

Análisis y caracterización de un acelerómetro capacitivo fabricado con tecnología polymump's

R. I Rincon-Jara*, R. Ambrosio, J. Mireles

Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología Aplicada, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Departamento de Eléctrica y Computación.

Ave. Del Charro 450 N, C.P. 32310, Cd. Juárez, Chihuahua, México

(Recibido: 30 de septiembre de 2009; Aceptado: 20 de agosto de 2010)

En este trabajo se presenta el análisis y caracterización del diseño de un acelerómetro del tipo capacitivo desarrollado en el CICTA y fabricado con tecnología PolyMUMP's. Actualmente los acelerómetros MEMS son fabricados con los procesos convencionales como el micromaquinado en bulto y el micromaquinado en superficie, siendo este último utilizado para cuando se requiere integrar la estructura mecánica y los componentes electrónicos en el mismo encapsulado [1], así mismo los acelerómetros MEMS se clasifican según su método de transducción siendo el más utilizado el capacitivo [1][2]. Simulaciones experimentales de referencia mediante Coventor indican que para la utilización de un sensado capacitivo, se requiere un sistema que pueda detectar fF (femto Faradios) de resolución, lo cual es un problema de ingeniería y conectividad no sencillo. Este trabajo describe una técnica para obtener los parámetros de operación del acelerómetro utilizando pruebas tanto mecánicas como eléctricas. Las figuras de merito más importantes obtenidas en este trabajo son: la sensibilidad y la No-linealidad. Los resultados obtenidos mostraron un valor de sensibilidad por el cambio de voltaje en relación a la gravedad de 1.4 mV/g y la No-linealidad R^2 presentó una fuerte correlación positiva mejor al 0.8%, con un rango de sensado de 12 g's . Los parámetros de operación de nuestro dispositivo fueron comparados con el estado del arte de otros trabajos de referencia y con datos reportados en la literatura, estos indicaron que nuestro dispositivo es muy prometedor para aplicaciones en los sistemas automotrices.

Palabras clave: MEMS (Sistemas Micro Electromecánicos); Acelerómetro; Masa sísmica; Frecuencia de resonancia; Sensores capacitivos.

This work presents the analysis and characterization of a capacitive accelerometer fabricated with PolyMUMP's technology. The structure contains a proof mass which is suspended between fixed rigid electrodes to sense differential capacitance measurement. The accelerometer structure was simulated by the software Coventorware. The simulation and modeling results suggested the use of low detection capacitance system in the range of fF (femto Farads) resolution for dynamics conditions, which is an engineering problem and non-simple connectivity. Also, this paper describes a technique for calculating the operation parameters of the accelerometer using electrical and mechanical test stimulus. The most important figures of merit of the device such as: sensitivity and the Non-linearity are presented. The results showed a value of sensitivity by the change of voltage in relation to the gravity of 1.4 mV/g and the non-linearity was better than 0.8%, with a sensing range of 12 g's . The operation parameters of our design are compared with the state of the art and data reported in literature, which indicated that it is very promising for application in automotive systems.

Keywords: MEMS (Micro Electro-Mechanical System); Accelerometer seismic mass; Resonant frequency; Capacitive sensors

1. Introducción

En la actualidad el diseño de acelerómetros MEMS consiste de un sistema de suspensión y de una masa de prueba cuya deflexión provee una medición de la aceleración. Estos dispositivos están clasificados según su fabricación, según el método de transducción del dominio mecánico al eléctrico y el tipo de sistema de control utilizado. Dos procesos de fabricación son los que dominan en el diseño de los acelerómetros, estos procesos son el micro maquinado en bulto y el micro maquinado en superficie, este último utilizado para cuando se requiere integrar el circuito integrado y la estructura mecánica en el mismo chip [1][3]. Una de las figura de mérito en este trabajo es la sensibilidad con un valor de 1.4 mV/g , presentando un mejor rango en comparación con trabajos de referencia indicados en la tabla 2 mencionada más adelante, e indicando que puede ser

prometedor para futuras aplicaciones en el área de los sistemas automotrices.

