



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

PROTÓTIPO APORTICADO FLEXÍVEL PARA CAPTAÇÃO DE ENERGIA

Alan F. de Almeida ^{*1}, Jorge Luis P. Felix ²

^{*1} Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA – Graduando

² Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA, PPEng – Orientador
Campus Alegrete - Engenharia Mecânica
Av. Tiarajú, 810, Alegrete - RS

E-mail: alan.almeida@hotmail.com.br ^{*1}, jorge.felix@unipampa.edu.br ².

RESUMO

A procura por novas fontes de energia é um dos maiores desafios da ciência e da engenharia. Uma maneira de se obter energia de forma sustentável provém da captação da energia mecânica liberada por um corpo para o meio, a fim de convertê-la em energia elétrica, um ponto importante nesta aplicação é a utilização de materiais piezelétricos para realizar esta transformação, já que estes materiais tem a capacidade de produzir energia elétrica quando forem submetidos à alteração do seu estado mecânico. Para que o protótipo proposto neste projeto gere energia elétrica é necessário considerar: (1) um material piezelétrico baseado no circuito elétrico linear; (2) uma estrutura flexível de tipo pórtico plano em escala reduzida com dois modos de vibração de frequências naturais em relação 1:2 (ressonância interna); (3) passagem de ressonância da fonte de excitação com as frequências naturais da estrutura e (4) uma fonte de excitação de tipo ideal (frequência de excitação constante) e não-ideal (frequência rotacional variável). O estudo do comportamento dinâmico e potência elétrica do sistema foram desenvolvidos com as ferramentas da dinâmica não linear e caótica no ambiente computacional MATLAB®: série temporal, e curvas de ressonância.

Palavras-chave: *Captação de Energia, Materiais Piezelétricos, Pórtico flexível, excitação ideal e não-ideal.*



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUÇÃO

A captação de energia elétrica a partir de vibrações mecânicas tem-se desenvolvido de maneira crescente para aplicações tecnológicas em escala micro e macro. Para que ocorra a captação da energia elétrica são utilizados materiais piezelétricos, cuja sua principal propriedade é a capacidade de gerar um potencial elétrico quando for submetido a alteração do seu estado mecânico. O processo de colheita de energia ficou conhecido como Energy Harvesting. Sem desmerecer os outros autores, destacam-se no uso desses materiais piezelétricos cujas características lineares são exploradas nos trabalhos de Ertuk et al. [4].

Para o estudo de sistemas vibratórios geralmente são consideradas duas fontes de excitação, as ideais consideradas como excitação harmônica de amplitude e frequência constante, e não-ideais que são consideradas de amplitude e frequência que dependem da resposta do sistema principal, essa fontes de excitação são estudadas por vários pesquisadores [5,8]. Na literatura científica a respeito, muitos autores utilizaram diversas estruturas como viga engastada, pêndulo invertido com massa no topo e entre outros que suportam materiais piezelétricos acoplados [6,7,10], recentemente, De Paula estudou a influência da excitação de um motor eletromagnético na base de um pórtico plano flexível [2].

Neste trabalho vamos utilizar um material piezelétrico de modelagem linear de acordo com o trabalho de Erturk et al. [4]. A estrutura utilizada é baseada em um pórtico com dois modos de vibração e com excitação não ideal que foi estudado por Mazzilli e Brasil [10], sem desmerecer os demais trabalhos a respeito desse tema.

2. MODELO DO SISTEMA ELETROMECHANICO

O protótipo eletromecânico idealizado em escala reduzida foi utilizado para a captação de energia elétrica a partir de fontes de excitação vertical como mostra a Figura 1. A estrutura de pórtico que suportam os piezelétricos trata-se de vigas flexíveis, cujas condições físicas e geométricas definem que os dois modos de vibrar se encontram em ressonância interna de relação 1:2 entre suas frequências naturais. Enquanto para excitação na base foi considerado um shaker eletrodinâmico com característica ideal e não-ideal. Os detalhes nas próximas seções.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

