

Recibido: 08 de septiembre de 2015  
Aceptado: 25 de octubre de 2015**SISTEMA DE CONTROL ACTIVO RESONANTE INTEGRAL PARA  
VIBRACIONES EN UNA VIGA EN VOLADIZO****ACTIVE CONTROL SYSTEM FOR RESONANT VIBRATIONS IN AN  
INTEGRAL CANTILEVER****PhD. Francisco Ernesto Moreno García, Ing. John Jairo Ramírez Mateus,  
Ing. José Alejandro Cárdenas Lindarte.****Universidad de Francisco de Paula Santander.**Cúcuta, Norte de Santander. Tel.: (+577)-5776655, Fax: (+577) 5776655, Ext. 202.  
E-mail: {femgarcia, jhonjairorm, josealejandrocl}@ufps.edu.co

**Resumen:** El presente trabajo se implementa un controlador resonante integral para la atenuación del primer modo de vibración de una estructura flexible tipo viga en voladizo. El controlador se implementa mediante un circuito electrónico analógico y se utilizan actuadores piezoeléctricos. Se presenta el proceso de acondicionamiento de la señal de aceleración utilizada, la sintonización del controlador y finalmente se exponen los resultados obtenidos experimentalmente, donde se observa una disminución en el tiempo de estabilización superior al 50% con respecto al tiempo del sistema no controlado.

**Palabras clave:** Control resonante, viga en voladizo, control activo de vibraciones.

**Abstract:** In this job is implemented an integral resonant controller to attenuate the first vibration mode of a flexible structure type cantilever. The controller is implemented using an analog electronic circuit and use piezoelectric actuators. It presents the signal conditioning used, the tuning of the controller and finally it exposes the results obtained experimentally, where it can be seen a reduction in the stabilization time above 50% with respect to the non controlled system.

**Keywords:** Resonant control, cantilever, active vibration control.

**1. INTRODUCCIÓN**

La presencia de vibraciones indeseadas en estructuras tipo viga es uno de los problemas que más impacta de manera negativa en el correcto funcionamiento de estas, llegando incluso a generar inestabilidad si no se controla de manera oportuna. Este trabajo se centra en el estudio y la implementación de un sistema de control activo para las vibraciones en una estructura tipo viga en voladizo llamado Control Resonante Integral (CRI), altamente eficiente en la estabilización de sistemas poco amortiguados.

El CRI ha sido propuesto en la última década como una alternativa sencilla, económica y eficiente para el control de vibraciones en sistemas flexibles. Dicho controlador es esencialmente un sistema de control clásico integral con retroalimentación positiva y pérdidas (Moheimani et al., 2003) y (Moheimani y Fleming, 2006). Dentro de sus principales ventajas pueden resaltarse su impacto sobre los primeros modos de vibración, y su relativa simplicidad en comparación con sistemas de control moderno. El hecho de presentar una buena controlabilidad sobre múltiples modos de vibración permite conseguir respuestas más rápidas y una mayor estabilidad en el sistema.

Una exposición a nivel conceptual y su desarrollo incluyendo el diseño y la sintonización del controlador se presenta a continuación, todo validado mediante la presentación de resultados experimentales.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1 Concepto de vibraciones

El movimiento vibratorio se define como la variación de un sistema en el tiempo respecto a su posición de equilibrio estable; dicha variación es de naturaleza periódica y presenta gran similitud con el Movimiento Armónico Simple (MAS), por lo cual se suele usar este último como primera aproximación para abordar el estudio del control de vibraciones (Lafita & Mata, 1968).

En la práctica se suelen confundir las oscilaciones en un sistema con las vibraciones. Aunque las dos hacen referencia a la variación de un sistema con respecto a su punto de equilibrio estable, las oscilaciones implican un intercambio de energía potencial gravitatoria con energía cinética, mientras que las vibraciones se presentan como producto de la conversión entre energía potencial elástica y energía cinética (Pallares & Rodriguez, 2010).

### 2.2 Vibraciones forzadas y libres

Con respecto al origen de las vibraciones, pueden clasificarse obedeciendo a si la causa que genera el movimiento es externa al sistema o es producto del movimiento éste mismo. En cualquiera de los dos casos, las vibraciones son un fenómeno que debe ser atenuado en la medida en que el proceso dentro del que se encuentra el sistema lo exija.

Cuando las vibraciones del sistema se deben a fenómenos externos que no hacen parte de la dinámica de éste, se denominan vibraciones forzadas. En la medida en que se genere movimiento vibratorio a frecuencias que puedan llegar a coincidir con alguna frecuencia natural de la estructura, se puede llegar a presentar resonancia. Una estructura que entre en resonancia exhibe movimientos de gran amplitud asociados con grandes cantidades de energía que pueden llegar a ser peligrosas.

