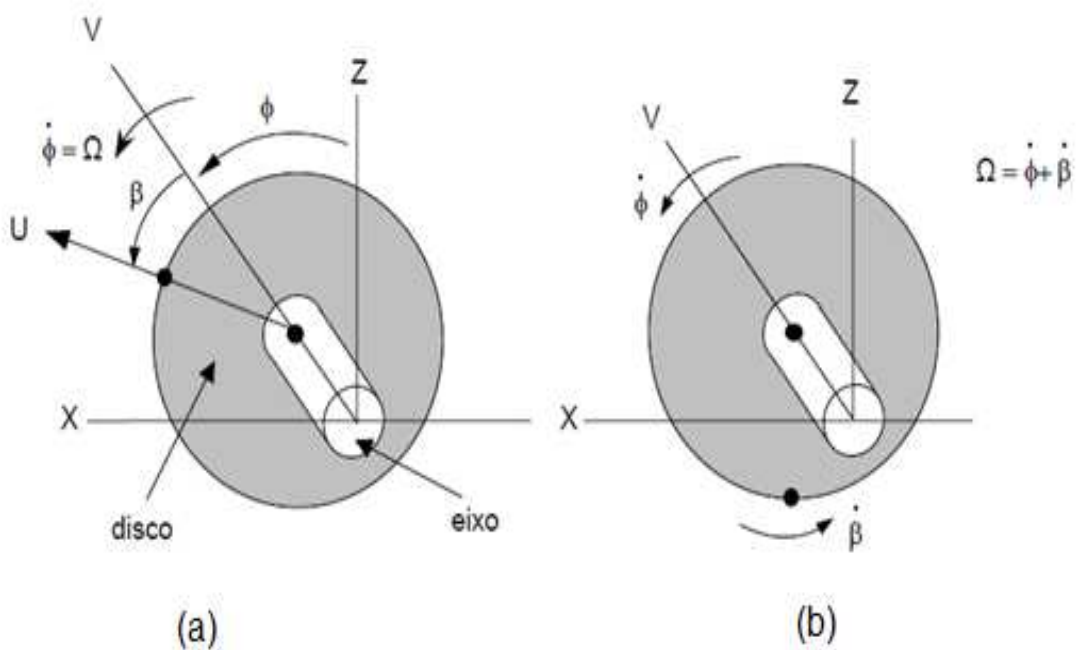




Fonte: (Pereira, 2005) - adaptado pelo autor

Existe também a precessão síncrona, onde existe um desbalanceamento do rotor. É caracterizado como precessão síncrona, quando a velocidade de precessão e a rotação do eixo (Ω) são iguais. Na figura 4 é possível, entender melhor esse movimento síncrono. (PEREIRA, 2005)

Figura 4-(a)Precessão síncrona e (b) precessão não síncrona.



Fonte: (Pereira, 2005) – adaptado pelo autor

A precessão retrógrada é muitas vezes destrutível, pois esse movimento altera a tensão normal na seção do eixo transversal, ou seja, ocorre falha por fadiga na peça. (PEREIRA, 2005)

Analisando o modelo de rotor Jeffcott, conseguimos visualizar o movimento de precessão. O deslocamento estático do desbalanceamento é $d=CM$ e a deflexão do eixo do rotor devido as cargas dinâmicas é $r=OC$. São desconsideradas a força de gravidade em relação às forças dinâmicas. Para se ter o movimento do centro do disco através de coordenadas X e Y , utiliza-se as seguintes equações diferenciais

$$m\ddot{X} + c\dot{X} + kX = m\Omega^2 d \text{ sen}\Omega t \quad (2.6)$$

$$m\ddot{Z} + c\dot{Z} + kZ = m\Omega^2 d \text{ cos}\Omega t$$

Solucionando a equação 2.6 para a precessão síncrona, encontra a equação 2.7

$$X = \frac{\Omega^2 d}{\sqrt{\left(\frac{k}{m} - \Omega^2\right)^2 + \left(\frac{c\Omega}{m}\right)^2}} \text{ sen}(\Omega t + \beta) \quad (2.7)$$

