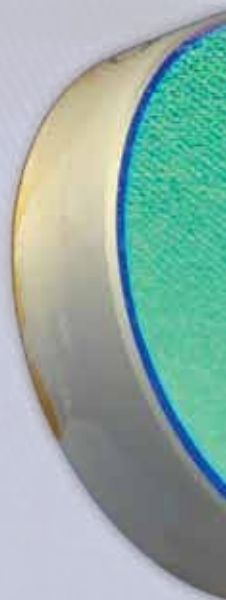
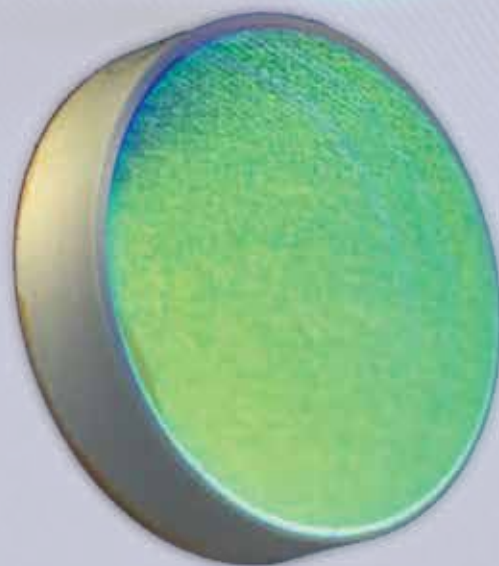




# Microespejos: una mirada a la **microingeniería**

La tecnología MEMS ha permitido el desarrollo de microespejos para múltiples aplicaciones: sistemas de proyección de procesamiento digital de la luz, medicina, telecomunicaciones e industria militar. En este trabajo se presenta la importancia de estos microespejos, su principio de funcionamiento y potenciales aplicaciones. Además, se describen los principales tipos de actuadores usados para generar su movimiento.

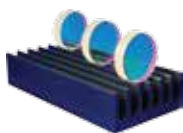
La tecnología de sistemas microelectromecánicos (MEMS) ha permitido el desarrollo de dispositivos de tamaño pequeño, con reducido consumo de potencia, bajo costo, alta sensibilidad y bajo ruido electrónico. Actualmente, la tecnología MEMS tiene un mercado de ocho billones de dólares, con aplicaciones en biotecnología y los sectores automotriz, aeronáutico y militar, entre otros. Sus usos incluyen desde sensores de presión, campo magnético o acelerómetros, hasta manipuladores de células.



El tamaño de los dispositivos MEMS varía entre un micrómetro y unos cuantos milímetros. Para darnos una idea de la escala, el espesor de un cabello humano varía de 60 a 100 micrómetros. La producción de estos dispositivos se basa en los procesos de fabricación de la microelectrónica. Fue en los años sesenta del siglo XX cuando los investigadores se dieron cuenta de que se podía utilizar la tecnología de los circuitos integrados para crear estructuras y mecanismos; sin embargo, no fue hasta los años ochenta y noventa que se realizó un verdadero esfuerzo en el desarrollo de los procesos de fabricación. En esa época, el gobierno estadounidense se dio cuenta del potencial de esta tecnología para la milicia y defensa nacional, así que el Departamento de Energía gestionó la creación de centros de investigación relacionados con tecnología MEMS, como el de Nanodispositivos y Microsistemas de los Laboratorios Nacionales Sandia.

Un dispositivo que se ha desarrollado a lo largo de estos años por sus diversas aplicaciones, desde la industria del entretenimiento hasta las telecomunicaciones o la medicina, es el microespejo. El primer microespejo bien desarrollado técnicamente fue el dispositivo de microespejo digital (DMD, por su siglas en inglés) de la compañía Texas Instruments. Este dispositivo se encuentra en la mayoría de los proyectores que se usan en las escuelas, oficinas y salas de conferencias. El número de espejos utilizados en un proyector depende de su calidad, pero por lo menos se cuenta con 442 368 espejos en los proyectores de más baja resolución.



