

Análisis de corrosión en MEM de la industria electrónica en ambientes árido y marino del noroeste de México

Gustavo **López-Badilla**
Catalina **González-Hernández**
Antonio **Valdez-Ceballos**

CETYS, Universidad.
Blvd. Cety, Colonia Rivera,
Mexicali, Baja California.
MÉXICO.

correo electrónico (email): glopezbadilla@yahoo.com
cgonzalezh@hotmail.com
avaldez@hotmail.com

Recibido el 29 de septiembre de 2010; aceptado el 4 de abril de 2011.

1. Resumen

El uso de sistemas microelectromecánicos (*Micro Electro-mechanical Systems*, MEMS, por sus siglas en inglés) en la industria electrónica (IE) es de gran importancia por la reducción de tamaños de dispositivos electrónicos (DE) y sistemas electrónicos (SE). El desarrollo de nuevas tecnologías para el diseño de nuevos equipos microelectroelectrónicos (EME) es un elemento de interés en las plantas industriales. Las ventajas del uso de MEMS en EME son grandes, pero si el microclima en el interior de las plantas industriales no se controla, el proceso de corrosión se genera deteriorando las conexiones eléctricas de los MEMS. La corrosión atmosférica se produce cuando los niveles de humedad y temperatura son superiores a 70% y 30°C, y las concentraciones de contaminantes del aire tales como sulfuros y cloruros superan los estándares de calidad del aire en ciudades como Mexicali (zona árida) y Ensenada (medio marino). Los MEMS se fabrican en cuartos limpios, con un control de buen clima, pero en los periodos del año cuando los niveles de humedad (HR) y las temperaturas están por encima de 90% y 45°C en el exterior que afectan las condiciones climáticas de interiores de la industria electrónica. Además algunos gases como el SO₂, que pene-

tran a través de sistemas de aire acondicionado, agujeros y grietas en techos y paredes, como en Mexicali, la corrosión se genera en las estructuras de las conexiones eléctricas de MEMS, en su proceso de fabricación. En Ensenada, los iones cloruro promueven la generación de corrosión.

Palabras clave: MEM, industria electrónica, corrosión, clima, contaminación del aire, DE, EE.

2. Abstract (Analysis of Corrosion in MEMS of the Electronics Industry in Arid and Marine Environments of the Northwest of Mexico)

The use of microelectromechanical systems (MEMS) in the electronics industry is of great importance to reduce the sizes of electronic devices and systems. The development of new technologies for the design of novel micro electro-electronic equipment (MEE) is an element of interest in industrial plants. The advantages of using MEMS in MEE are large, but if the microclimate in indoors of industrial plants is not controlled, the corrosion process is generated, damaging the electrical connections of MEMS. The atmospheric corrosion occurs when the levels of humidity and temperature exceed the 70% and 35°C, and the concentrations of air pollutants such as sulfur and chlorides exceed the air quality standards in cities such as Mexicali (arid zone) and Ensenada (marine environment). The MEMS are manufactured in clean rooms, with a good climate control, but in the periods of the year when levels of humidity (RH) and temperatures are above 90% and 45 °C of outdoor influences in the climatic conditions of indoor of industrial plants. Also some gases as the SO₂, enters through air conditioning systems, holes and cracks in roofs and walls, as in Mexicali, generating corrosion in structures of the electrical connections of MEMS, in their manufacturing process. In Ensenada, the chloride ions promotes the corrosion too as in the arid zone, only at lower temperatures and with high humidity levels that is similar in Mexicali. This affects the operational performance of the MEMS used in electronic equipment.

Key words: MEMS, electronics industry, corrosion, weather, air pollution.