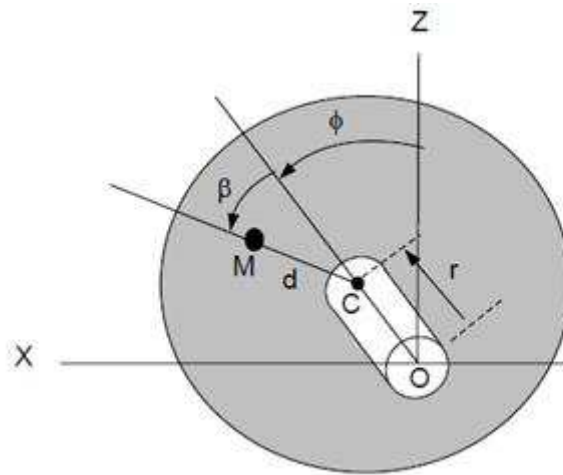
$$Z = \frac{\Omega^2 d}{\sqrt{\left(\frac{k}{m} - \Omega^2\right)^2 + \left(\frac{c\Omega}{m}\right)^2}} \text{ cos}(\Omega t + \beta)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{c\Omega}{m \left(\frac{k}{m} - \Omega^2 \right)} \right]$$

Logo, da Figura 5 concluímos que a deflexão do eixo do rotor é a equação 2.7

$$r = \sqrt{X^2 + Z^2} = \frac{\Omega^2 d}{\sqrt{\left(k/m - \Omega^2\right)^2 + \left(c\Omega/m\right)^2}} \quad (2.7)$$

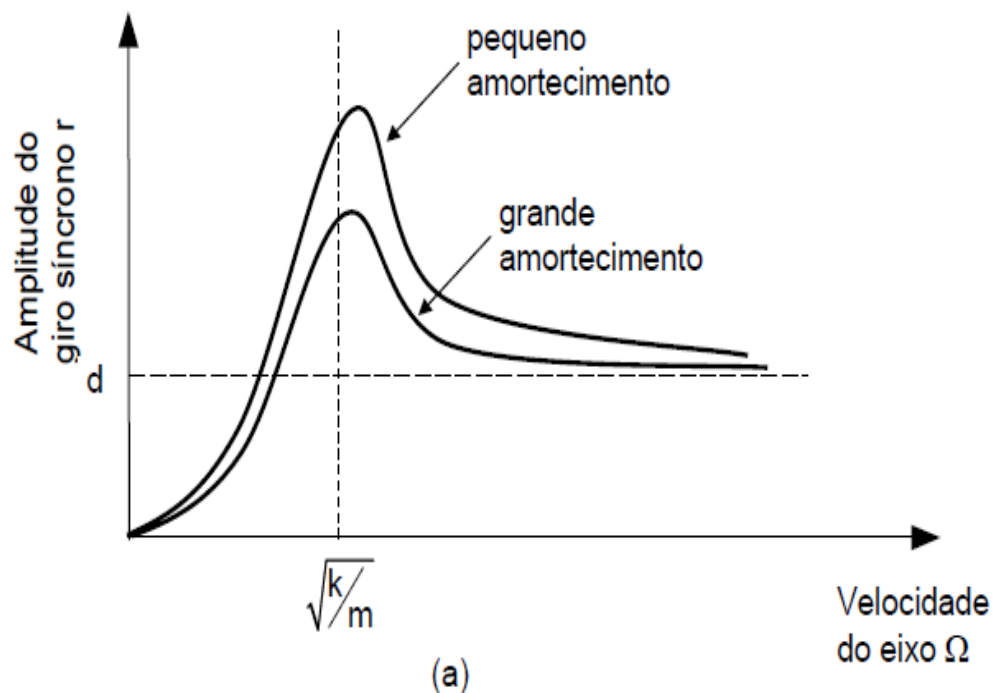
Figura 2.5- *Jeffcott rotor* realizando um precessão.