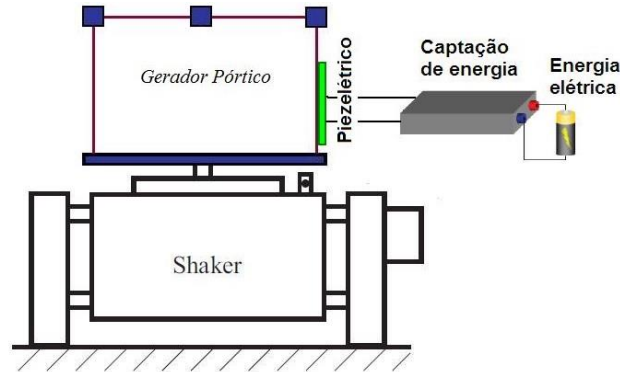


Figura 1 Protótipo do Sistema eletromecânico de Colheita de Energia.

2.1 Equações de movimento do pórtico

Segundo Mazzilli e Brasil [10], as equações de movimento são descritas pelos deslocamentos generalizados na direção horizontal $q_1 = u_1/h$ e vertical $q_2 = v_2/l$ como mostra a Figura 2.

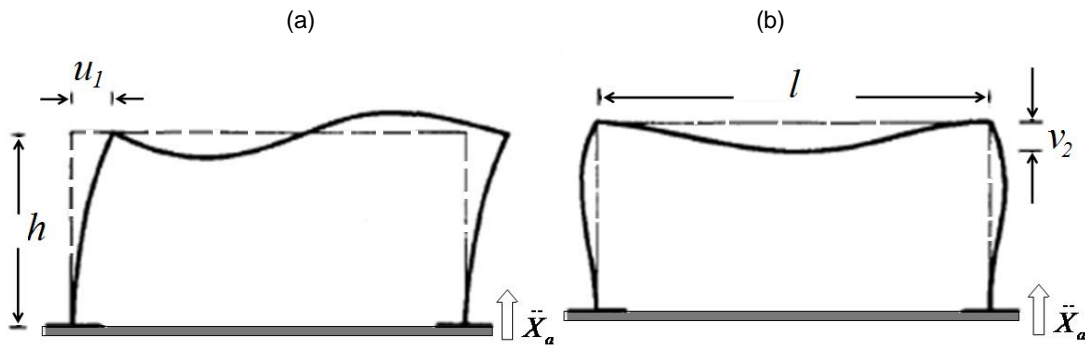


Figura 2 (a) deslocamento horizontal e (b) deslocamento vertical.

$$\ddot{q}_1 + \omega_1^2 q_1 - \frac{2mA}{2m+M} \ddot{X}_a q_1 = -\frac{\hat{\mu}_1}{(2m+M)h^2} \dot{q}_1 + \frac{k_2 A \ell}{2m+M} q_1 q_2 \quad (1)$$

$$\ddot{q}_2 + \omega_2^2 q_2 = -\frac{\ddot{X}_a}{\ell} - \frac{\hat{\mu}_2}{M \ell^2} \dot{q}_2 + \frac{k_2 A h^2}{2M \ell} q_1^2 \quad (2)$$



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Onde: ω_1 e ω_2 , são as frequências naturais da estrutura pórtico, \ddot{X}_a é a fonte de excitação na base, ℓ é o comprimento horizontal do pórtico e h é a altura da coluna, m é a massa de cada uma das barras verticais, M é a massa da barra horizontal, k_2 um coeficiente de rigidez, $\hat{\mu}_1$ e $\hat{\mu}_2$ são coeficientes de amortecimento viscoso e o coeficiente A define o campo de deslocamento axial. A relação de frequências para que ocorra ressonância interna é de relação 1:2, define-se $\omega_2 \approx 2\omega_1$. A definição dos parâmetros das equações (1) e (2) são estabelecidas por Mazzilli e Brasil [10].

2.2 Equação da Voltagem produzida pelo piezelétrico linear

A modelagem do circuito e do material piezelétrico foi aproximada por Erturk et al. [4]:

$$\dot{Q} + \frac{1}{RC_p} Q + \frac{\theta}{C_p} \dot{q}_1 = 0 \quad (3)$$

Onde: Q é a tensão adimensional determinada através da resistência da carga do piezelétrico, C_p define um capacitor, R define um resistor e θ é o acoplamento eletromecânico.