3. Introducción

Desde sus inicios como una tecnología emergente hasta nuestros días, el uso de MEMS en la IE, ha contribuido al desarrollo tecnológico para el mejoramiento de EE. Además, se han utilizado como micro y nano DE de detección y control de procesos de manufactura en áreas como la automotriz, aeroespacial, médica y militar [1]. En la última década, se ha incrementado su uso en DE. La exposición de EE con MEMS a ambientes agresivos ha generado un decremento en su rendimiento operativo en las aplicaciones militares [2], industriales y biomédicas por la presencia de corrosión. Debido a esto se han analizado nuevos diseños y materiales para evitar la generación de corrosión. Sabet [3] y Cohn [4] mencionan que es necesario utilizar empaques muy herméticos en procesos de manufactura de la IE para un funcionamiento óptimo de los MEMS. En el noroeste de la República Mexicana, en el estado de Baja California, están ubicadas alrededor de 150 y 70 empresas maquiladoras en Mexicali y Ensenada, respectivamente, de las cuales 80% son de la IE [5],[6]. Esta investigación realiza una evaluación del rendimiento operativo de EE que usan MEMS, siendo de gran importancia por las técnicas científicas utilizadas para su análisis, fabricación y pruebas eléctricas. Las empresas que solicitaron el estudio, requirieron de asesorías con técnicas y métodos de análisis de DE con MEMS, por lo que este estudio es de gran importancia para la IE de Baja California, porque a otras compañías que tenían un problema similar por la influencia del clima y contaminación del aire, se les proporcionó apoyo técnico científico a la empresa de teléfonos celulares en Mexicali y marcapasos en Ensenada. Esto es importante, ya que en la actualidad se requieren sistemas con operaciones más eficientes que generen un menor costo en su producción y sean más confiables [7] En este estudio se presentan resultados de los diferentes métodos de análisis realizados.

3.1. Importancia de MEMS en la industria electrónica

La aplicación de MEMS es un tema relevante en la IE de esta región de México que está disponible para ser utilizada en el mejoramiento y optimización de sistemas [8]. La investigación se enfoca en analizar los factores que generan corrosión en DE y EE, para diseñar nuevos métodos de manufactura que eviten o disminuyan la generación de corrosión, para las telecomunicaciones y la biomedicina, que utilizan MEMS [9]. Hoy en día las industrias buscan mejorar la eficiencia de sus productos o procesos por medio de técnicas industriales modernas utilizando MEMS, ya que en un espacio mínimo pueden realizar aplicaciones o mediciones importantes, y reducen los recursos necesarios para fabricarlo [10].

3.2 Historia de MEMS

Los MEMS han evolucionado a tecnologías que buscan miniaturizar sistemas complejos integrando múltiples funciones en un paquete pequeño o en un simple dado. En Europa a estos microsistemas se les conoce como MST o "Micro Systems Technology", sin embargo el término MEMS se ha vuelto cada vez más predominante. Tanto Helvajian y colaboradores como Vittorio [11] coinciden en que la fabricación de MEMS, surgió con el desarrollo de semiconductores novedosos a finales del siglo XX. El primer semiconductor fabricado fue el transistor en Bell Laboratories por Shockley, Bardeen y Brattain en 1947 [12]. Esto llevó a un desarrollo sin comparación en la tecnología de los semiconductores, que posteriormente llevaría a la creación de sistemas electrónicos cada vez más rápidos, pequeños y de fabricación menos costosa. Sin embargo, este mismo proceso de fabricación tan acelerado generó un vacío en los conocimientos de sus operaciones [13]. Esto fue porque cada vez se manufacturaban circuitos más pequeños capaces de procesar información más rápido, con interfaces de estos circuitos, sensores y actuadores, no podían acoplarse fácilmente para sus funciones en sus aplicaciones. Además en un principio de la fabricación de MEMS no se tomó en cuenta su protección contra la corrosión. La eficiencia de los MEMS es una de las principales motivaciones detrás de su desarrollo, debido a que estos microdispositivos han demostrado ser más rápidos, económicos y eficientes que sus contrapartes macroscópicas. Sin embargo, el desarrollo de tales soluciones se ha visto detenida por las limitaciones tecnológicas. Las primeras investigaciones realizadas en el área de los MEMS fueron orientadas hacia los microsensores obteniendo como producto de estas investigaciones, el descubrimiento de la piezoelectricidad. Esta característica presente en el silicio y el germanio, permite el desarrollo del microsensory de presión de silicio, siendo un antecedente de los MEMS. Según Vittorio [6] el sensor de presión de silicio fue el primero de los microsensores y el más exitoso. Además la disponibilidad del silicio como materia prima fomentó el desarrollo de técnicas de microsemiconductores cuya variedad ha crecido para abarcar mediciones físicas, químicas y biomédicas. En la tabla 1 se presenta una lista de algunos de los descubrimientos más significativos en la evolución de los MEMS. Entre ellos se tiene en el desarrollo de los transductores de estado sólido y microsensores con técnicas de micromaquinado, que fabrican microactuadores que pueden llevar a la aparición de los primeros mecanismos y motores de nivel microscópico.