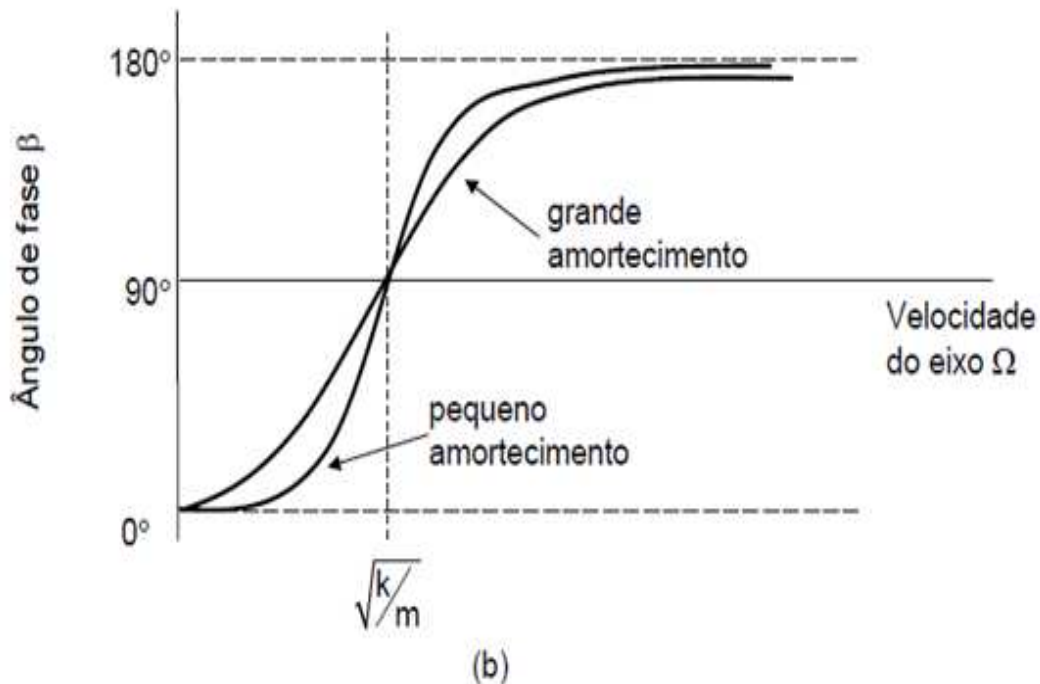


Fonte: (Pereira, 2005) – adaptado pelo autor

Através da Figura 6, observamos que quando a velocidade crítica é atingida, a amplitude de precessão síncrona é aumentada, e ao chegar na velocidade supercrítica (acima da velocidade crítica) a amplitude de precessão diminui e se aproxima do deslocamento estático. Ou seja, balanceando o rotor e em altas velocidade encontra-se uma amplitude de precessão menor. (PEREIRA, 2005)

Figura 6- Resposta a um desbalanceamento do *Jeffcott rotor*





Fonte: (Pereira, 2005) – adaptado pelo autor

Conclui-se que durante a velocidade crítica o amortecimento será a solução para a diminuição da amplitude de precessão. (PEREIRA, 2005)

2.3 Fundamentos de piezeletricidade linear

Relatada inicialmente pelos irmãos *Pierre* e *Jacques Currie* em 1880, os quais observaram que os materiais piezelétricos possuem uma estrutura simétrica com relação ao centro da célula. (SANTANA, 2007)