Un acelerómetro es un dispositivo electromecánico que mide las fuerzas de aceleración, estos se encuentran a escalas de décimas de micrones con niveles de sensibilidad y error muy pequeños, la unidad de medida son la gravedad (g's) [2]. Así los acelerómetros son quizás el dispositivo micro electromecánico más simple de los sistemas MEMS, a veces consistiendo en poco más que una masa suspendida de la viga de prueba (también conocida como masa sísmica), con un cierto tipo de detección y del trazado de la desviación del circuito. Los acelerómetros MEMS están disponibles en una amplia variedad de gamas que puede llegar hasta los miles de g's y además de modelos compuestos por uno, dos y tres ejes de sensado [1][2]. Estos dispositivos son utilizados para sensar los cambios de velocidad con respecto al tiempo y para el control de

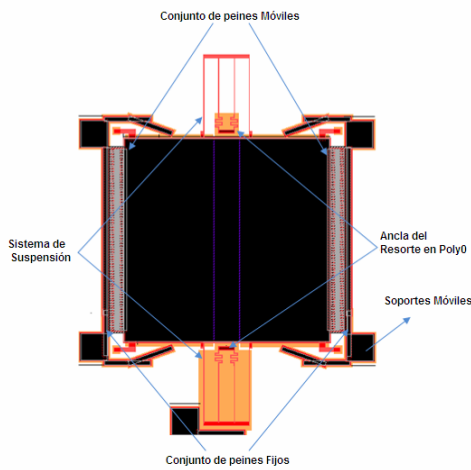


Figura 1. Descripción del diseño final del acelerómetro.

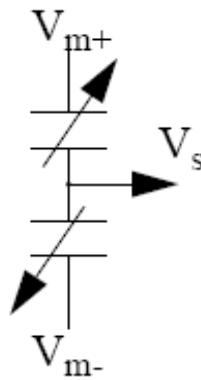


Figura 2. Esquema de interfaz capacitiva del acelerómetro. [1]

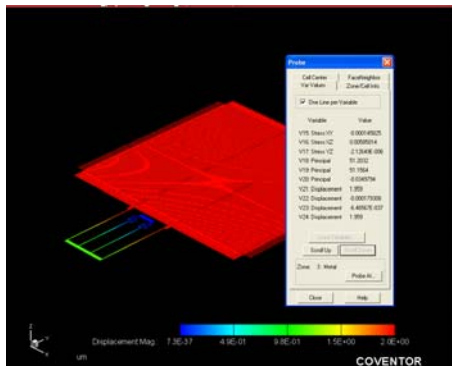


Figura 3. Simulación del acelerómetro sometido a una fuerza de $0.6 \mu N$ y tabla de resultados.

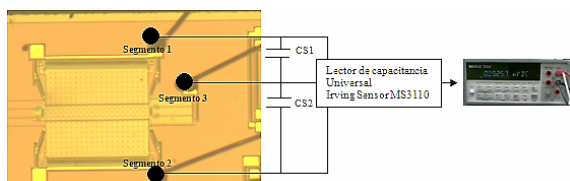


Figura 4. Medición de capacitancia, en cada segmento del acelerómetro utilizando el MS3110.

mecanismos de vibración [3]. Los acelerómetros se pueden utilizar para medir la vibración en los coches, máquinas, edificios, sistemas de control de proceso y las instalaciones de seguridad entre otros. Pueden también ser utilizados para medir la actividad sísmica, la inclinación, la vibración de las máquinas, la distancia dinámica y la velocidad con o sin la influencia de la gravedad [4]. Los acelerómetros usados para medir la gravedad se llaman gravímetros.

La aceleración es medida por el desplazamiento de la masa sísmica. Para el sensado del tipo capacitivo, el desplazamiento es detectado por la medición del cambio de capacitancia entre la masa sísmica y los electrodos fijos adyacentes [1][5]. Los valores tan pequeños de capacitancias que presentan estos dispositivos son críticos para los esquemas de conversión de voltaje, debido a las capacitancias parásitas que se presentan en la integración de la señal de acondicionamiento, circuitos electrónicos y empaquetado.