El término de MEMS, surgió en 1987 como parte de una serie de talleres que se dieron en Salt Lake City, Utah; Hyannis,

Tabla 1. Historia de fabricación de MEM.

Desarrollo histórico de MEM	Año
Dispositivo de silicio anisotrópico por ataque	Época de 1940
Componente piezoresistivo de silicio	1953
Semiconductor con extensómetros	1957
Sensores de presión de silicio	Época de 1960
Transductores de estado sólido	Época de 1970
Microactuadores	Época de 1980
Micromecanismos y micromotores	De 1987 a 1989
Microsistemas electromecánicos	Posterior a 1988

Massachusetts y en 1988 en Princeton, New Jersey [14]. Estos talleres fueron los precursores en el desarrollo y adopción de esta tecnología. Actualmente los MEMS son considerados como un campo interdisciplinario del conocimiento que hace uso de muchas áreas de la ciencia y la ingeniería para resolver problemas. Helvajian [9] considera algunas ventajas de MEMS sobre la tecnología macroscópica y aspectos que condicionan su desarrollo actualmente:

- Definición de geometrías pequeñas.
- Control dimensional preciso.
- Flexibilidad de diseño y bajo costo.
- Interfase con electrónica de control.
- Facilidad de fabricación.

4. Desarrollo

El estudio se elaboró en tres etapas:

- 1) Evaluación del rendimiento operativo de MEMS utilizados en equipos y sistemas electrónicos de ambientes árido (Mexicali) y marino (Ensenada).
2. Correlación en MatLab [15] de factores climáticos y de contaminación que deterioran las conexiones eléctricas de los MEMS.
3. Microscopia de la estructura dañada de MEMS con fallas eléctricas.

4.1. Ventajas con el uso de los MEMS

Existen mayores ventajas que desventajas con el uso de los MEMS, que son considerados de vital importancia en la IE. Lo más importante es el control del microclima en cuartos limpios donde se fabrican. Los resultados de su aplicación se muestran a continuación.

4.2. Rendimiento operativo de MEMS

En periodos de operación de 80%, que es lo más cercano a su máximo rendimiento, los MEMS realizan funciones sin presentarse fallas eléctricas. En este estudio se evaluaron 10 equipos de telefonía celular en buenas condiciones y 10 con fallas eléctricas, y 10 de marcapasos con las mismas condiciones que los celulares. La tabla 2 muestra los valores para cada MEMS evaluado y su relación con los factores climáticos y ambientales.

La tabla 2 muestra que a valores bajos de HR, temperatura y niveles de concentración del SO_x y Cl⁻, se presentan fallas eléctricas en menor escala que en periodos con factores climáticos de valores máximos del análisis en el 2010. Los valores máximos de HR, temperatura y los contaminantes del aire evaluados en cada ambiente, representan el inicio de la corrosión atmosférica. Los valores para los TC se obtuvieron de análisis en Mexicali y para los MP en Ensenada. La información de contaminantes del aire se recolectó con la técnica de platos de sulfatación para el SO₂ y el método de la vela húmeda para el Cl⁻.

Tabla 2. Fallas eléctricas de MEMS vs. clima y contaminación del aire en Mexicali y Ensenada (2010).
TC: Teléfonos celulares, MP: Marcapasos.

TC	Eficiencia,%		HR,%		Temp.,°C		SO _x ,ppm	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx
1	65	79	64	79	26	38	0.24	0.44
2	68	80	67	76	27	37	0.27	0.47
3	67	81	63	79	28	36	0.27	0.45
4	68	79	58	82	30	35	0.25	0.48
5	69	78	67	81	33	38	0.29	0.46
6	64	80	63	80	28	39	0.30	0.44
7	66	82	67	79	29	40	0.26	0.46
8	67	79	66	77	32	37	0.28	0.47
9	68	80	65	78	30	38	0.25	0.47
10	69	80	62	77	31	38	0.27	0.48

MP	Eficiencia,%		HR,%		Temp.,°C		Cl ⁻ ,mg/m ² .día	
	mín	máx	mín	máx	mín	máx	mín	máx
1	65	81	63	78	26	36	5.7	15.6
2	67	80	67	80	27	35	6.2	17.8
3	68	82	65	81	28	36	6.4	18.4
4	67	79	66	78	27	37	5.9	17.7
5	69	78	68	76	29	36	6.4	17.9
6	68	79	66	77	30	35	6.7	18.2
7	66	80	63	79	26	36	6.9	18.5
8	67	81	65	78	25	36	7.0	19.4
9	68	78	66	73	26	37	6.3	18.4
10	68	80	62	75	27	37	5.8	17.9