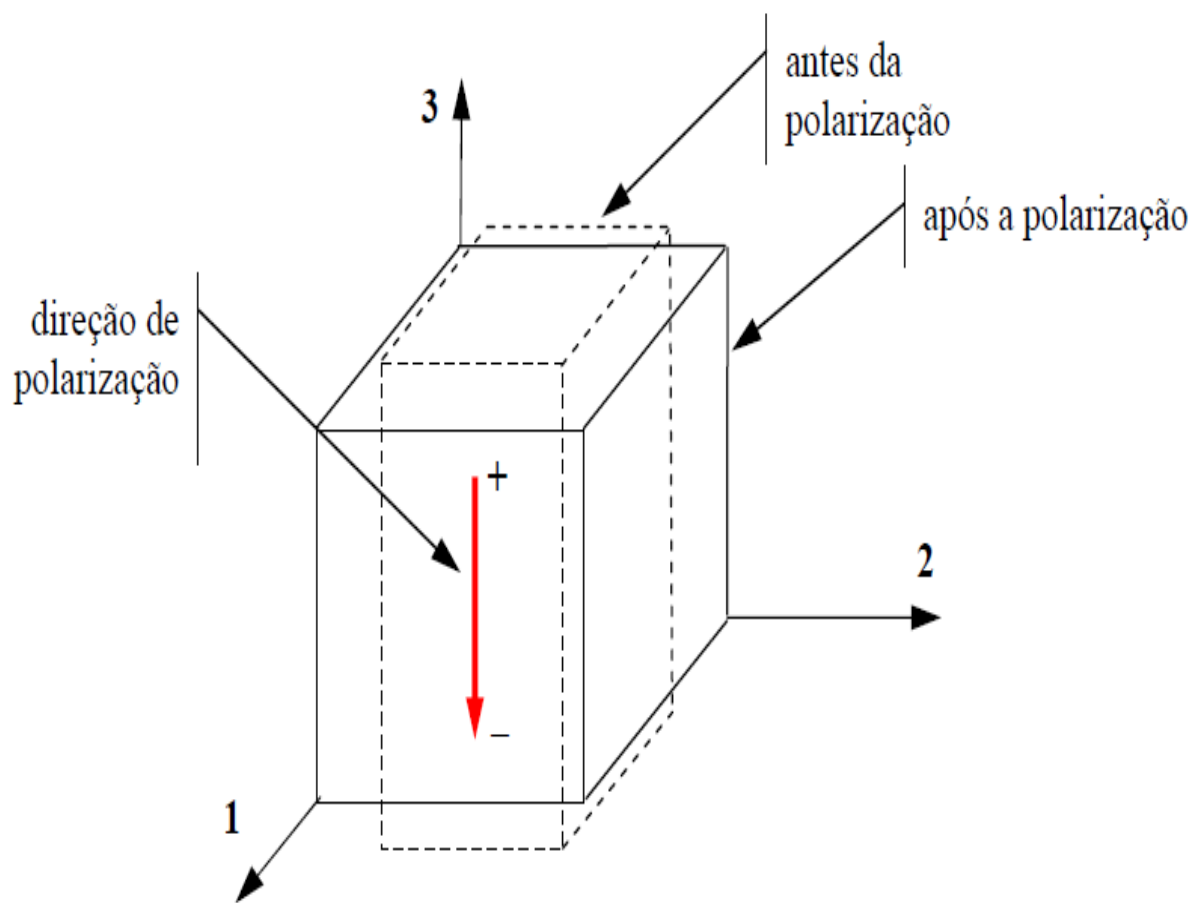
Recentemente, em 2002, esse estudo foi revisada novamente por Setter, e constatado que os materiais piezelétricos atuam de forma direta e inversa. Quando os materiais piezelétricos submetem-se a um carregamento externo, é formada em sua superfície uma distribuição de cargas elétricas, a isso chamamos de efeito direto. O efeito inverso é caracterizado por deformações em suas formas e dimensões, devido a um campo elétrico. (SANTANA, 2007)

Os materiais mais utilizados são formados de classes cerâmicas piezelétricas policristalina. Em sua forma original esses materiais são isotrópicos, logo, suas células cristalinas unitárias não apresentam um centro de simetria. Com o emprego de um campo elétrico, o material cerâmico é colocado em altas temperaturas, nas

quais os cristais são conduzidos de forma que o material se transforma em anisotrópico. (SANTANA, 2007)

O material permanece polarizado depois da retirada do campo elétrico, o que leva a característica piezoeétrica à temperaturas ambientes. As formas iniciais do material piezoeétrica são modificadas por causa da polarização, como é demonstrado na Figura 7. (SANTANA, 2007)

