

Implementación y Prueba de un Subsistema de Análisis de Vibraciones para la Integración de un Banco Experimental en Robótica Flexible

Implementation and Testing of a Subsystem of Vibration Analysis for the Integration of an Experimental Bench in Flexible Robotics

M.C. Mario Salvador Esparza-González¹, Ing. Manuel Alejandro Ramírez-Delgado¹,
 Dr. Carlos Humberto Saucedo- Zarate², M.C. Luis Antonio Castañeda-Ramos¹, Dr. Carlos Sánchez-López².
 Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Eléctrica- Electrónica¹,
 Departamento de Ingeniería Mecánica²
 Av. Adolfo López Mateos No. 1801 Ote. Fracc. Bona Gens, Aguascalientes, Ags., México. C.P. 20256,
 Tel: 01(449) 9105002, Fax: 01 (449) 9700423, msespa@ieee.org

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo de variables físicas como temperatura, deflexión y aceleración para eslabones de robot flexibles. Se muestra el análisis de un eslabón bajo diferentes condiciones de carga estática en un rango de 0 a 39.22N, y la respuesta al impulso cuando se libera repentinamente la carga. En el experimento con el sistema diseñado se obtienen 3 lecturas de aceleración, una de deformación y una de temperatura a una frecuencia de muestreo de 50 kHz. La información es procesada mediante transformada rápida de Fourier, obteniendo la frecuencia de oscilación en el eslabón 54.3 Hz, un tiempo de amortiguamiento entre 1.2098 y 1.2107 s, y una variación de la temperatura ambiente de 1.085°C entre las pruebas. Se concluyó que la frecuencia de oscilación es independiente de la carga y que existe una correlación entre la amplitud de la deformación y la aceleración en el eje Z.

Palabras clave: robot flexible, movimiento subamortiguado, galga extensométrica, acelerómetro.

Abstract

This paper presents the development of a system for monitoring of physical variables such as temperature, deflection and acceleration for flexible robot links. A link analysis under different conditions of static load is displayed in a range of 0 to 39.22 N, and the impulse response when the load is suddenly released. In the experiment designed with three readings system acceleration, strain and temperature at a sampling frequency of 50 kHz is obtained. The information is processed by fast Fourier transform, obtaining the oscillation frequency of 54.3 Hz in the link, a time fallbetween 1.2098 and 1.2107 s , and a variation of

the ambient temperature of 1.085 ° C between tests. It was concluded that the frequency of oscillation is independent of the load and a correlation between strain amplitude and acceleration in the Z axis.

Key words: flexible robot, underdamped motion, strain gage, accelerometer.

Introducción

Actualmente la robótica flexible juega un papel muy importante en el desarrollo tecnológico. Una de las tendencias es reducir las dimensiones y pesos de robot manipuladores para diferentes aplicaciones; una solución es utilizar robot flexibles [1], llamados así por ser contruidos de eslabones esbeltos [1]. Las investigaciones y aplicaciones en el área buscan mejoras en la estabilidad, exactitud, y balanceo del robot [2-6]. La cadena cinemática de un robot presenta durante su operación, vibraciones y deformaciones que pueden modificar la posición del efector final, ocasionando que éste no llegue a su objetivo con la exactitud deseada [2]. Otros inconvenientes importantes que pueden presentarse son la inestabilidad en el giro y el balanceo dinámico del robot [3]. Los parámetros involucrados en los sistemas de control para la solución de estos problemas se basan en la medición de la aceleración que permite obtener medidas aproximadas de la deflexión [1] y la deformación que está directamente relacionada con el movimiento del eslabón. Los sensores empleados en los sistemas de evaluación de algoritmos de control de robot flexibles son principalmente el acelerómetro y la galga extensométrica [1-8]. En [7] emplean adicionalmente un codificador óptico (*encoder*) para medir la velocidad sobre un eje.

El objetivo del sistema de monitoreo es evaluar las variables físicas involucradas (deflexión, deformación, aceleración, y temperatura) durante la operación de una cadena cinemática flexible, para estar en condiciones de corregir y/o considerar sus efectos en la dinámica del robot. Para evaluar su funcionamiento, se realiza el análisis de un eslabón de aluminio en dos situaciones: (1) en reposo, donde se mide la deflexión, deformación e inclinación ocasionadas por una carga; y (2) cuando oscila, al liberarse dicha carga, midiéndose el tiempo en que la barra vuelve al reposo, así como su frecuencia de oscilación. En [8] se describe el banco experimental de robótica flexible al que se adiciona el módulo de medición de aceleración que se detalla en este artículo, con la finalidad de analizar el efecto de la aceleración en la estabilidad y la precisión del posicionamiento de robots flexibles, permitiendo implementar y/o comprobar diversas técnicas de control [4-6]. El sistema cuenta con una tarjeta de 4 canales para medición de aceleración. Tres de éstos canales se pueden implementar para medir la aceleración (lineal o angular) en el efector final. El otro canal puede medir la aceleración en el eje principal de una articulación tipo revoluta. (Ver Figura 1).