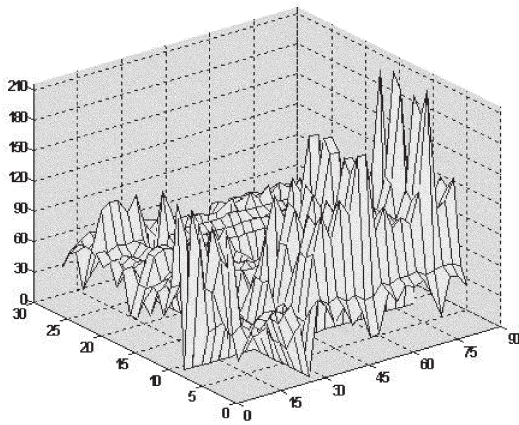


Fig. 1. Correlación de VC, HR y temperatura en Ensenada (2010).

4.3. Análisis numéricos en MatLab

Se realizó una evaluación de los niveles de corrosividad (NC), en ambas ciudades, para conocer la VC que indica el deterioro de conexiones eléctricas de MEMS por corrosión (figuras 1 y 2).

Las gráficas de simulación en las figuras 1 y 2 muestran una correlación al 90% de la VC de MEMS, siendo más alta en

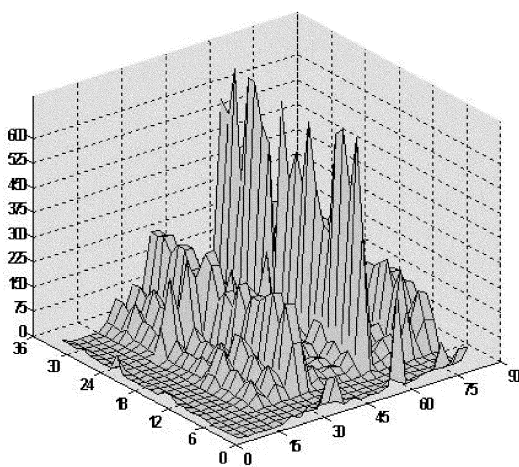


Fig. 2. Correlación de VC, HR y temperatura en Mexicali (2010).

invierno en Ensenada y verano en Mexicali, cuando la humedad está en sus niveles más altos. Esto indica que los MEMS tienden a fallar en promedio, al menos una vez cada tres días en Ensenada y dos veces al día en Mexicali, siendo un valor considerable, por lo cual es necesario evaluar los microclimas de la IE.

4.4. Microscopia de SEM

Los análisis a nivel microscópico representan las microfotografías obtenidas de MEMS que presentaron al menos 10 fallas en una semana y se observan también los que no fallaron tanto en Ensenada como en Mexicali (figuras 3 y 4). A nivel macro no se observan las fallas de los materiales que conforman las estructuras de los MEMS, por lo que debe considerarse siempre utilizar análisis de este tipo para asegurar la calidad requerida de estos dispositivos, donde se requiere la vinculación de la IE de esta región que tiene el presupuesto para los equipos de análisis y las universidades el conocimiento, pero aún existe una brecha muy amplia en esto.

La figura 3 muestra a nivel microscópico una conexión eléctrica de un microactuador MEMS fabricado en una empresa de Mexicali. Este análisis representa un deterioro indicando una VC alta en la zona analizada del diagrama electrónico, como lo muestra la simulación en MatLab, observándose que a niveles mayores a 70% y 30°C, se presenta la mayor VC. Las variaciones drásticas de HR y temperatura aunado a los excesos en los niveles de concentración de SO_2 y Cl^- , son factores de este deterioro. La VC se obtuvo con el método