La caracterización de estos dispositivos es una tarea altamente cambiante, debido al bajo movimiento que se presenta en los acelerómetros MEMS. En este artículo, la simulación y caracterización de un acelerómetro MEMS es presentado. La simulación de elemento finito de la estructura del silicio fue simulada para obtener los parámetros específicos del diseño y para predecir el funcionamiento del acelerómetro. El software coventorware fue utilizado para modelar y caracterizar la estructura mecánica. La caracterización experimental se realizó utilizando la vibración de un aparato vibrómetro (shaker) con un acelerómetro comercial como referencia. La capacitancia en la estructura fue medida con un lector de capacitancia MS3110, y la resonancia mecánica fue medida utilizando un analizador de micro sistemas MSA400 de la marca Polytec.

2. Método

2.1. Diseño y modelado

El acelerómetro que se diseño en el CICTA, es un acelerómetro del tipo capacitivo, el cuál cuenta con un conjunto de peines fijos y otro con peines móviles que tienen las mismas dimensiones de $3.5 \mu m$ de grosor, $2 \mu m$ de ancho y $30 \mu m$ de longitud. El conjunto de peines fijos se encuentra anclado a una sección tipo barra de *Poly1*, *Poly2* y *Metal* de tal manera que conforman un mismo conductor. El conjunto de peines móviles, es aquél que se encuentra unido a los extremos laterales de la placa llamada masa sísmica, compuesta de la misma manera por *Poly1*, *Poly2* y *Metal*. La utilización de estos 3 materiales en el diseño de la masa sísmica y de los peines, ayudará a producir un mejor desplazamiento de la masa sísmica al momento en que el acelerómetro se encuentra bajo una aceleración y además ayudará a tener una frecuencia de resonancia más baja. La descripción de los elementos del acelerómetro se muestra en la figura 1.

El diseño de este acelerómetro utiliza como medio de transducción, un sistema de sensado del tipo capacitivo,

cuya función es convertir eventos mecánicos en señales eléctricas y con éstas poder analizar la respuesta del acelerómetro bajo una aceleración de entrada [6].

Existen tres tipos de esquemas para interfaces capacitivas, la más comúnmente usada es la interface de medio puente simple en la que los cambios de capacitancia pueden ser medidos controlando los extremos del puente y tomando el nodo central como la salida. Para fines de este acelerómetro el esquema de interface que se utilizó es el de medio puente simple que se muestra en la figura 2.

El sistema de suspensión, que se encuentra tanto en la parte superior como en la inferior, tiene como objetivo amortiguar el movimiento de la masa sísmica, cuando es sometido a una fuerza y esta anclado a la placa de *poly0*. Los otros elementos son los peines fijos y los peines móviles, que tienen como objetivo sensar las variaciones de capacitancia, así como los soportes móviles que ayudaran a tener una mejor flexibilidad en el movimiento.

El acelerómetro MEMS, cuenta con un número de condiciones iniciales, cuando éste se encuentra en reposo, debido principalmente a las capacitancias existentes entre las diferentes placas del dispositivo. Cabe mencionar que todas las variables fueron calculadas, tomando en cuenta la distribución de las placas en el dispositivo y las dimensiones que se utilizaron para realizar su diseño. Las condiciones más significativas, son la masa sísmica y la capacitancia inicial del dispositivo.

Masa sísmica: Esta compuesta por la unión de varias placas, las cuales son *poly1*, *poly2* y *metal* con un grosor de $2\ \mu\text{m}$, $1.5\ \mu\text{m}$ y $0.5\ \mu\text{m}$ respectivamente. La masa sísmica es muy importante, debido a que cuando el acelerómetro es sometido a una fuerza, esta masa y los peines móviles unidos a ella se desplazan produciendo un cambio de capacitancia entre los peines fijos y los móviles, así mismo entre el traslape que existe con la placa *poly0*.

Masa específica de la placa móvil

$$m = [(a \times l \times g_m)_{\text{placa}} + 2 \times n_{\text{peines}} (a \times l \times g_p)_{\text{peine}}] \rho \quad (1)$$

Donde m es la masa específica, a es el ancho de la masa sísmica, l es la longitud, n es el numero de peines móviles, g_m es el grosor de la placa, g_p es el grosor del peine móvil y ρ es la densidad del poli-silicio.