2.3 Fontes de excitação consideradas para o sistema

Neste trabalho foram consideradas duas formas de excitação, uma do tipo ideal conhecida na literatura como excitação harmônica e a outra que simula a excitação não-ideal fornecida por um shaker eletrodinâmico, conhecida na literatura atual como excitação não-ideal de amplitude e frequência variável.

Fonte de excitação ideal expressa na equação (4), conhecida como excitação harmônica, possui frequência ω e amplitude F_0 constantes:

$$\ddot{X}_a = F_0 \cos \omega t \quad (4)$$

A modelagem da excitação não-ideal trata-se de uma equação dinâmica de um motor elétrico com interação dinâmica do sistema que suporta este motor segundo Kononenko [8] e recentemente pelo professor Palacios Felix [5]. Pela experiência do orientador teve-se a conclusão de definir da seguinte forma expressa na equação (5):



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

$$\ddot{X}_a = F_o \cos(\omega t - a_0 \cos(b_0 \omega t)) \quad (5)$$

Onde: F_o é a amplitude e ω é a frequência angular. Sendo a_0 e b_0 constantes.

2.4 Modelagem do Sistema de Colheita de Energia

As equações de movimento do sistema eletromecânico propostas aqui são similares as do pórtico plano excitado na base de Mazzilli e Brasil [10] e do piezelétrico-circuito do modelo de Erturk et al. [4]. Três modelos de captação de energia são propostos da seguinte forma: primeiro, o piezelétrico é acoplado na coluna do pórtico de deslocamento q_1 . Segundo, o piezelétrico é acoplado na viga horizontal de deslocamento q_2 . Terceiro, dois piezelétricos são acoplados simultaneamente nas vigas da coluna e na viga horizontal.

As equações são definidas adimensionalmente onde as derivadas são definidas em relação ao tempo adimensional $\tau = \omega t$, as equações (6), (7) e (8) apresentam respectivamente o acoplamento para dois piezelétricos no sistema, onde na equação (6) o termo (χQ) representa o acoplamento de um piezelétrico na viga vertical, e para a equação (7) o mesmo representa o acoplamento na viga horizontal, o termo ($\kappa \dot{q}_1 + \kappa \dot{q}_2$) na equação (8) da voltagem do circuito piezelétrico representa os dois piezelétricos acoplados no sistema.

$$\ddot{q}_1 + \omega_1^2 q_1 - \alpha_1 \ddot{X}_a q_1 - \chi Q = -\mu_1 \dot{q}_1 + \gamma_1 q_1 q_2 \quad (6)$$

$$\ddot{q}_2 + \omega_2^2 q_2 - \chi Q = -\alpha_2 \ddot{X}_a - \mu_2 \dot{q}_2 + \gamma_2 q_1^2 \quad (7)$$

$$\dot{Q} + \lambda Q + \kappa \dot{q}_1 + \kappa \dot{q}_2 = 0 \quad (8)$$

Os parâmetros adimensionais são definidos por: $\alpha_1 = \frac{2mA}{2m+M}$, $\alpha_2 = \frac{1}{\ell}$, $\mu_1 = \frac{\hat{\mu}_1}{(2m+M)h^2}$,

$$\mu_2 = \frac{\hat{\mu}_2}{M\ell^2}, \gamma_1 = \frac{k_2 A \ell}{2m+M}, \gamma_2 = \frac{k_2 A h^2}{2M\ell}, \lambda = \frac{1}{RC_p}, \kappa = \frac{\theta}{C_p}, \chi = \frac{\theta}{m}.$$



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

3. RESULTADOS

Para realizar as simulações numéricas é necessário reduzir as equações de segunda ordem a primeira ordem, a fim de usar o comando ode23 e aplicando assim algoritmo de integração de Runge-Kutta com passo de integração variável no software MATLAB®.

Determina-se uma mudança de variáveis onde: $x_1 = q_1$ $x_2 = \dot{q}_1$ $x_3 = q_2$ $x_4 = \dot{q}_2$ $x_5 = Q$.