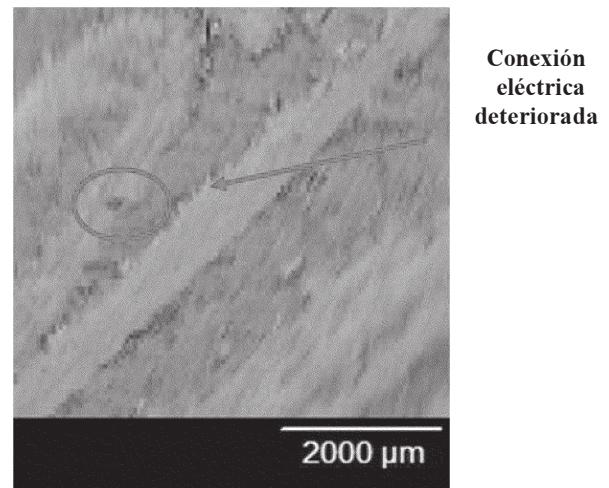
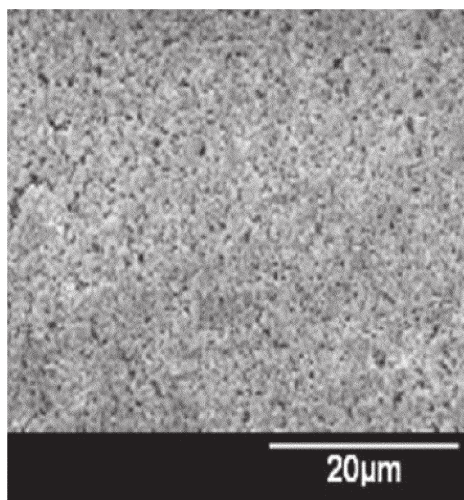


Fig. 3. Conexión eléctrica deteriorada de un microactuador para teléfono celular fabricado en Mexicali (2010).

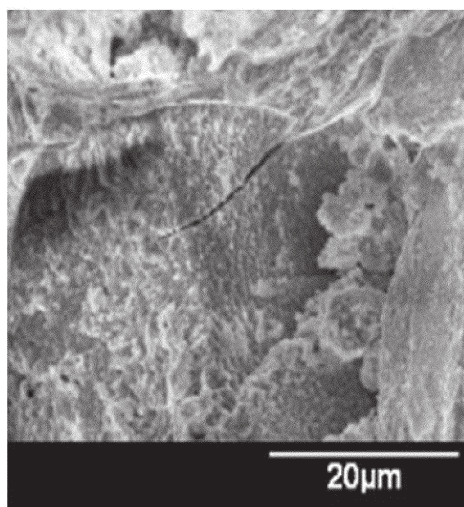
gravimétrico en miligramos con una balanza analítica de ± 0.001 de resolución. En las figuras 4 y 5 obtenidas del SEM, se observan zonas de conexiones eléctricas de MEMS en buen estado y defectuosas con sus conexiones eléctricas deterioradas con productos de corrosión con cloruros en Ensenada y sulfuros en Mexicali. Se debe cuidar constantemente estos aspectos para evitar pérdidas económicas considerables en las plantas industriales.

4.5. Control del clima

El control del clima en interiores de la IE es de gran importancia para evitar la presencia de corrosión. Al observar en este estudio, que se presentaban variaciones aún en niveles bajos de HR y temperatura, indicando que la humedad, fue el factor principal en la generación de la corrosión en ambas

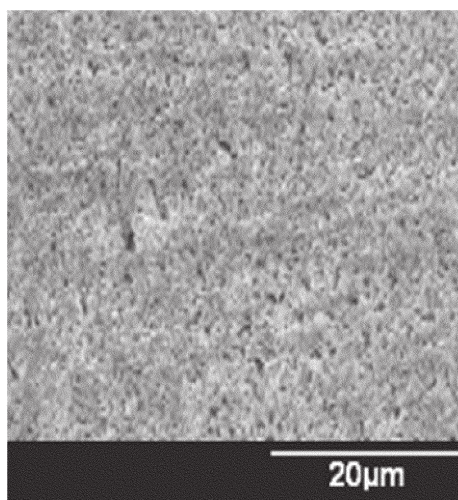


(a)

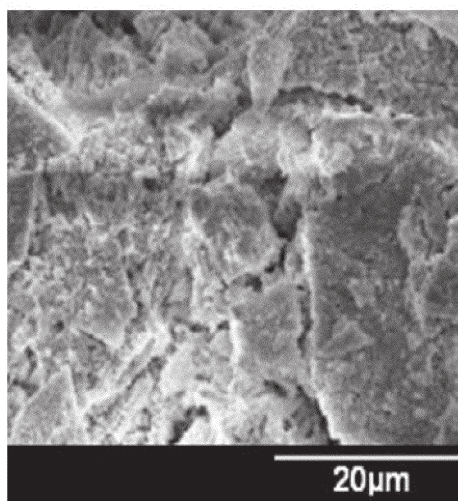


(b)

Fig. 4. Conexión eléctrica de MEMS: (a) en buenas condiciones y (b) deteriorada y con productos de corrosión en Ensenada (2010).