La masa de la placa móvil, es la siguiente:

$$m = [(656\ \mu\text{m} \times 655\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m})_{\text{placa}} + 2 \times 75_{\text{peines}} (2\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m} \times 3.5\ \mu\text{m})_{\text{peine}}] (2330\ \text{Kg/m}) = 4.07\ \mu\text{g}$$

Capacitancias iniciales C_1 y C_2 . Una vez que ya se obtuvieron las capacitancias de traslape entre las placas y entre los peines móviles y fijos del acelerómetro, se determinaron las capacitancias iniciales producidas en cada uno de los segmentos. La suma de todas las capacitancias forman C_1 y C_2 .

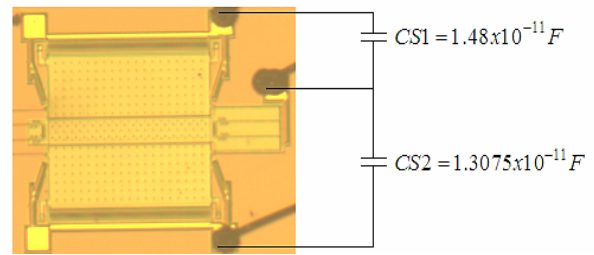


Figura 5. Valores de las capacitancias iniciales CS1 y CS2 del acelerómetro MEMS.

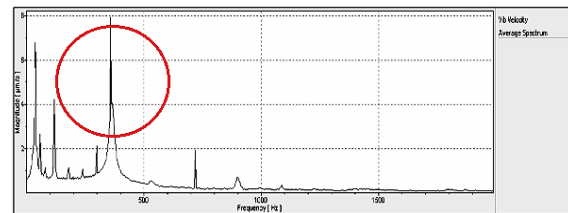


Figura 6. Frecuencia vs velocidad a 359Hz.

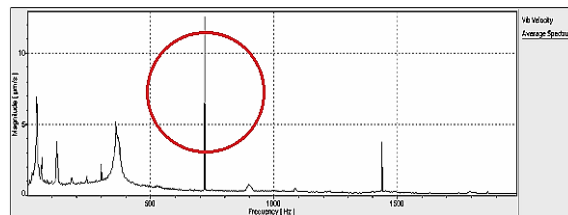


Figura 7. Frecuencia vs velocidad a 359Hz.

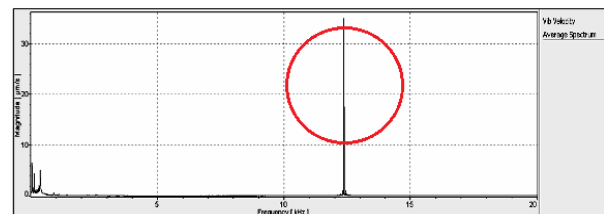


Figura 8. Frecuencia vs velocidad a 12.38KHz.

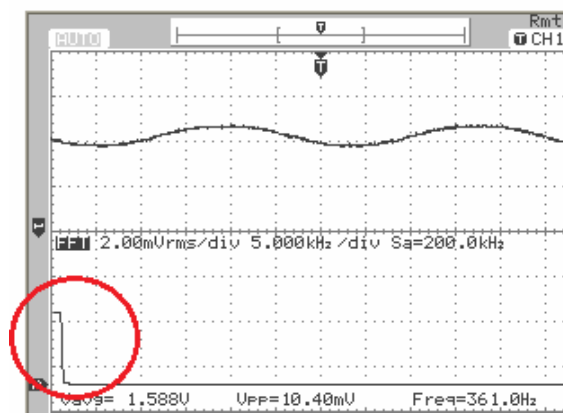


Figura 9. Respuesta del acelerómetro a 359Hz.

Tabla 1. Parámetros dinámicos del modelado del acelerómetro.

Parámetro	Rango Característico
Frecuencia f (Hz)	(8.21-152.80)
Frecuencia angular ω (Hz)	(51.61-960)
Fuerza (μ N)	(0.0112-4.04)
Aceleración (m/s^2)	(2.76-995.02)
Desplazamiento (μ m)	(0.0376-13.2)
Variación de Capacitancia(f)	(0.3-107.77)

La importancia de conocer estas capacitancias, es acondicionar una señal que sea capaz de sensar tales valores de capacitancia, que por lo general son valores tan pequeños como los fF .