Fundamentos teóricos

Un brazo de robot flexible durante el movimiento sufre flexiones que crean microdeformaciones; estas son adimensionales y se obtienen de la relación entre el cambio de la longitud de la barra y su longitud inicial. Éstas son ocasionadas por esfuerzos mecánicos principalmente y/o por esfuerzos térmicos, estos últimos son despreciables para temperaturas ambiente en la mayoría de las aplicaciones industriales (por ejemplo la automotriz), salvo en aplicaciones de alta temperatura (ambientes de hornos y fundición) donde tendría que verificarse si su contribución a la deformación total fuese significativa.

La deformación se define en [9] por:

$$\mu\varepsilon = \Delta l_Y / l_0 \quad (1)$$

donde: $\mu\varepsilon$ son las microdeformaciones, Δl_Y es el cambio en la longitud de la barra en el eje Y (m) e l_0 la longitud inicial de la barra (m).

Para obtener el cambio Δl_Y , se despeja a partir de (1):

$$\Delta l_Y = l_0 \mu\varepsilon \quad (2)$$

El porcentaje del aumento en la barra debido a cambios en su temperatura, según [9], se define como:

$$\Delta l_T = l_0 \alpha (T_f - T_i) \quad (3)$$

donde: Δl_T es la dilatación térmica en el eje Y de la barra debida a la diferencia de temperatura (m), α el coeficiente de dilatación lineal del aluminio ($2.3 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), T_f la temperatura final de la barra durante el periodo de análisis ($^\circ\text{C}$) y T_i la temperatura inicial de la barra ($^\circ\text{C}$). Por ejemplo para un cambio de temperatura de 1°C y una longitud de 0.391m, representa una deformación total de $58.82 \mu\varepsilon$.

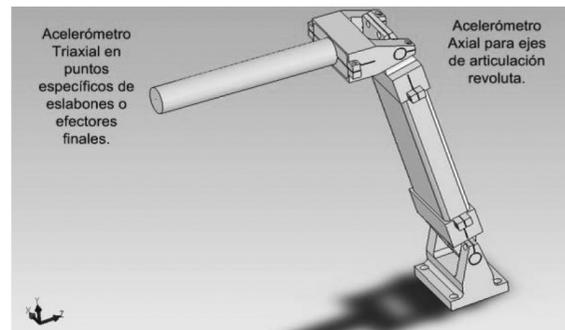


Figura 1. Imagen de robot con un eslabón flexible.

El tiempo en que el eslabón se estabiliza se define como (t_e), considerando que la amplitud de la oscilación se reduce de un valor pico máximo con un decaimiento hasta un valor igual al 10% del mismo.

El eslabón flexible se puede modelar mediante la formulación Euler-Lagrange [10-11].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial q} = U - \frac{\partial F(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \quad (4)$$

Donde $\mathcal{L}(q, \dot{q})$ es Lagrangeano definido como la diferencia de la energía cinética y la energía potencial, $F(\dot{q}) =$ Función disipadora de Rayleigh, $U =$ Entrada de control, $q =$ Coordenada generalizada de posición, $\dot{q} =$ Coordenada generalizada de velocidad.

Para un eslabón flexible se pueden definir como variables generalizadas:

α = Deflexión del eslabón y θ = Posición angular en el eje de la unión en un extremo del eslabón.

La deflexión origina un desplazamiento D del punto del extremo libre del eslabón con respecto a su posición inicial.

$$\alpha = \frac{D}{L} \quad (5)$$

Para una condición inicial especificada y conociendo la frecuencia natural del eslabón (ω), se puede representar cualquier oscilación del eslabón mediante:

$$\ddot{\alpha} = -\omega^2 \alpha \quad (6)$$

Por otra parte, la energía potencial proviene de la rigidez del eslabón, es decir.

$$V = \frac{1}{2} K \alpha^2 \quad (7)$$

donde: V = Energía potencial del eslabón, K = Rigidez del eslabón.

Así mismo, la energía cinética (T) se obtiene a través del movimiento del eslabón al liberar la carga de estudio.

$$T = \frac{1}{2} J_I (\dot{\theta} + \dot{\alpha}) \quad (8)$$

donde J_I = Inercia total del eslabón.