(a)



(b)

Fig. 5. Conexión eléctrica de MEMS: (a) en buenas condiciones y (b) deteriorada y con productos de corrosión en Mexicali (2010).

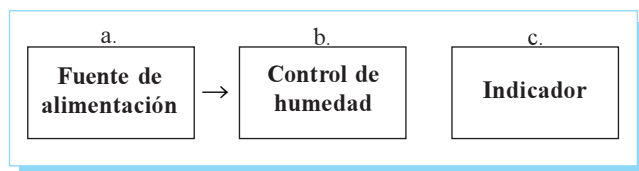


Fig. 6. Dispositivo de control de humedad.

ciudades. Con base en esto, se desarrolló y fabricó un sistema automatizado para el control de humedad con un DE sencillo y de bajo costo (véase figura 6).

La figura 6 muestra el esquema de un sistema de control de humedad con base en lo siguiente:

- Fuente de alimentación.* Suministra el voltaje necesario para la operación del sistema.
- Control de humedad.* Detecta los niveles de humedad absoluta en el aire de interiores de la IE.
- Indicador.* Muestra una señal de acuerdo con los niveles de humedad absoluta detectada.

5. Conclusiones

La miniaturización de dispositivos electrónicos, cada día tiene más auge por las necesidades del mercado a nivel global. Se considera muy importante el desarrollo de nuevas tecnologías a nivel micro principalmente con MEMS, para obtener mejor aprovechamiento de espacios en EE y DE con mayor cantidad de operaciones, fabricándolos más complejos. Una desventaja de los MEMS es la generación de corrosión en su proceso de fabricación, lo que disminuye su rendimiento operativo, cuando se presentan valores de humedad, temperatura y concentraciones altas de cloruros en Ensenada y sulfuro en Mexicali, que originan la corrosión atmosférica y con ello el deterioro de las conexiones eléctricas y su baja productividad. La información de este estudio, se proporcionó a las empresas de las ciudades donde se evaluó el nivel operativo de los MEMS.

6. Referencias

- [1] A. Schoedrer y J. Mathew, *Industrial operations*, Panamerican, 2003.
- [2] D. Hyman, DOD Conference, USA, Army 02-063, 2003.
- [3] F. Sabet Kzem, DOD Conference, USA, Army 02-063, 2003.
- [4] M. D. Cohn, DOD Conference, USA, Army 02-063, 2003.
- [5] Asociación de Maquiladoras de Ensenada (AME), Anuario Estadístico, 2011.
- [6] Asociación de Maquiladoras de Mexicali (AMM), Anuario Estadístico, 2011.
- [7] G. López-Badilla, "Caracterización de la corrosión en materiales metálicos de la industria electrónica", tesis de doctorado, Mexicali, B.C., 2008.
- [8] B. G. Lopez, S. B. Valdez, W. M. Schorr, V. H. Tiznado, y H. G. Soto, "Influence of climate factors on copper corrosion in electronic equipments and devices", *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 2010.
- [9] H. Helvajian, M. Mehregany y S. Roy, Chapter 1: Introduction to MEMS, Microengineering Aerospace systems, USA: Aerospace Press; disponible en: <http://www.aero.org/publications/helvajian/helvajian-1.html>; 1999.
- [10] G. Robertson y K. Fenderson, *Use of control systems industrial activities*, Panamerican Editorial; 2005.
- [11] S. Vittorio, *Microelectromechanical Systems*, disponible en: <http://www.csa.com/discoveryguides/mems/overview.php>; 2001.
- [12] J. Sosa, *Sistemas de Control Lógico Secuencial y Fundamentos de PLCs*, México: Cety Universidad/Engineering Collection, 2006.
- [13] Oakad Hassen, Non linear structural mechanism of micro and nano systems, Openthesis, disponible en: <http://www.openthesis.org/documents/Nonlinear-structural-mechanics-micro-nano-600883.html>, 2010.
- [14] Bateson, R. Bateson, *Introduction to control system technology*, 5ª ed., New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [15] B. H. Duncan, *Walsh An Engineer's Guide to MATLAB, 2e: with Applications Electrical Systems*, Prentice Hall, 2005.

Portal de Portales Latindex

Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.

<http://www.latindex.ppl.unam.mx/>