Si el movimiento vibratorio se debe a la acción de fuerzas ejercidas por el mismo sistema, se dice que las vibraciones son libres. Éste tipo de vibraciones

se presentan en frecuencias específicas que corresponden con los modos de vibración de la estructura.

## 3. BANCO DE PRUEBAS EXPERIMENTAL

El trabajo se realizó sobre la barra metálica flexible de tipo viga en voladizo mostrada en la figura 1. La estructura está compuesta por una base sobre la cual se monta la barra instrumentada con un acelerómetro capacitivo MMA7361 como sensor ubicado en el extremo libre de la viga y un actuador piezoeléctrico QP21B sujeto al extremo fijo de ésta para controlar el primer modo de vibración.

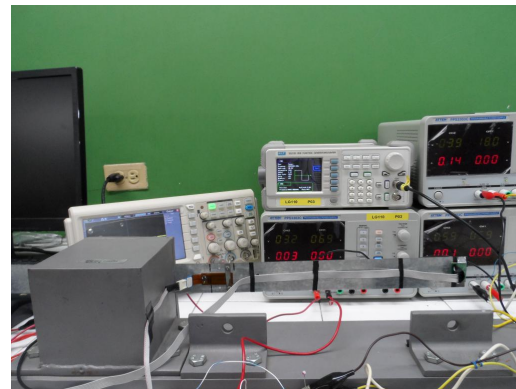


Fig. 1. Banco para experimentos.

### 3.1 Etapa de potencia

Como etapa de potencia para el manejo del actuador QP21b se utilizó un driver para actuadores piezoeléctricos de referencia PDU100b. Dicho driver tiene una ganancia de 27.5 V/V pudiendo entregar a la salida hasta 100V pico de señales en un amplio rango de frecuencias. El driver tiene la capacidad de manejar hasta 4 actuadores piezoeléctricos y no requiere ningún tipo de instrumentación para ser utilizado.

### 3.2 Acondicionamiento de la señal

La instrumentación electrónica necesaria para el correcto acondicionamiento de las señales del sensor y del controlador se implementó mediante un sistema electrónico analógico basado en amplificadores operacionales y elementos pasivos discretos.

El sistema de acondicionamiento de señal está compuesto por cuatro etapas: 1) Etapa de acople, 2) etapa de reducción de *offset*, 3) etapa de amplificación y 4) etapa de filtrado.

La figura 2 muestra el comportamiento de la señal de aceleración del sistema sin una correcta implementación del bloque de instrumentación, mientras que la figura 4 es la señal de aceleración correctamente instrumentada. En la figura 2 se evidencia que dicha señal no está correctamente filtrada y no es susceptible de ser usada dentro del bloque de control. Como se puede observar, la presencia de una enorme cantidad de frecuencias inútiles introducidas por el acelerómetro exige una etapa de filtrado de orden superior, pues no es suficiente con eliminar las componentes de más alta frecuencia si se presentan también algunas frecuencias relativamente cercanas a la frecuencia natural de vibración de la viga. En la figura 3 se presenta la etapa de filtrado, implementada mediante un filtro Sallen-Key pasabajas de 4 orden. Una discusión acerca del diseño de dicho circuito se muestra en [10].

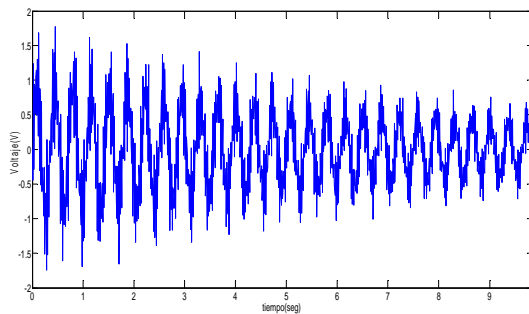


Fig. 2. Señal de aceleración sin filtrar.

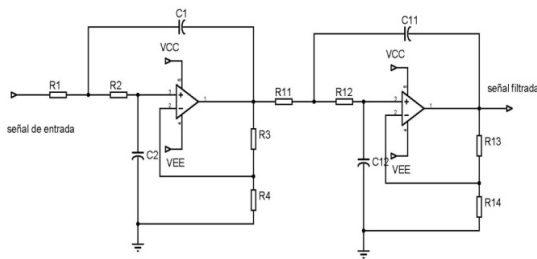


Fig. 3. Diagrama circuito de filtrado.

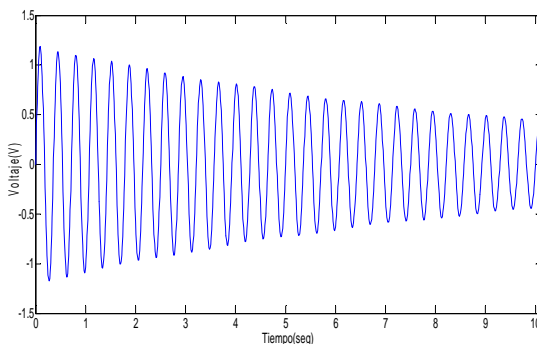


Fig. 4. Señal de aceleración filtrada y acondicionada.