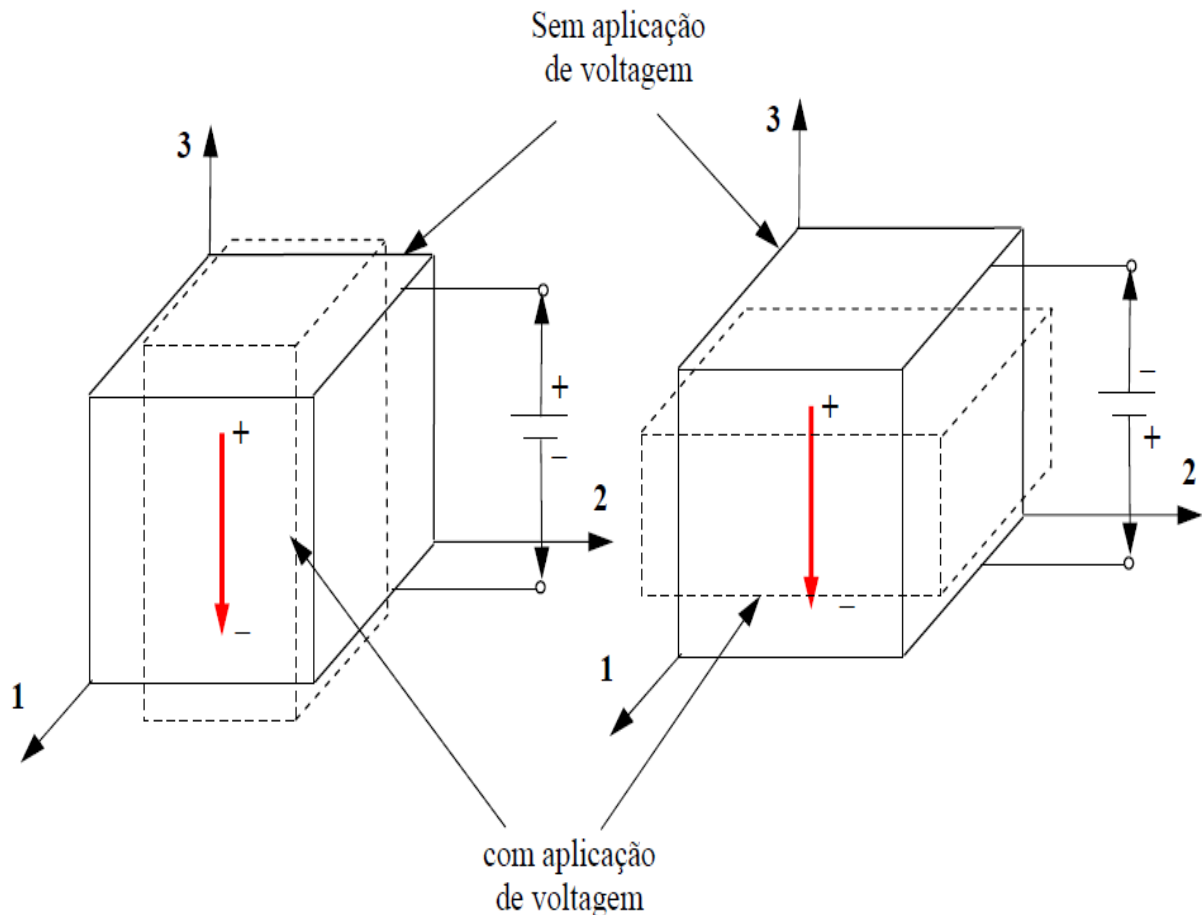
Figura 7- Dimensões do elemento piezoeétrico antes e depois da polarização na direção 1.



Fonte: (Santana, 2007) - adaptado pelo autor

Essas mudanças ocorridas em suas dimensões ocorrem pela aplicação de carga de uma cerâmica polarizada. A essa mudança se dá o nome de modo motor ou modo atuador. Quando aplicada uma voltagem com igual polaridade ocorre um aumento na direção 3 e contrações na direção 1 e 2. Se aplicado uma voltagem com polaridades opostas gera uma contração na direção 3 e um aumento nas direções 1 e 2, como podemos ver na Figura 8. (SANTANA, 2007)

Figura 8- Dimensão do elemento piezocerâmico para diferentes polaridades de aplicação de voltagem.



Fonte: (Santana, 2007) - adaptado pelo autor

A utilização das pastilhas piezelétricas como sensores se dá quando a mesma é utilizada de forma direta, ou seja, a deformação que ocorre na pastilha se dá pela deformação ocorrida na estrutura base. De forma inversa a pastilha piezelétrica é utilizada como atuador, ela se deforma devido ao sinal de voltagem recebido. (SANTANA, 2007)

2.4 Amortecimentos com matérias piezoelétricos

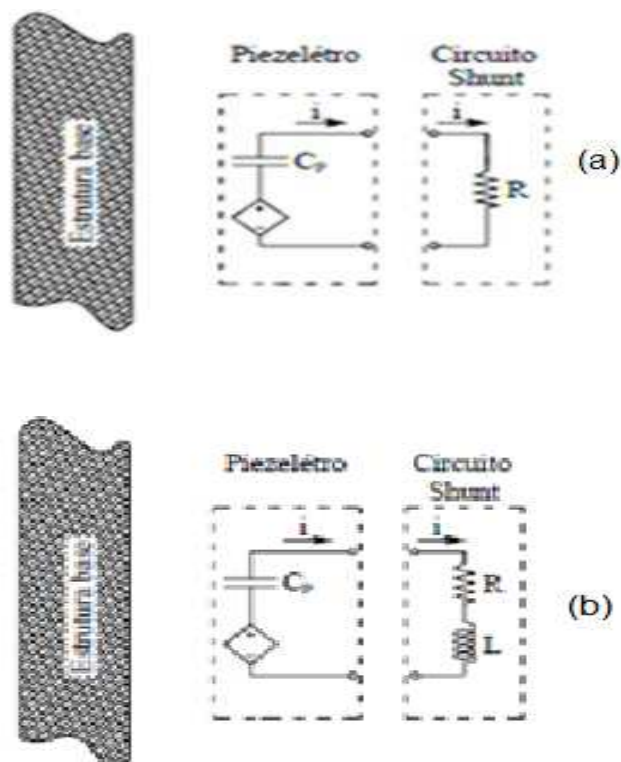
Os materiais piezoelétricos são usados para controlar as vibrações de estruturas flexíveis, quando na forma de sensores/atuadores. Para o controle de vibração as pastilhas piezoelétricas são acopladas na base utilizando um material

