

## MODELO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DE UM GERADOR PIEZOAEROELÁSTICO DE ENERGIA

**Marcela de Melo Anicézio, Dr. Carlos De Marqui Junior**

USP, Universidade de São Paulo, EESC, Escola de Engenharia de São Carlos, Curso de Engenharia Aeronáutica  
Avenida Trabalhador São-carlense, 400 – CEP 13560-590 – São Carlos – São Paulo  
E-mail para correspondência: marcela.anicezio@usp.br ou demarqui@sc.usp.br

### Introdução

Aeroelasticidade é uma ciência que estuda a interação entre forças inerciais, elásticas e aerodinâmicas. Dentre os fenômenos aeroelásticos dinâmicos, o *flutter* se destaca por ser um fenômeno de natureza altamente destrutiva. Ele ocorre quando uma superfície de sustentação apresenta característica oscilatória auto-excitada a partir de uma determinada velocidade de voo (velocidade crítica de *flutter*) (Bisplinghoff *et al.*, 1955). Apesar de sua natureza destrutiva, o *flutter* apresenta um grande potencial para o estudo de novos métodos para a extração de energia do escoamento e sua conversão em energia elétrica.

A conversão de energia de vibração disponível no ambiente em energia elétrica é a definição para o termo *Vibration Based Energy Harvesting*, ou geração de energia a partir de vibrações. Este conceito (*energy harvesting*) é particularmente importante para sistemas remotamente operados e com fontes limitadas de energia. A literatura recente mostra que a transdução piezoelétrica tem recebido mais atenção como mecanismo de conversão.

### Objetivos

Nesse artigo apresentam-se a verificação numérica e experimental de uma seção típica piezoaeroelasticamente acoplada com dois graus de liberdade (GDLs) para geração de energia. O objetivo é verificar o efeito da geração piezoelétrica de energia sobre o comportamento piezoaeroelástico do sistema.

### Metodologia

O carregamento aerodinâmico é obtido a partir do método de vórtices concentrados não-estacionário (Katz e Plotkin, 1994). Uma carga resistiva é considerada no domínio elétrico do problema. O acoplamento eletromecânico é inserido em um dos GDLs, modificando as equações aeroelásticas usualmente encontradas na literatura (Bisplinghoff *et al.*, 1955). As equações piezoaeroelásticas são resolvidas em espaço de estados. O efeito da variação da resistência considerada sobre a velocidade de *flutter* e a potência elétrica gerada é investigado. Os resultados numéricos são verificados a partir dos resultados experimentais.

### Resultados

É utilizada neste trabalho uma seção típica com dois GDLs (Fig. 1), definidos como um deslocamento linear  $h$  e um deslocamento angular  $\alpha$ .

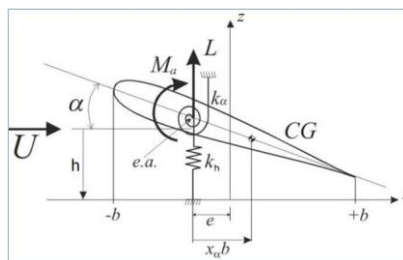


Figura 1 – Representação de uma seção típica com dois GDLs.

Essa seção típica representa um aerofólio com massa  $m$  (por unidade de comprimento), semi-corda  $b$ , momento estático  $S_\alpha$  (por unidade de comprimento) e momento de inércia  $I_\alpha$  (por unidade de comprimento) medido em torno do ponto de referência (eixo elástico) onde os deslocamentos são medidos. O movimento

desse aerofólio é restrito por duas molas com rigidez  $k_h$  e  $k_\alpha$  (por unidade de comprimento), para os GDLs de deslocamento linear e angular, respectivamente.