También puede resolverse mediante la ecuación diferencial de cuarto orden para una viga flexible bajo la segunda ley de movimiento de Newton [10]:

$$\rho S \left(\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[(EI) \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right] = 0 \quad (9)$$

Se obtiene la ecuación (10) que da las frecuencias naturales de oscilación de un sistema en cantiléver. El espécimen utilizado como eslabón flexible, es una viga tipo Vishay™, esta puede modelarse como un sistema continuo de un número infinito de grados de libertad cuya solución es:

$$fn = \frac{A}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho SL^4}} \quad (10)$$

donde S es la sección transversal del eslabón, E el módulo de Young, I el momento de inercia, L longitud

de la viga, ρ la densidad del material y A el coeficiente correspondiente al modo de oscilación [10].

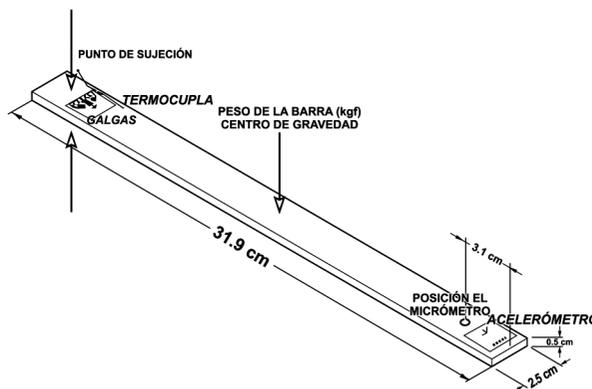
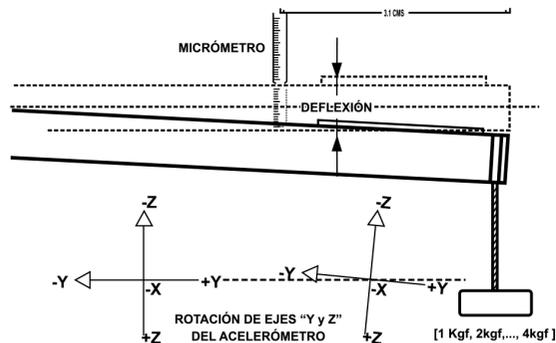


Figura 2. Ubicación de los sensores sobre el eslabón flexible.

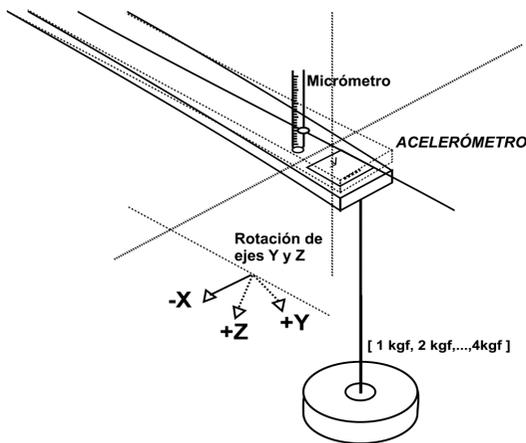
Materiales y métodos

El proyecto se desarrolló en el edificio de posgrado del Instituto Tecnológico de Aguascalientes en el cubículo del cuerpo académico control y automatización. Al diseño presentado en [12] se agregan, una fuente de 24VCD y se diseña una fuente con salida de 3VCD para alimentación de los acelerómetros u otros dispositivos. El sistema de monitoreo cuenta con tecnología de adquisición de datos de National Instruments™ de la familia NI-DAQ. Al chasis existente *cDAQ-9178* se agrega y configura un módulo *NI-9234*; este módulo cuenta con 4 canales de entrada analógica de ± 5 V, con una resolución de 24 bits y hasta 51.2 kS/s (kilo muestras por segundo) en cada canal; especialmente diseñado para medición de sonido y vibración. Como se describe en [12] el sistema cuenta con un módulo de medición de temperatura basado en un termopar y el sistema de medición de deformación mediante galgas extensiométricas. Los datos obtenidos por el chasis se envían vía USB a un ordenador para su análisis. El experimento se efectúa sobre un banco de trabajo nivelado y estable, donde se coloca un flexor vishay™. En uno de los extremos del flexor se sujeta un eslabón de aluminio de 391x25x5mm y 0.13 kg de masa. Sobre el eslabón, se instala una galga compuesta del tipo roseta que contiene un arreglo de tres galgas extensiométricas; una central y dos más a 45° del eje central marca Vishay™ con resistencia nominal de 350Ω (Ohms), formando un cuarto de puente de Wheaston con una resolución de 1.68με (microdeformaciones); un termopar tipo k; un acelerómetro de 3 ejes modelo ADXL335 marca Analog Device con un rango de

$\pm 3g$ (aceleración gravitacional $g=9.81m/s^2$); además un micrómetro acoplado en el flexor para medir las deflexiones del eslabón. La posición de los dispositivos se muestra en la Figura 2. Las galgas y el acelerómetro, se nivelan y adhieren firmemente sobre la barra. Con el software “Measurment & Automation Explorer” los ejes X y Y del acelerómetro se calibran a 0 g y el eje Z se calibra a 1g.