Capacitancia inicial segmento 1:

$$C_1 = C_{TS1} + C_{TP1} + C_{pp} = 820fF + 69fF + 35fF = 924fF$$

Capacitancia inicial segmento 2:

$$C_2 = C_{TS2} + C_{TP2} + C_{pp} = 826fF + 69fF + 35fF = 930fF$$

Donde C_1 y C_2 es la capacitancias de cada segmento, C_{TS1-2} es la capacitancia de traslape entre el segmento y la placa de $poly0$, C_{TP1-2} es la capacitancia de traslape entre los peines y la placa de $poly0$ y por último C_{pp} es la capacitancia entre peine y peine.

Condiciones Dinámicas. Cuando el acelerómetro MEMS es sometido a una aceleración, se presentan diferentes parámetros que son importantes para su funcionamiento, como la frecuencia angular, frecuencia de resonancia, desplazamientos, etc. Tales parámetros causan cambios en las capacitancias C_1 y C_2 , debido principalmente al desplazamiento que sufre la masa sísmica del acelerómetro con el área de traslape de las placas.

Algunos de los parámetros dinámicos, se obtuvieron simulando el acelerómetro en el software Coventor. En la simulación, se aplicó una serie de fuerzas con el fin de analizar los desplazamientos producidos por ésta. En la figura 3 se muestra la simulación de la estructura.

Los parámetros obtenidos en el modelado del acelerómetro se muestran en la tabla 1, en ésta se dan los diferentes rangos de la frecuencia, fuerza, aceleración, desplazamiento y la variación de capacitancia.

3. Resultados experimentales

Con el modelado del acelerómetro MEMS, se realizaron las diferentes caracterizaciones experimentales, para obtener los valores de las capacitancias reales de cada uno de los segmentos del acelerómetro. Éstas se obtuvieron con la utilización de un lector de capacitancias MS3110 [7]. Un esquemático de la medición de la capacitancia se muestra en la figura 4.

Con las mediciones realizadas y utilizando las formulas 2 y 3, se obtuvieron los diferentes valores de capacitancia para cada uno de los segmentos del acelerómetro. En la figura 5 se muestran las capacitancias obtenidas.

$$CS2 = \frac{(V_0 - V_{REF}) \times C_F}{Gain \times (V2P25)(1.14)} + 10pF \tag{2}$$

$$CS1 = 10pF - \frac{(V_0 - V_{REF}) \times C_F}{Gain \times (V2P25)(1.14)} \tag{3}$$

donde $CS1-2$ es la capacitancia de cada uno de los segmentos del acelerómetro, V_0 es el voltaje de salida, V_{REF} es el voltaje de referencia, C_F es el capacitor de retroalimentación interno de la tablilla de evaluación y $V2P25$ es un voltaje contante de 2.5V.

3.1. Resonancias Mecánicas

Las frecuencias del acelerómetro MEMS, fueron obtenidas utilizando un equipo PolyTech, realizando un barrido de frecuencias y polarizando cada uno de los segmentos del acelerómetro. El dispositivo presentó movimiento a tres diferentes frecuencias (359, 718, 12318Hz), los resultados se muestran en las figuras 6-8.

Para el paso más importante de la caracterización experimental, el acelerómetro fue puesto bajo movimiento debido a la vibración de un shaker, con el fin de obtener un desplazamiento de su masa sísmica, la cual causaría una variación de la capacitancia inicial en cada uno de los segmentos del mismo. Esta variación se debe a que la capacitancia de traslape existente entre los peines fijos y móviles cambia por un desplazamiento en el conjunto de

Tabla 2. Comparación de los parámetros de operación de algunas investigaciones con los del acelerómetro del CICTA.