O acoplamento eletromecânico é incluído no GLD de deslocamento linear e uma carga resistiva considerada no circuito externo (ou circuito gerador). Consequentemente, as equações de movimento que regem o sistema são apresentadas como,

$$(m + m_e)\ddot{h} + S_\alpha\ddot{\alpha} + b_h\dot{h} + k_h h - \theta v = -L \quad (1)$$

$$S_\alpha\ddot{h} + I_\alpha\ddot{\alpha} + b_\alpha\dot{\alpha} + k_\alpha\alpha = M_\alpha \quad (2)$$

$$C_p^e\dot{v} + \frac{v}{R_l} + \theta\dot{h} = 0 \quad (3)$$

onde  $\theta$  é o acoplamento eletromecânico,  $C_p^e$  é a capacitância equivalente das camadas piezocerâmicas,  $v$  é a voltagem através da carga resistiva e  $R_l$  é a carga resistiva. Os coeficientes de amortecimento estrutural dos GDLs são representadas por  $b_h$  e  $b_\alpha$  e  $x_\alpha$  determina a distância do cg ao ponto de referência. Uma massa extra  $m_e$  foi considerada na equação de movimento de flexão, devido às fixações mecânicas que conectam a seção típica com a mola de rigidez  $k_h$  (na representação da seção típica ideal,  $m_e \neq 0$ ).

Considerando as Eq. (1), (2) e (3) em espaço de estados e aplicando a teoria de vórtices concentrados não-estacionário, a representação das equações do movimento é:

$$[A]\{\dot{x}\} = [B]\{x\} + [C]\{\Gamma\} + [D]\{\dot{\Gamma}\} \quad (4)$$

O modelo numérico é capaz de reproduzir muito bem as saídas mecânicas e elétricas do sistema experimental, sendo que a variação da potência elétrica gerada em função da carga resistiva utilizada e a variação da velocidade de *flutter* em função da velocidade de curto circuito são apresentados nas Fig. (2a) e (2b).

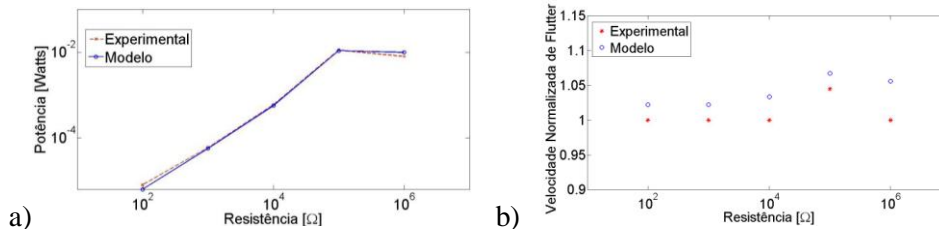


Figura 2 – a) Variação da potência numérica e experimental em função das resistências e b) Velocidade normalizada numérica e experimental em função das resistências.

## Conclusões

O modelo numérico foi verificado contra resultados experimentais com erro médio (relativamente pequenos) de  $5.96e-4$  Watts e  $0.27768$  m/s. A resistência ótima ( $100 \text{ k}\Omega$ ) forneceu a máxima potência elétrica na saída (Fig. 2a), resultando na maior velocidade de *flutter* do sistema (Fig. 2b). Mesmo no caso simplificado de uma resistência elétrica no circuito gerador é possível modificar as condições de estabilidade do sistema piezoaeroelástico. Assim, utilizando-se um circuito chaveado seria possível alternar ciclicamente entre uma resistência que induza a instabilidade (aumentando a amplitude das oscilações) e outra que permita a máxima conversão de energia e resulte na atenuação das oscilações quando o sistema estiver acima da velocidade de *flutter*.

## Agradecimentos

A autora agradece ao CNPq e à FAPEMIG pelo financiamento parcial deste trabalho, através do INCT-EIE, à FAPESP pelo apoio financeiro através do processo 2009/10637-0 e ao Prof. Dr. Carlos De Marqui Junior, orientador deste trabalho.

## Referências Bibliográficas

- Bisplinghoff, R.L., Ashley, H. & Halfman, R.L., “Aeroelasticity”, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1955.  
 Katz, J.; Plotkin, A., 1991, Low speed aerodynamics: from wing theory to panel methods. McGraw Hill, Inc.