(a)



(b)

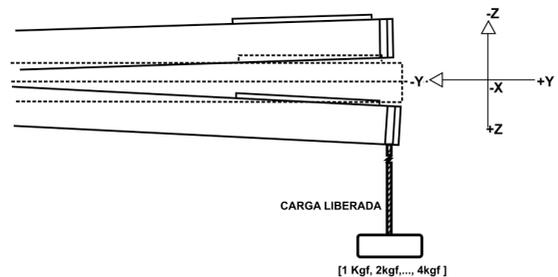
Figura 3. Deflexión en barra, rotación de ejes. (a) Vista lateral. (b) Vista en Isométrico.

Se desarrollaron dos pruebas para el análisis del eslabón empleando el software *Labview Signal Express* adquiriendo un total de 65000 muestras de cada variable por prueba con un periodo de muestreo de 20 us, los datos son enviados a un archivo tipo CVS (datos separados por comas) para su procesamiento.

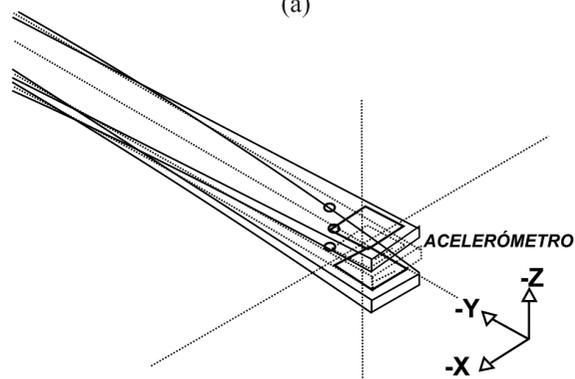
La primera de ellas consta de la colocación progresiva de 4 cargas en el extremo libre del eslabón: 9.8067 N, 19.6133 N, 29.42 N y 39.2266 N en reposo.

Con las diferentes condiciones, se realiza la medición de 4 variables: a) deflexión del eslabón en milésimas de pulgada (Figura 3) mediante el micrómetro. b) microdeformaciones, se obtiene el valor promedio de los datos mediante una hoja de cálculo. c) inclinación de la barra en sus 3 ejes (Figura 3) se almacenan y procesan igual que en el caso anterior. d) temperatura de la barra se obtiene el valor medio de los datos.

En la segunda parte del experimento la carga sujeta al eslabón mediante hilo cáñamo. En el software se configuran un periodo de muestreo de 20 μs , un tiempo de 1.2 s, con lo que se obtendrán 60000 lecturas por cada variable en cada prueba. El inicio en la toma de lecturas se da un instante antes de cortar el hilo mediante la flama de un encendedor (se eligió este método ya que el corte con tijeras o de otra forma producía oscilaciones adicionales al inicio), se sincronizan manualmente mediante un metrónomo con intervalos ajustados a 0.5 s. Con esto se hace oscilar el eslabón en la dirección vertical (eje Z) esperando una vibración libre subamortiguada según [10], (Figura 4). En este caso se registraron, la deformación y la aceleración instantánea en los tres ejes para una carga de 1kg, 2kg, 3kg y 4kg.



(a)



(b)

Figura 4. Libre oscilación de la barra. (a) Vista lateral. (b) Vista en isométrico.

La frecuencia natural de oscilación del sistema se determina por (10), considerando un análisis modal tipo 1, la constante $A=3.52$ [11], y de las propiedades de la viga $E=70 \times 10^9$ N/m², $I = 5.41968 \times 10^{-10}$ m⁴, $S=0.000161$, $L libre=0.2936$, $\rho=2700$ kg/m³ se obtiene $f_n=60.5$ Hz. Este valor fue verificado en el software ANSYS haciendo el análisis modal para el eslabón en estudio.

Resultados y discusión

De la primera prueba con la barra en reposo se obtienen los valores en Sistema Internacional (SI) mostrados en la Tabla 1. En el caso del eje Z, al inicio de la prueba se encuentra en la dirección del vector g , conforme se incrementa la carga, gira tendiendo de $+1g$ a $0g$; el eje Y tiende de $0g$ a $+1g$, ver Figura 4; el eje X se mantiene $\cong 0g$ a lo largo del experimento.