A partir das novas variáveis reescrevem-se as equações da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\omega_1^2 x_1 + \alpha_1 \ddot{X}_a x_1 + \chi x_5 - \mu_1 x_2 + \gamma_1 x_1 x_3 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= -\omega_2^2 x_3 + \chi x_5 - \alpha_2 \ddot{X}_a - \mu_2 x_4 + \gamma_2 x_1^2 \\ \dot{x}_5 &= -\lambda x_5 - \kappa x_2 - \kappa x_4 \end{aligned} \quad (9)$$

3.1. Análise dinâmica do sistema

Para as simulações numéricas foram utilizados os seguintes valores dos parâmetros adimensionais como mostra na Tabela 1, os mesmos foram adotados com base nas propriedades geométricas da seção e em trabalhos da área para parâmetros constantes definidos em [4,10]. Foram considerados as seguintes condições iniciais em todas as simulações numéricas $q_1 = 0.1$, $\dot{q}_1 = 0$, $q_2 = 0.1$, $\dot{q}_2 = 0$, $Q = 0$.

Tabela 1 Parâmetros adimensionais estabelecidos.

μ_1	0.02	γ_1	0.30	λ	0.01	α_1	1.00	ω_1	1.00	χ	0.05	a_0	2.0
μ_2	0.02	γ_2	0.40	κ	0.50	α_2	1.00	ω_2	2.00	F_0	0.20	b_0	0.01

Caso I: Considerou-se a excitação ideal

Os resultados mostram que as amplitudes de oscilação no estado permanente de q_1 são maiores que em q_2 , assim o desempenho do sistema será mais eficiente neste acoplamento, porém se



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

forem acoplados dois piezelétricos em q_1 e q_2 o desempenho será ainda melhor, considerando que serão acoplados dois piezelétricos. A Figura 4 mostra o desenvolvimento do sistema eletromecânico quando o piezelétrico foi acoplado na coluna do pórtico q_1 , na equação (1). A frequência de excitação ideal para todos os acoplamentos foram de $\omega = 2.1$.

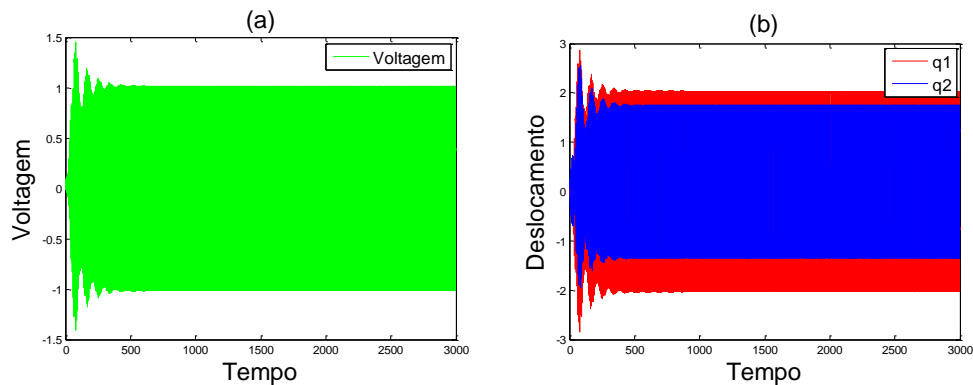


Figura 4 Histórico no domínio do tempo: (a) da voltagem; (b) do pórtico.

A Figura 5 mostra o desenvolvimento do sistema eletromecânico quando o piezelétrico foi acoplado na viga horizontal do pórtico q_2 , na equação (7)