Parámetros	Referencia 1 [9]	Referencia 2 [10]	Referencia 3 [11]	Acelerómetro MEMS CICTA
Sensibilidad	800 mV/g	0.6 V/g	1 mV/g	1.4 mV/g
Rango Dinámico	$\pm 2g$	$\pm 4g$	1G a 500G	(3.4 a 12.4) g's
Linealidad	2.5%	2%	1% (temperatura)	0.7V (3.8%)
Radiométrico	2% error	---	---	47.034%
Histéresis	---	---	---	2.2%
Resonancia Mecánica	2.5KHz	4007Hz	800Hz	718Hz

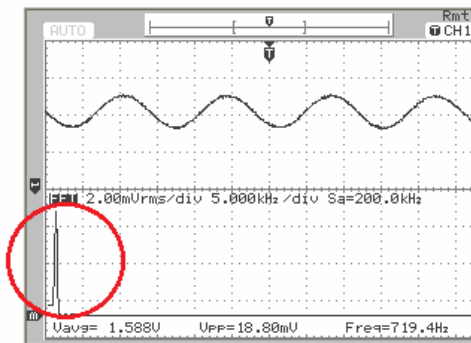


Figura 10. Respuesta del acelerómetro a 718Hz.

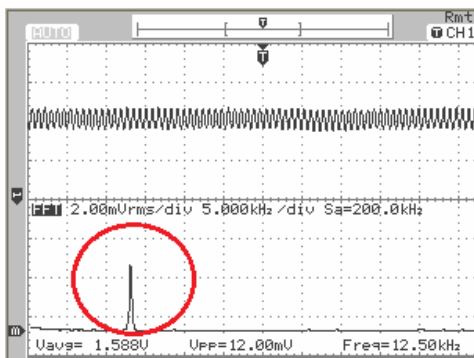


Figura 11. Respuesta del acelerómetro a 12.38KHz

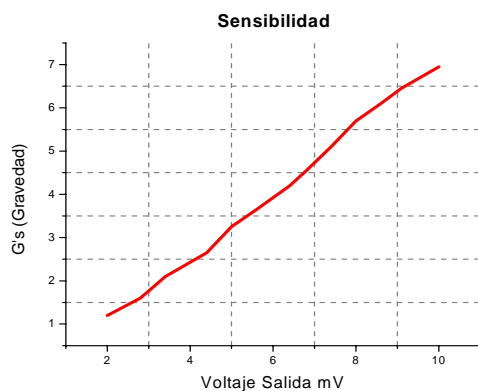


Figura 12. Sensibilidad del acelerómetro.

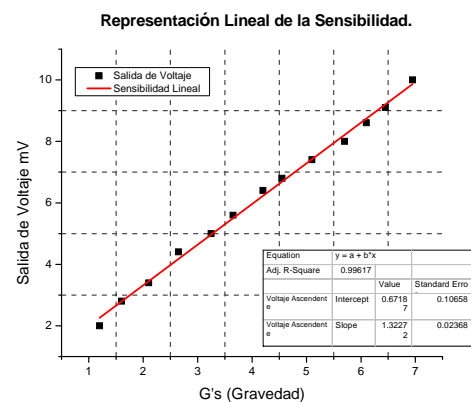


Figura 13. Gráfica de la representación lineal de la sensibilidad calculada.

peines móviles. En cada uno de los segmentos la variación se hace de manera diferencial.

Algunas de las respuestas a la frecuencia, que el acelerómetro presentó bajo movimiento vibratorio se presentan en las figuras 9-11. En éstas se puede observar la variación de voltaje a través de una onda senoidal y su correspondiente transformada de Fourier.

Sensibilidad. La sensibilidad esta definida como la relación que existe entre el voltaje de salida del circuito acondicionador y el cambio de la aceleración aplicada en g's. Para el acelerómetro MEMS, la sensibilidad se consiguió utilizando los valores de g's (a una frecuencia de 5KHz) que se obtuvieron con el acelerómetro comercial que se caracterizó con tal fin.

Para obtener el valor de la sensibilidad, se utilizaron el promedio de todos los incrementos de voltaje de la salida del sensor y el promedio de los incrementos de g's de la gravedad. Los promedios de cada uno se muestran en las siguientes fórmulas.