Tabla 1. Variables medidas con las barra en reposo para cada una de las cargas.

Carga (N)	Deflexión (μm)	Deformación (με)	Temperatura (°C)
0.000	378.0	-310.67	24.39
9.807	1079.5	265.98	24.29
19.613	2705.1	525.13	26.37
29.420	4318.0	810.12	25.39
39.226	5765.8	1039.67	25.84

Carga (N)	Inclinación eje X (g)	Inclinación eje Y (g)	Inclinación eje Z (g)
0.000	-0.0051632	0.008090665	1.067100800
9.807	-0.0004793	0.039562421	1.066238634
19.613	-0.0012503	0.049751982	1.065894077
29.420	-0.0016327	0.059407548	1.065803265
39.226	-0.0109633	0.067370758	1.059533954

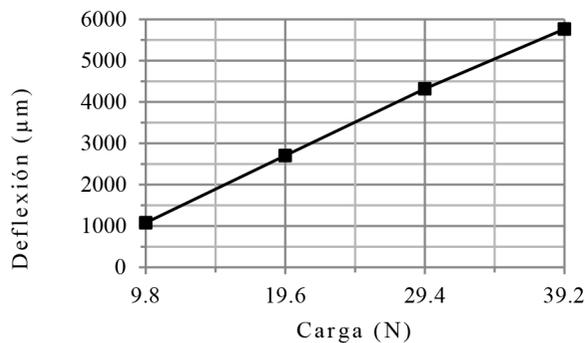


Figura 5. Deflexión del eslabón con carga.

La Figura 5 muestra el comportamiento de la deflexión ante diferentes valores de carga y la Figura 6 muestra la deformación del eslabón. Los cambios en la aceleración respecto a la carga aplicada al eslabón se muestran en la Figura 7 para el eje Y y en la Figura 8 para el eje Z. Este último no presenta un comportamiento lineal.

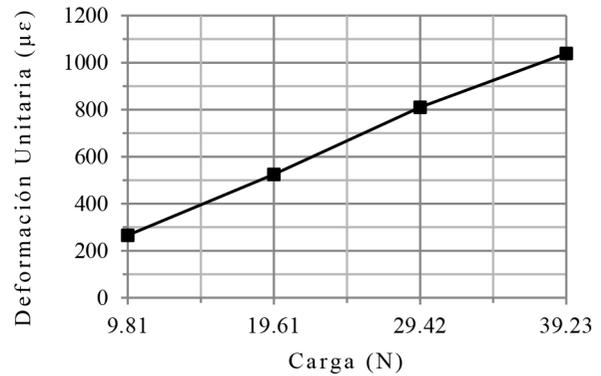


Figura 6. Deformación del eslabón con carga.

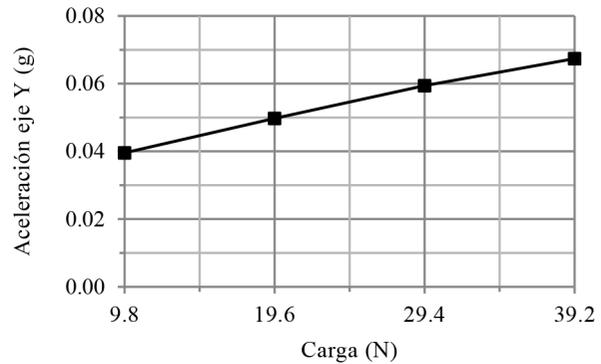


Figura 7. Aceleración en el eje Y.

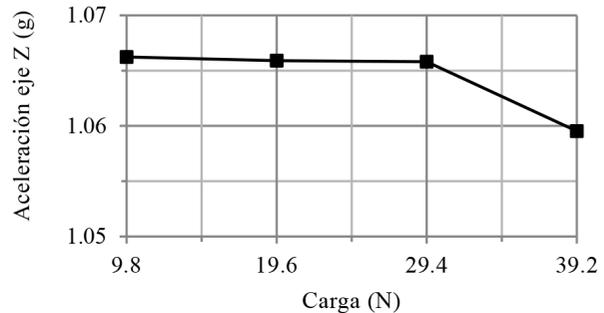


Figura 8. Aceleración en el eje Z.

La Tabla 2 muestra los resultados de la prueba de liberación repentina de la carga. El tiempo de estabilización se obtiene de la diferencia de tiempo

entre el pico inicial y cuando la señal alcanza el 10% del mismo. La frecuencia se obtiene mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) para los primeros 32768 datos de las mediciones de deformación y aceleración, considerando la frecuencia de muestreo de 50 kHz, se obtiene una resolución en el espectro de 1.5258 Hz. La figura 9 muestra el espectro en frecuencia de la deformación. En la figura 10 tenemos el espectro de la aceleración; se observa que la frecuencia a la cual ocurre el valor pico es independiente de la carga. Se aprecia la deformación del eslabón durante la liberación de la carga de 9.8 N en la Figura 11 para el primer segundo de oscilación y en la Figura 12 un acercamiento de la misma. Puede notarse la presencia de un poco de ruido en la señal.