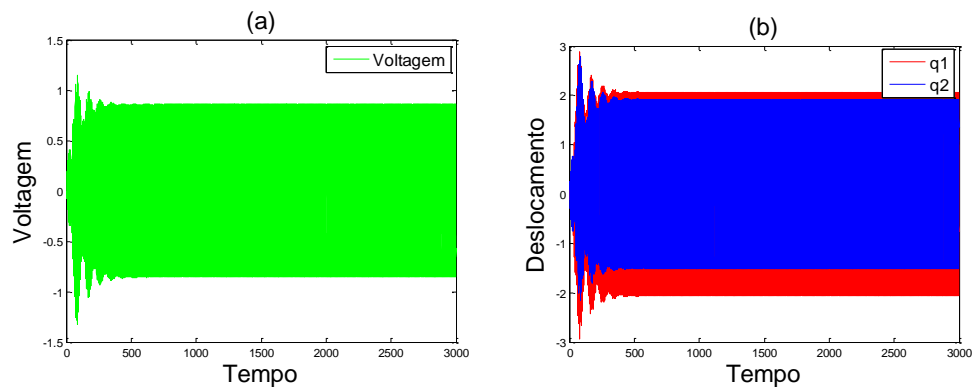


Figura 5 Histórico no domínio do tempo: (a) da voltagem; (b) do pórtico.

A Figura 6 mostra o desenvolvimento do sistema eletromecânico quando dois piezelétricos foram acoplados na coluna e viga horizontal do pórtico (q_1, q_2), nas equações (6) e (7).



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

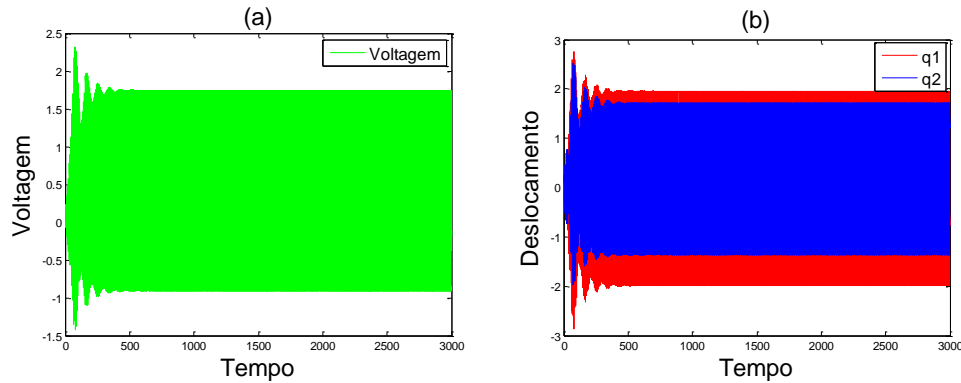


Figura 6 Histórico no domínio do tempo: (a) da voltagem; (b) do pórtico.

As Figuras 7-8 mostram o desenvolvimento do sistema eletromecânico, através de curvas de ressonância das amplitudes no estado permanente versus a variação da frequência de excitação no intervalo $1.5 \leq \omega \leq 2.5$ que abrange a passagem pela região de ressonância. A excitação atuando diretamente com a frequência natural ω_2 e com a frequência de ressonância interna acontece o fenômeno de saturação (a transferência de energia da viga horizontal é transferida para a coluna): as amplitudes de oscilação da viga horizontal são maiores que as amplitudes de oscilação da coluna fora da região de ressonância. Quando o sistema entra na região de ressonância, as amplitudes de oscilação da coluna são maiores que as amplitudes de oscilação da viga horizontal. A seguir analisamos o desempenho da voltagem na ressonância. A amplitude máxima para a voltagem na Figura 7(a) mostra que o valor aproximado de 1.5, na Figura 7(b) mostra 1.2 e na Figura 9 mostra o valor aproximado de 2.5. Podemos concluir que o melhor desempenho da voltagem estaria na consideração de dois piezelétricos no pórtico.