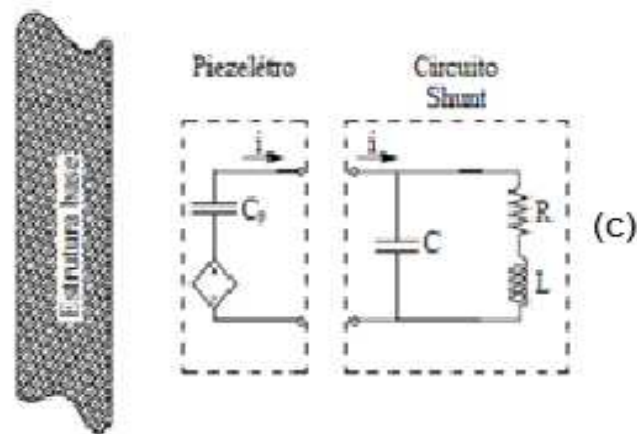
aderente. Durante uma aplicação de controle ativo, a pastilha piezelétrica que está na base é utilizada como um sensor, onde serão realizadas as medições de vibrações, enquanto a outra faz a função de atuador. Neste atuador é aplicado um sistema de voltagem que servirá para eliminar as vibrações que não são desejadas da estrutura base. (NOURI BARANGER, 2008)

Com a utilização de um sistema de circuito elétrico denominado *shunt*, que tem a função de transferir a energia de deformação da estrutura base, logo esse circuito elimina essas vibrações. (NOURI BARANGER, 2008)

Através da interpretação de Hagood e Von Flotow (1991), possibilita o entendimento do circuito *shunt*, onde o sensor que está acoplado a base absorve as vibrações dinâmicas. Acrescentou no sistema um elemento resistivo ao elemento indutivo formando o circuito ressonante em série (RLs). Na Figura 9 será demonstrado essa estrutura de circuito, onde C_p é a capacidade específica das pastilhas piezoelétricas. (NOURI BARANGER, 2008)

Figura 9- (a) Representação esquemática do circuito shunt resistivo, (b) do circuito shunt ressonante série e (c) do circuito shunt capacitivo.





Fonte: (Nouri Baranger, 2008) – adaptado pelo autor

Neste circuito RLs o resultado encontrado é ajustado a uma específica frequência natural ω_i , no qual adota-se valores devidos para R e L. Como a aquisição dos níveis de desempenho do componente do sistema é uma função árdua, pelo fato da natureza passiva do circuito shunt, Behrens e Moheimani (2000) propuseram uma forma de escolha para os parâmetros do shunt. (NOURI BARANGER, 2008)

Como podemos ver, o circuito shunt funciona basicamente com as pastilhas piezelétricas sendo utilizadas de dois modos: atuador e sensor. Quando utilizamos na função de sensor, ela fará as medições das vibrações na base, que serão dissipadas pelos atuadores que sofreram deformações devido à frequência de um sistema de voltagem.

3 METODOLOGIA

O trabalho será desenvolvido com base em uma revisão bibliográfica, a utilização de livros, publicações de teses e artigos de autores nacionais e internacional referentes ao estudo de análise dinâmica de rotores, na área de Engenharia Mecânica, tais autores como, Yoon, S. Y et al (2013); Nouri Baranger (2008), Pereira (2005), entre outros. A pesquisa será de caráter qualitativo, ou seja, sua intenção é exploratória.

Observa-se que o movimento de precessão aparece quando um rotor está desregulado em algum ponto, isso pode ser ocasionado pelo desbalanceamento do rotor, eventuais choques e falta de amortecimento adequado.

Os trabalhos já realizados nessa área como, Hadoog e Von Flotow (1991), Faria (2006), Santana (2007), demonstraram que a técnica de shunt-damping, tem produzido bons resultados no sentido de reduzir o movimento de precessão, e isso será demonstrado com a revisão bibliográfica de estudos que utilizam as pastilhas piezoelétricas acopladas a sua estrutura base, que dissiparam a energia que leva ao movimento de precessão.