Tabla 2. Variables medidas durante la liberación de la carga.

Carga (N)	t_e (s) eje Z	F (Hz)	Valor Pico Deformación unitaria ($\mu\epsilon$)	Valor Pico Aceleración eje Z (g)
0.000	1.2114	53.4	156.7891	1.038863
9.807	1.2107	53.4	206.8742	1.500153
19.613	1.2098	53.4	241.4038	1.981607
39.226	1.2115	53.4	290.1753	2.693253

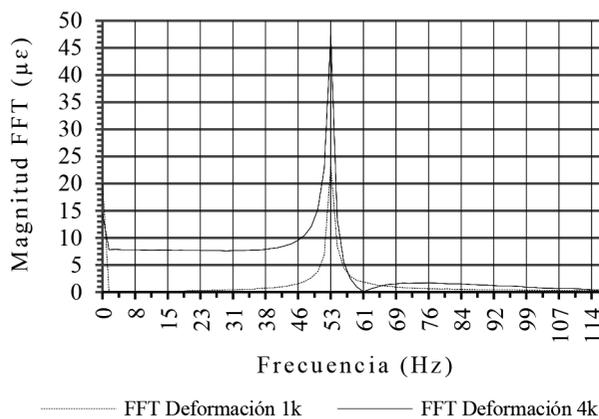


Figura 9. Espectro de señal de formación.

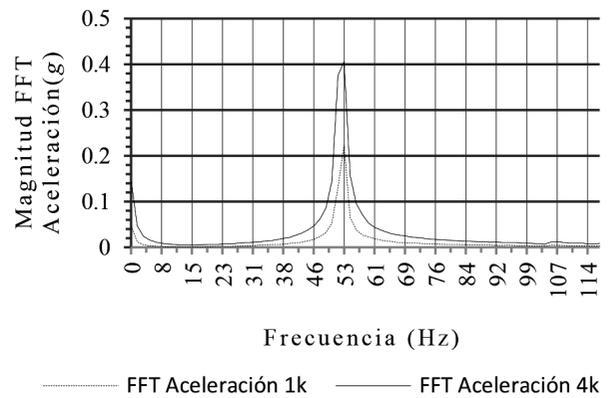


Figura 10. Espectro en frecuencia de señal aceleración eje z.

Al incrementar la carga a 39.22 N la Figura 13 muestra el incremento del pico inicial hasta un valor de 698 μ [contra 148 μ [al aplicar 9.8 N. La frecuencia y tiempo de estabilización son iguales.

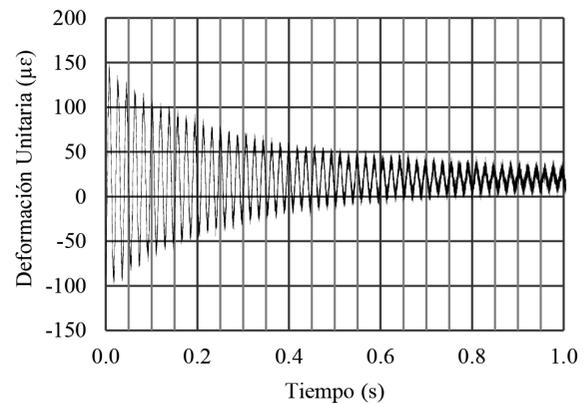


Figura 11. Deformación unitaria del eslabón al liberar carga de 9.08 N repentinamente.

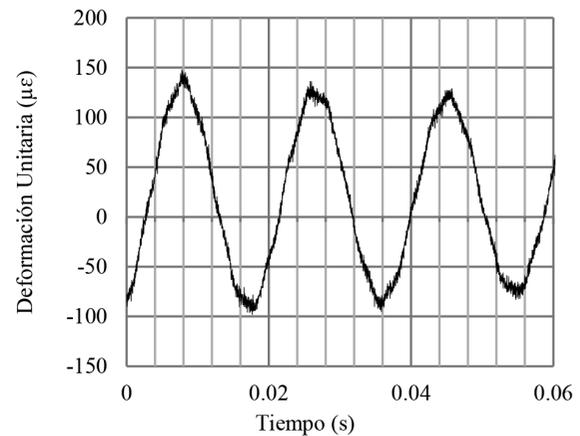


Figura 12. Acercamiento Figura 11.