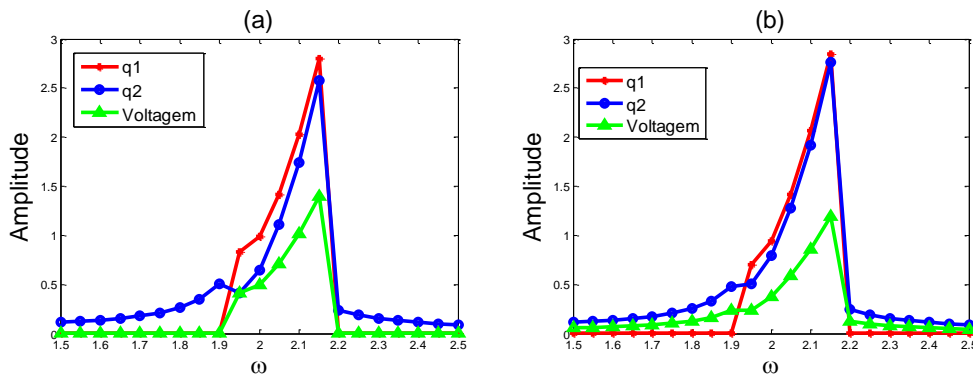


Figura 7 Respostas para o Piezelétrico: (a) acoplado na coluna q_1 , (b) na viga horizontal q_2 .

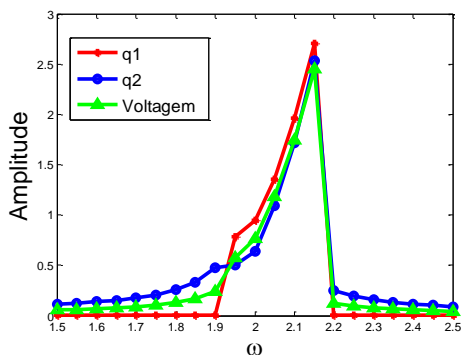


Figura 8 Respostas para Piezelétricos acoplados na coluna e viga horizontal (q_1, q_2).

Caso II: Considerou-se a excitação não-ideal

Analisando os dados obtidos no caso I, é possível concluir que o melhor desempenho do sistema se dá através do acoplamento de dois piezelétricos no pórtico, dessa forma foi analisado o acoplamento de dois piezelétricos no pórtico para um sistema não-ideal, com frequência variável. A Figura 9 mostra o desenvolvimento do sistema eletromecânico quando dois piezelétricos são acoplados na coluna e viga horizontal do pórtico (q_1, q_2). A Figura 10 mostra que as amplitudes em q_1 e q_2 no estado permanente são maiores que no caso ideal, dessa forma o desempenho da voltagem será mais eficiente para o caso não-ideal.

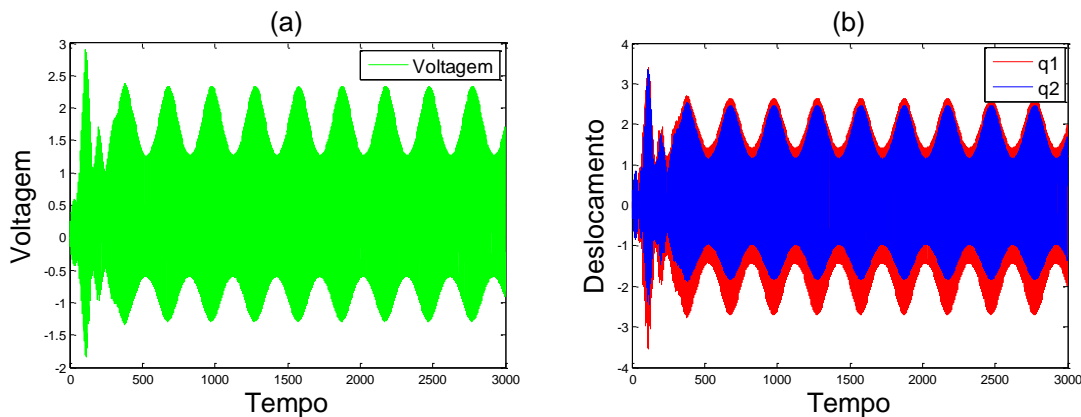


Figura 9 Histórico no domínio do tempo: (a) da voltagem; (b) do pórtico, (Caso não Ideal).



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

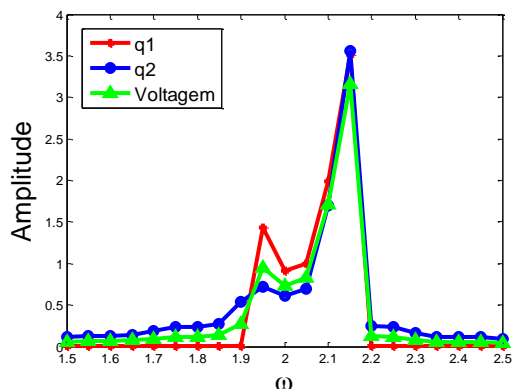


Figura 10 - Respostas para Piezelétricos acoplados na coluna e viga horizontal (q_1, q_2).