Finalmente, la figura 5 muestra la respuesta libre de la viga a una perturbación de tipo impulso. Un análisis del espectro de frecuencias mostrado en la figura 6 permite determinar la frecuencia natural de la viga como 2.77 Hz.

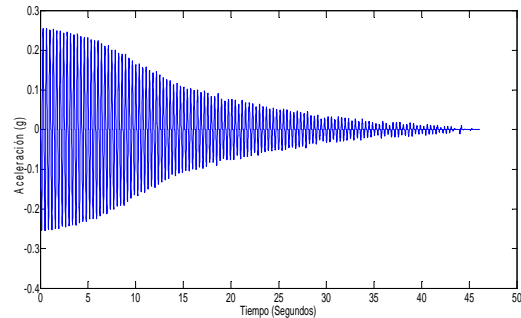


Fig. 5. Respuesta libre de la viga.

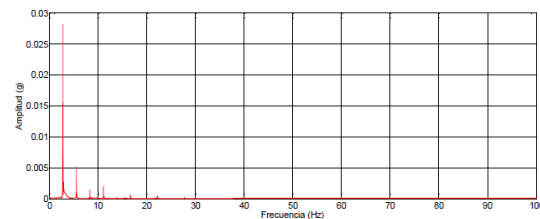


Fig. 6. Espectro de frecuencia de la señal de respuesta libre de la figura 5.

#### 4. CONTROLADOR ACTIVO DE VIBRACIONES

##### 4.1 Modelo matemático de la viga

Un sistema vibratorio presenta varios modos de vibración que se modelan como distintas frecuencias naturales de resonancia, es decir, múltiples frecuencias a las cuales la viga vibra libremente ante una perturbación. De esta forma, la función de transferencia de una estructura tipo viga en voladizo está compuesta por la sumatoria de las funciones que describen el comportamiento de cada uno de los modos de vibración, como se muestra en la ecuación (1).

$$G_s = \sum_{i=1}^N \frac{a}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2} \quad (1)$$

Donde cada uno de los términos de la sumatoria corresponde con cada uno de los modos de vibración de la estructura. Entonces, si lo se pretende modelar el primer modo de vibración se tiene una función de la forma descrita en la ecuación (2).

$$G_s = \frac{K}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2} + D \quad (2)$$

Donde la función de transferencia estándar de segundo orden corresponde con el modelo matemático de la dinámica del primer modo de vibración de la viga, y el término  $D$  describe el comportamiento a bajas frecuencias de los modos de vibración de orden superior que fueron truncados. La ecuación (3) corresponde con el modelo de la viga sobre la cual se realizó el trabajo para el primer modo de vibración.

$$H = \frac{s^2 + 0.2054s + 234.1}{s^2 + 0.2234s + 306.6} \quad (3)$$

#### 4.2. Estrategia de control resonante integral

La estrategia de control activo resonante integral (CRI) ha sido desarrollada con el fin de controlar sistemas muy flexibles, los cuales se caracterizan por presentar niveles de amortiguamiento bajos.

El CRI es en un controlador basado en la acción de control integral con un bloque de realimentación positivo. Dado que el control integral por su naturaleza presenta el inconveniente de tener una alta sensibilidad a niveles constantes en las señales de control (niveles DC u *offset*), para el CRI se propone como alternativa la introducción de pérdidas al bloque integral para evitar su saturación producto de niveles offset presentes en las señales del sistema (Aphale, *et. al*, 2007). Como resultado de la adición de pérdidas al bloque de control integral, para el CRI se tiene una función de transferencia de la forma mostrada en la ecu. (4).

$$C = \frac{K_c}{s + K_c D_f} \quad (4)$$

Donde se evidencia que la sintonización del controlador se lleva a cabo mediante la escogencia de los parámetros  $K_c$  y  $D_f$ . La figura (7) muestra el diagrama del circuito en el que se implementa el controlador.

#### 4.2 Sintonización del controlador

Como se mencionó, la sintonización del controlador se consigue seleccionando los valores de  $D_f$  y  $K_c$  adecuadamente. Para esto, se propone en [Moheimani] ajustar primero el valor de  $D_f$  evaluando la función de transferencia obtenida, mediante  $D_f < -H_0$ .