La fórmula de la sensibilidad en relación a los promedios es la siguiente [8]:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\Delta V_{\text{prom}}}{\Delta G's_{\text{prom}}} \tag{4}$$

Donde ΔV_{prom} es el promedio de los incrementos de voltaje, $\Delta G's_{\text{prom}}$ es el promedio de los incrementos de gravedad. Sustituyendo los promedios de los incrementos de voltaje y de gravedad en la fórmula, así la sensibilidad es la siguiente:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\Delta V_{\text{prom}}}{\Delta G's_{\text{prom}}} = \frac{0.66}{0.47} = 1.4\text{mV} / \text{g}$$

En la figura 12 se muestra la grafica que representa la sensibilidad.

3.2. No-linealidad

La No-linealidad en el acelerómetro MEMS es la máxima desviación de la salida, que existe entre la curva de la sensibilidad del acelerómetro y una representación lineal de la verdadera curva de sensibilidad que se utiliza para realizar los análisis que dependan de ésta. La No-linealidad es medida solamente sobre los incrementos de la entrada y es expresada como un porcentaje a gran escala de la salida. La No-linealidad es la máxima desviación producida entre la sensibilidad calculada y su representación lineal, esta definida por la siguiente fórmula [8].

$$\text{Linealidad} = V_{G's_{\text{min}}} - \frac{1}{2} (V_{G's_{\text{desviacion}}} + V_{G's_{\text{maximo}}}) \tag{5}$$

Donde V_G es el voltaje que resulta de una gravedad aplicada a la estructura. Sustituyendo los valores del punto

de máxima desviación y sus puntos más cercanos obtenemos que la linealidad es de:

$$\text{Linealidad} = \left| 3.8 - \frac{1}{2}(4.1 + 4.8) \right| = |-0.7| = 0.7V$$

Los datos representados para la No-linealidad presentan una fuerte correlación del tipo positivo, con un buen coeficiente de determinación R^2 , como se muestra en la gráfica de la figura 15, siendo su No linealidad- R^2 mucho mejor que el 0.8% (Figura 13).

Estos parámetros se compararon con los obtenidos en algunos trabajos de investigación realizados anteriormente, no todos los trabajos muestran los mismos parámetros ya que se enfocan solo en algunos de ellos. Los resultados de esta comparación se muestran en la tabla 2.

4. Conclusiones

El acelerómetro MEMS, presentó parámetros satisfactorios a la aplicación de aceleraciones en g 's por medio de un shaker. La respuesta a la frecuencia nos determinó, que el acelerómetro tenía una buena sensibilidad a bajas frecuencias, obteniendo un ancho de banda de 359Hz-4000KHz. La sensibilidad a la que el acelerómetro MEMS reaccionó bajo el sistema de vibración es de 1.4mV/g.

La caracterización experimental que se desarrollo para analizar el acelerómetro MEMS, obtuvo diferentes parámetros de operación necesarios para poder entender el

adecuado funcionamiento del mismo, tales parámetros fueron el resultado de someter al acelerómetro a un sistema de vibración y del análisis de su respuesta al mismo. Estos parámetros se compararon con los obtenidos en algunos trabajos de investigación realizados anteriormente, no todos los trabajos muestran los mismos parámetros ya que se enfocan solo en algunos de ellos. Los resultados de esta comparación se muestran en la tabla 2.

Referencias

- [1]. Gang Zhang, Project report, Carnegie University, pp. 40, (1994)
- [2]. Julian W. Gardner, Vigía K. Varadan, Ed. Wiley, (Pennsylvania USA AÑO).
- [3]. Mohamed Gad el Hak, Ed. Taylor and Francis, (Florida USA, AÑO).
- [4]. Chang Liu, Illinois Ece Series Ed., Prentice Hall, (New Jersey USA, AÑO).
- [5]. M. Elwenspoek, R. Wiegerink, Ed. Springer, (Germany, AÑO).
- [6]. Michael Kraft, Sensors and actuators, **68**, 466 (1998).
- [7]. MS3110BDCP Operating Specifications and User Manual, Irving Sensor, Costa Mesa, California USA, (2004)
- [8]. Frequently Asked Question of Sensotec, Honeywell International Inc., Ohio, Columbus USA, 2003.
- [9]. Francis E.H. Tay, Sensors and actuators", **86**, 45 (2000).
- [10]. P Bruschi, Sensors and actuators, **123**, **185** (2005).
- [11]. F Rudolf, **21**, 297 (1990).