4. CONCLUSÃO

Observando os casos I e II descritos neste trabalho, é possível comparar que o melhor desempenho do sistema eletromecânico sobre captação de energia, seria acoplar dois piezelétricos no pórtico e com excitação na base de forma não-ideal. Finalmente foram comparados os resultados em relação a voltagem chegando a concluir que com a excitação não-ideal teve melhor desempenho como mostra a Figura 11.

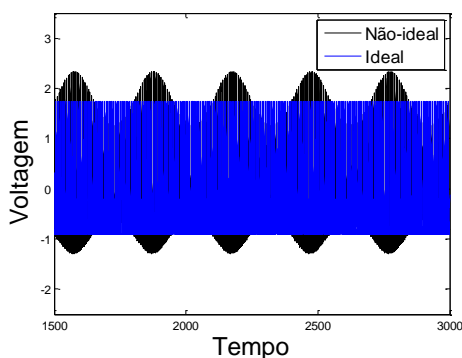


Figura 11 Respostas da Voltagem caso ideal e não-ideal.

Para trabalhos futuros serão considerado as equações de movimento de um shaker eletrodinâmico, como o descrito no trabalho para realizar a função da excitação não-ideal.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

5. REFERÊNCIAS

- [1] Brasil, R.M.F.L, and Balthazar J.M., 2000, "Nonlinear Oscillations of a Portal Frame Structure Excited by a Non-ideal Motor, Proceedings of 2000 2nd International Conference- Control of Oscillations and Chaos, Edited by F.L. Chernousko, A. L. Fradlov, Volume 2 of 3, St. Petersburg, Russia, pp. 275-278.
- [2] De Paula, Aline S.; Balthazar, J.M.; Palacios-Felix, J.L. "Some Comments on the Nonlinear Dynamics of a Portal Frame under Base Excitation. Shock and Vibration", Volume 20 (2013), Issue 6, Pages 1093-1101.
- [3] De Paula, Aline S. J.M. Balthazar and J.L.P. Felix, "Nonlinear dynamics of a flexible portal frame under support excitation", in: Proceedings of the ICNPAA – World Congress: 9th International Conference on Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Science, Vienna, Austria (Jul 2012) American Institute of Physics.
- [4] Erturk, A.; HOFFMANN, J.; INMAN, D. J. A piezomagnetoelastic structure for broadband vibration energy harvesting. Applied Physics Letters, v. 94, n. 25, p. 254102-254102-3, 2009.
- [5] Felix, J.L.P., Teoria de Sistemas Vibratórios Aporticados Não-lineares e Não-Ideais, Tese de Doutorado – UNICAMP, 2002.
- [6] Felix, JLP, Balthazar, JM, Brasil, RMLRF, 2002, "On nonideal and Nonlinear Portal Frame Dynamic analysis: using Bogoliubov perturbation method", RBCM-J. of the Brazilian Society of Mechanical Systems, Vol. XXIV, No 4, pp. 257-265.
- [7] Felix, J.L.P., Balthazar, J.M., Brasil, R.M.L.R.F., 2005, "On saturation control of a non-ideal vibrating portal frame foundation type shear-building", Journal of Vibration and Control, 11, pp. 121-136.
- [8] Kononenko, V. O., 1969, "Vibrating problems of limited power supply", Iliffe Books.
- [9] Litak, Grzegorz et al. Energy harvesting by two magnetopiezoelectric oscillators with mistuning. Theoretical and Applied Mechanics Letters, v. 2, n. 4, p. 043009, 2012.
- [10] Mazzilli, C.E.N. and Brasil, R.M.L.R.F., 1995, "Effect of static loading on the nonlinear vibrations of a three-time redundant portal frame: analytical and numerical studies", Nonlinear Dynamics, Vol.8, pp. 347-366.

Agradecimentos

Os autores agradecem pelo apoio financeiro ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.