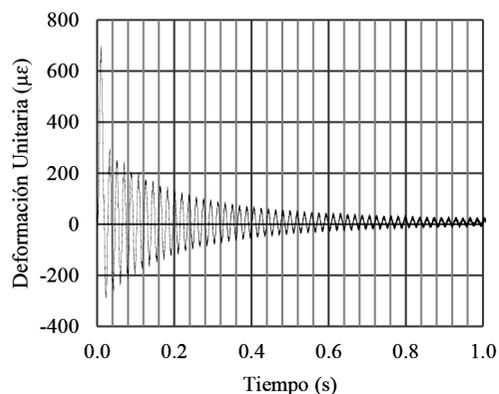


Figura 13. Deformación unitaria del eslabón al liberar carga de 39.226 N repentinamente.

En la figura 14 se tiene un acercamiento de la señal de deformación para una carga de 39.22 N, se aprecia la componente de ruido en la señal.

Las Figuras 15 muestran la aceleración en eje Z para 9.08 N, en la figura 16 se muestra un acercamiento. La figura 17 muestra el comportamiento de aceleración para una carga de 39.22 N.

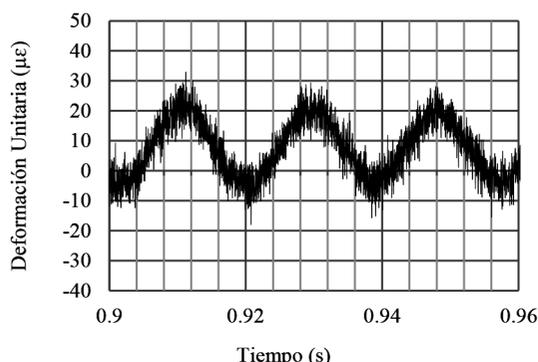


Figura 14. Acercamiento Figura 13.

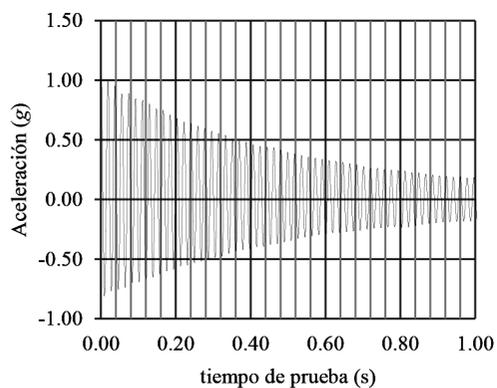


Figura 15. Aceleración instantánea eje Z (9.08N).

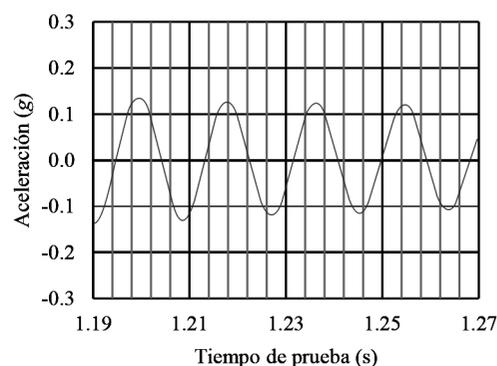


Figura 16. Acercamiento de aceleración entre 1.19 y 1.27 s.

Se observa de la Tabla 2 que la frecuencia de oscilación del eslabón es de 53.4 Hz y el tiempo de amortiguamiento de la señal es de 1.21s; son independientes a la carga aplicada en el eslabón. La amplitud de la deformación varía de 156µε a 290µε en sus valores pico; y la amplitud de la aceleración en el eje Z varía de 1.03g a 2.69g en sus valores pico; son variables que dependen de la carga aplicada.

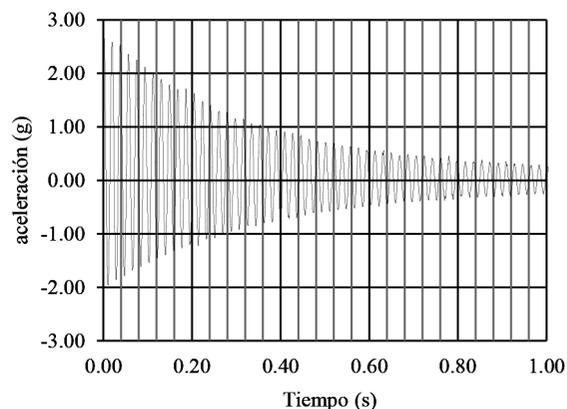


Figura 17. Aceleración instantánea eje Z (39.22N).