Através de uma análise de revisão, será proposto um discussão referente ao uso da técnica para solucionar o movimento de precessão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por se tratar de máquinas como uma turbina, um motor, elementos de transmissão de potência, entre outros, a quebra do maquinário resultaria em reparos que trariam pausas na produção, ou até mesmo a morte de pessoas, quando o problema é encontrado em uma turbina de aeronave.

Como foi visto, a estrutura do rotor é formada de eixo, disco e mancais. Devido a altas velocidades ou até mesmo um amortecimento impróprio esse eixo roda de forma decentralizada.

Esse tipo de rotação é denominado precessão. Esse movimento é visto de duas formas direta ou inversa (também conhecida como retrógrada). Quando de forma direta, a rotação da órbita do centro geométrico e do rotor estão no mesmo sentido. Já de forma inversa, tanto a rotação da órbita do centro geométrico como do rotor estão em sentidos opostos, o que pode causar danos irreversíveis.

A precessão pode ser evitada com o auxílio de controladores de vibrações, como a técnica *shunt damping*.

Essa técnica funciona basicamente como um controlador de frequência da vibração sofrida no eixo. As pastilhas piezoelétricas, como é visto na figura 10 e figura 11 (atuando como sensor), acopladas ao material base analisa a frequência da velocidade, que por sua vez através de envia um sinal, que chega para outra pastilha piezoelétrica (atuando como atuador) que está ligada a um sistema de voltagem, que dissipam as vibrações indesejadas.

Figura 10- Pastilhas piezoelétricas



Fonte: <http://eletronica2002.forumeiros.com/t34976-umidificador-water-clean-max-modelo-turbo-ultrasonico-parou-de-funcionar>

Figura 11- pastilhas piezoelétricas de cerâmica



Fonte: <http://www.limpeza-ultrassom.com>

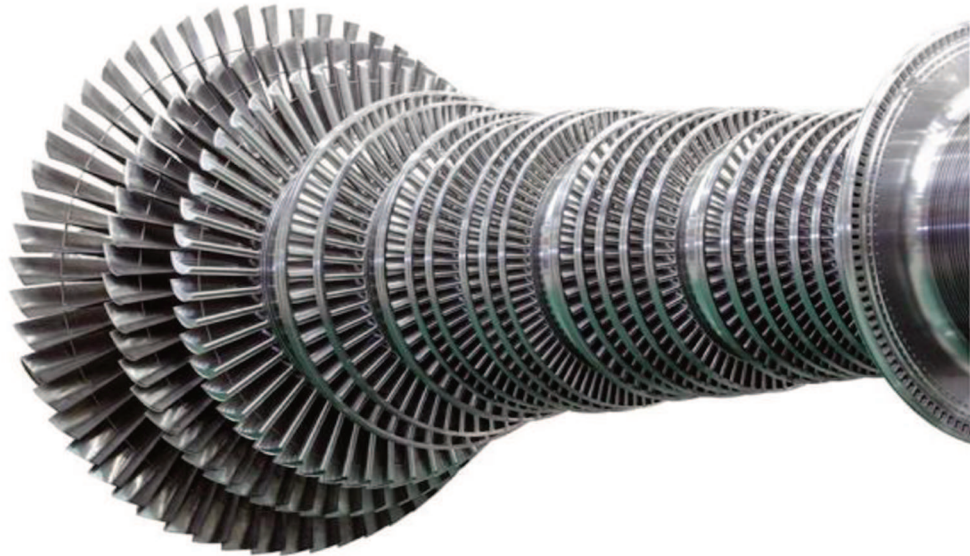
Como esse sistema permite uma monitoração das vibrações, e possíveis correções das mesmas, tem um alto potencial de aplicação nas indústrias aeronáuticas, aeroespacial, automobilística, entre outros.

A técnica é promissora, como visto anterior tem aplicações em vários setores industriais, e comparada a outras técnicas de controles de vibrações, possui um alto índice de eficiência e custo.