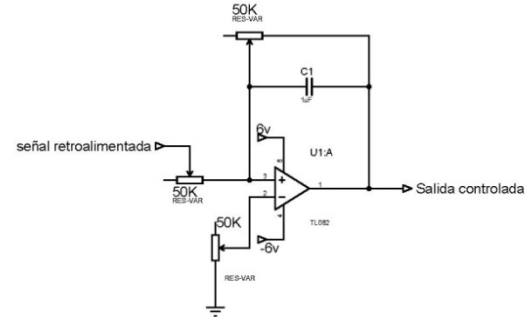


Fig. 7. Respuesta libre de la viga

Una vez evaluada la función de transferencia y obtenido el valor crítico de  $D_f$ , se selecciona éste comenzando en un valor cercano a  $H_0$  y menor, lo cual cambia la estructura polo cero del sistema haciendo que el cero que está ubicado entre el origen y el primer par de polos se acerque a estos últimos. Es importante escoger  $D_f$  de manera que no ubique el cero tan cerca de estos polos pues esto afecta el comportamiento de la acción de control integral. Así, teniendo esto en cuenta se obtuvo  $D_f = -0.8$  y  $K_c = -14.8$ , con lo cual se tiene la función de transferencia para el controlador CRI mostrada en la ecuación (5).

$$C = \frac{-14.8}{s + 11.84} \quad (5)$$

Para conseguir un alto grado de exactitud se emplearon resistores variables de precisión en el circuito analógico del controlador.

### 5. RESULTADOS OBTENIDOS

En la figura (8) se muestra la respuesta del sistema controlado a una perturbación de tipo impulso. Como se observa, el tiempo de asentamiento es de aproximadamente 15 segundos, a diferencia del tiempo de estabilización del sistema no controlado que era de aproximadamente 40 segundos.

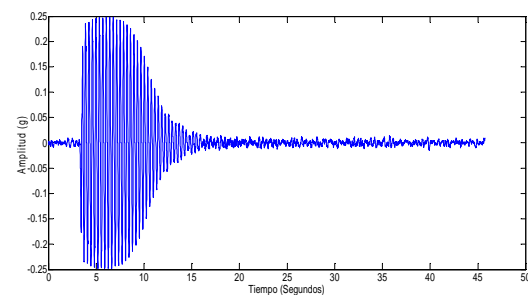


Fig. 8. Respuesta del sistema controlado.

## 5. CONCLUSIONES

El resultado más relevante de éste trabajo es el alto nivel de atenuación conseguido mediante la implementación del CRI para el primer modo de vibración de la viga, pasando de un tiempo de estabilización de casi 40 segundos para el sistema no controlado a uno de aproximadamente 15 segundos para el sistema controlado, lo cual es una mejora de las características vibratorias de la viga superior al 50%.

El CRI es adecuado para controlar incluso hasta ocho modos de vibración de la estructura vibratoria, para lo cual deben usarse múltiples actuadores ubicados a lo largo de la viga. Una discusión acerca de la controlabilidad modal y de la eficacia del CRI en la atenuación de modos de vibración superiores puede encontrarse en (Moheimani & Ryall).

## REFERENCIAS

- Aphale, S. S., Fleming, A. J., & Moheimani, S. (2007). Integral resonant control of collocated smart structures. *Smart Material and Structures*, 439-446.
- Chopra, I. (2002). Review of state-of-art of smart structure and integrated systems. *AIAA Journal*.
- FEI, J. Active Vibration Control of Flexible Steel Cantilever Beam Using Piezoelectric Actuators. *System Theory, 2005. SSST '05. Proceedings of the Thirty-Seventh Southeastern Symposium on*, pp 35-39.
- Hambley, A. *Electrónica*. Ed. Pearson Education, Madrid 2001.
- Lafita, F.; Mata, H. *Introducción a la teoría de vibraciones mecánicas*. Ed labor. 1968.
- Moheimani S.; Fleming, A. *Piezoelectric transducers for vibration control and damping*. Ed Springer Verlag, 2006.
- Moheimani S.; Ryall, T. *Considerations on placement of piezoceramic actuators that are used in structural vibration control*. Proceedings of the 38th IEEE Conference. 1999. Vol 2.
- Moheimani, S. O. R; Fleming, A. J. *Piezoelectric transducers for vibration control and damping*. 2006. 256p. Ed. Springer Verlag, London Limited.
- Moreno G. F. E.; Becerra V. J. A; Cardenas C. E. M. *Implementación de una estrategia fuzzy adaptativa para el control activo de vigas vibratorias*. Revista Facultad de Ingeniería UPTC. 2014, vol. 23, no. 36.
- Pallares M. Myriam R.; Rodríguez C. Wilson. *Modeling of forced vibration phenomenon by making an electrical analogy with ANSYS finite element software*. Revista Ingeniería e Investigación, [S.l.], v. 29, No. 1.
- Pereira, E. *Mejora del Control de Vibraciones en Estructuras Flexibles Tipo Viga mediante la utilización de propiedades mecánicas*. Tesis Doctoral. Universidad de castilla-la mancha. España, 2009.