Conclusión

Los valores iniciales de deformación y deflexión aumentaron linealmente con la carga aplicada entre los 9.08N y los 39.22N. La frecuencia de 53.4 Hz y el tiempo de amortiguamiento de 1.21 s obtenidos por el subsistema son valores característicos que dependen del sistema mecánico caracterizado por el

banco experimental en robótica flexible. El impulso en la deformación presenta un comportamiento similar a la aceleración. Estos resultados verifican que el sistema y el experimento está acorde a la teoría donde para el eslabón en oscilación libre sin amortiguamiento se determina una frecuencia natural de 60.66Hz, por lo que se concluye que el sistema de monitoreo es confiable con la resolución para medir oscilaciones del orden de 50 kHz para la experimentación en este campo.

La deformación producida por los esfuerzos térmicos es despreciable, aunque pudiera ser significativa en distintas aplicaciones en donde su efecto debe ser calculado mediante (3) para verificar su magnitud. En este caso el efecto total, producto de esfuerzos térmicos y mecánicos es medido por la galga. En el experimento, la deformación por esfuerzo mecánico (peso de la carga), es la dominante.

El sistema de monitoreo tiene la capacidad de medir el tiempo preciso en que la barra vuelve al reposo, la posición, velocidad, o la aceleración instantáneas del eslabón mientras éste permanece oscilando; e incluso se puede determinar el módulo de Young del material bajo análisis.

El sistema de monitoreo de variables físicas para un banco de robótica flexible, es una herramienta versátil que permite medir los parámetros físicos más importantes involucrados en los robot flexibles, para su caracterización y control.

Agradecimientos

Se agradece a PROMEP por el apoyo otorgado en el desarrollo de este proyecto y la participación de los estudiantes de ingeniería eléctrica: Erick Fabián Vázquez López, Miguel Ángel Rodríguez Hernández y Carlos Emmanuel López González, por su colaboración en el desarrollo del sistema de adquisición de datos.

Referencias

- [1] Feliu Batlle V., "Robots Flexibles hacia una generación de robots con nuevas prestaciones". (2006). *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. Vol 3. No. 3. pp 24-41.
- [2] Axelsson, P., Karlsson, R. y Norrlof, M., (2012). Tool position estimation of a flexible industrial robot using recursive bayesian methods. *International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2012 IEEE*, p. 5234-5239
- [3] Sulistijono, I.A., Setiaji, O., Salfikar, I., Kubota, N. (2010). Fuzzy walking and turning tap movement for humanoid soccer robot EFuRIO. *Fuzzy Systems, IEEE International Conference On*.p. 1-6.
- [4] Ching-Chang W., Chi-Tai C., Hao-Che C., Yue-Yang H., Chii-Sheng Y., (2008). Static balancing control of humanoid robot base don accelerometer. *SICE Annual Conference*.p. 2836-2840.
- [5] Koda, Y., Maeno, T, (2006). Grasping Force Control in Master-Slave System with Partial Slip Sensor. *Intelligent Robots and System, International Conference On*.p. 4641-4646.
- [6] Tumari, M.Z.M.; Ahmad, M.A.; Saealal, M.S.; Zawawi, M.A.; Mohamed, Z.; Yusop, N.M., (2011) "The direct strain feedback With PID control approach for a flexible manipulator: Experimental results" *Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 11th International Conference on, p.7,12, 26-29 Oct.
- [7] Peza Solís J.F., Silva Navarro. G., Castro Linares R. (2009). "Modeling and Tip Position Control of a Flexible Link Robot: Experimental Results" *Computación y Sistemas* Vol. 12 No. 4. p. 421-435.
- [8] Etxebarria V., Sanz A. y Lizarraga I. "Control of a Lightweight Flexible Robotic Arm Using Sliding Modes" (2005). *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 2, Num. 2, pp 103-110.
- [9] Singer, F. y Pytel, A. (1994). Resistencia de materiales. *Introducción a la Mecánica de Sólidos*. México, D.F., México: Harla, S.A. de C.V.
- [10] Jens Trampe Broch. (1980). *Mechanical vibration and shock measurements*. Ed. [Brüel & Kjaer].
- [11] F-J. Sorcia-Vázquez, C-D. García-Beltrán, J. Reyes-Reyes, A. Rodríguez-Palacios. (2010). "Control de un brazo robot de eslabón flexible mediante PID Generalizado y Control Sin Modelo". *Congreso Anual 2010 de la Asociación de México de Control Automático*. México.
- [12] Esparza González M.S., Saucedo Zárate C.H., Sánchez López C., Castañeda Ramos L.A. (2013). "Propuesta de un Subsistema de Extensometría para la Integración de un banco Experimental de Robótica Flexible. *Conciencia Tecnológica* No. 46, Diciembre 2013. Pp 12-16.