5 CONCLUSÃO

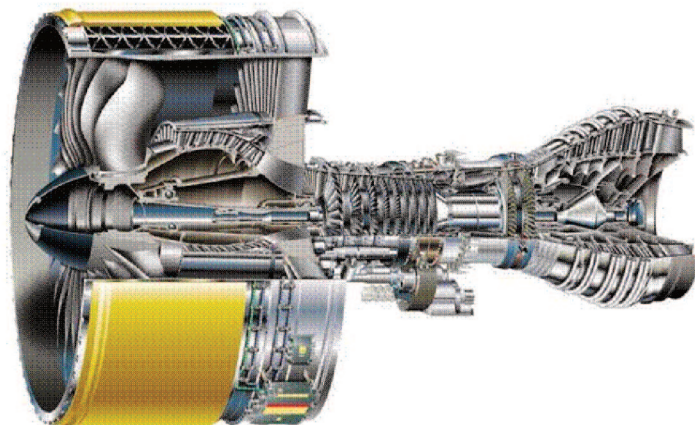
Os eixos rotativos ou rotores, observado na figura 12 são encontrados em variada gama da engenharia por exemplo, em uma aeronave como é visto na figura 13. Esses eixos estão sujeitos a vários movimentos e um deles é um movimento muito estudado, devido a causar grande problema quando ocorre, no caso o movimento de precessão.

Figura 12- eixo do rotor da turbina



Fonte: <http://www.tgmvoce sabia.com.br/tgm/voce-sabia-que-o-rotor-da-turbina-e-fabricado-em-peca-única>

Figura 13- turbina de aeronave



Fonte: <http://usinagemsemsegredos.blogspot.com.br/2009/11/voce-sabia-usinagem-dos-componentes.html>

O movimento de precessão que é a rotação do rotor de forma decentralizada, pode ser causado por velocidade elevada ou amortecimento incorreto. O mesmo pode ter duas formas de realização: direta ou inversa.

De forma direta significa que a rotação tanto do rotor como de seu eixo estão no mesmo sentido, já a inversa os movimentos de rotação estão em sentidos opostos o que pode causar danos que não pode ser reversíveis como vista na figura 14.

Figura 14- turbina de aeronave com danos irreversíveis, causados pelo movimento de precessão



Fonte: <http://g1.globo.com/mundo/noticia/2016/03/aviao-do-iron-maiden-sofre-acidente-no-aeroporto-de-santiago-no-chile.html>

A utiliza de pastilhas piezoelétricas como atuadores e sensores conseguem dissipar as vibrações que levam a rotação decentralizada (precessão). Os sensores que devem ser acoplados na estrutura base medem as vibrações, que são passadas para os atuadores que as dissipam.

Desta forma, a utilização da técnica *shunt damping* para controle de vibrações vem sendo muito estudado, pelo fato de ter um custo baixo referente a outras técnicas e uma boa eficiência.

REFERÊNCIAS

Yoon, S. Y. et al., ***Control of Surge in Centrifugal Compressors by Active Magnetic Bearings***, Advances in Industrial Control, DOI 10.1007/978-1-4471-4240-9_2, © Springer-Verlag London 2013

FARIA, Albert Willian ; ALVES RADE, Domingos; SANTINI , Raquel. **Formulação em elementos finitos de estruturas compostas laminadas amortecidas passivamente por shunt**. 2006. 11 p. artigo(Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

NOURI BARANGER, Thouraya et al. **Dynamic Analysis of a Rotating Composite Shaft**. 2008. 22 p.artigo (Composites Science and Technology)- Claude Bernard University Lyon 1, França, 2008. Disponível em: <<http://www.researchgate.net/publication/232709320>>. Acesso em: 03 abr. 2017.

PEREIRA, Prof José Carlos. **Introdução à dinâmica de rotores**. Florianópolis, 2005. 143p

SANTANA, Danuza Cristina. **Modelagem numérica e otimização de shunts piezelétricos aplicados ao controle passivo de vibrações** . 2007. 204 p. TESE (Doutorado em engenharia mecânica)- Universidade Federal de Umberlândia, Florianópolis, 2007. 1.

HAGOOD, N. W., e VON FLOTOW, A., 1991, “***Damping of structural vibrations with piezoelectric material and passive electrical network***”. *Journal of Sound and Vibration* 146(2), 243-268.

BEHRENS, S., e MOHEIMANI, S.O.R., 2000, “**Optimal Resistive Elements for multiple mode shunt damping of a piezoelectric laminate beam.**” *Proceeding of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, 4018-4023

SETTER, N., 2002. “**Piezoelectric Material in Devices**”. *Ceramics Laboratori, EPFL Swiss Federal Institute of Technology*. ISBN 2-9700346-0-3

CURIE, Jacques e CURIE, Pierre, 1880. “**Development, via compression, of electric polarization in hemihedral crystals with inclined faces**”. *Bulletin de la Societe de Minerologique de France*, 3:90-93