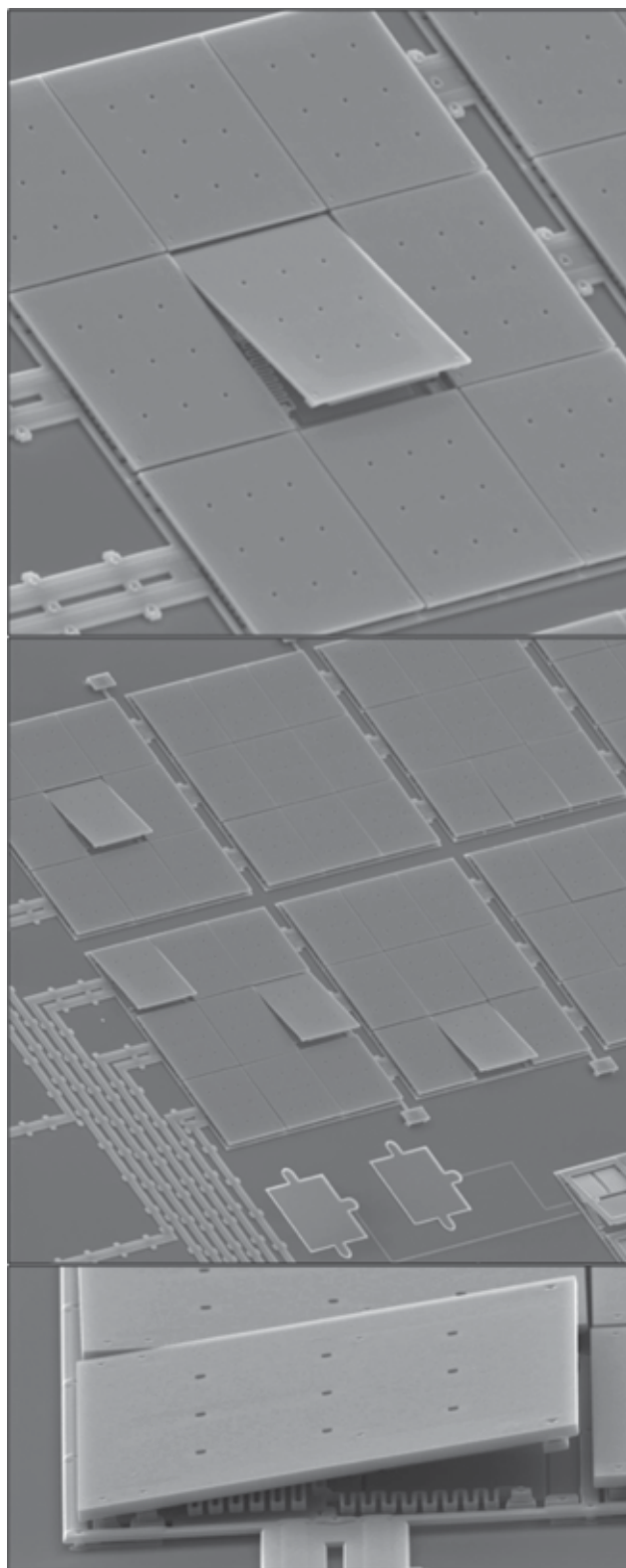


## Procesos de fabricación

La gran mayoría de los microespejos son fabricados usando como material el silicio, el segundo elemento más abundante en nuestro planeta sólo por debajo del oxígeno. Aunque existen alternativas de materiales muy prometedoras para la microfabricación, como los polímeros, el silicio es el material más ampliamente estudiado por la electrónica y la mecánica. El silicio tiene las características mecánicas necesarias para obtener un movimiento rápido y preciso de los microespejos. Estas características son fundamentales para su operación; aunque, para que funcione como espejo también se requiere una capa delgada de metal, depositada en su superficie superior, para reflejar un haz de luz.

Los metales son brillantes en mayor o menor medida debido a que reflejan más fotones (partículas elementales de todas las formas de radiación electromagnética, entre ellas la luz visible) que otros materiales. Ésta es una importante ventaja de los metales, los cuales poseen electrones libres que reflejan a los fotones en su superficie, antes de que sean absorbidos por las capas más profundas. Por lo tanto, es deseable utilizar metales para la capa del espejo. Así, surge la pregunta: ¿qué metales son los más adecuados para los microespejos?

La respuesta incluye el aluminio, el oro, el platino y la plata, los cuales son compatibles con los procesos de microfabricación de estos dispositivos. A continuación, se explica brevemente uno de los procesos utilizados para depositar una capa delgada de metal sobre un microespejo: la deposición física por vapor (PVD, por sus siglas en inglés). Este proceso cuenta con una variedad de métodos de deposición por vacío para depositar una película delgada por medio de la condensación de un vapor que contiene el material deseado. Por ejemplo, se puede utilizar la evaporación térmica, en donde las obleas de silicio que contienen los microespejos se introducen en una cámara de alto vacío. En esta cámara se encuentra un contenedor con el metal que será depositado sobre la superficie de estos dispositivos. El contenedor del metal se calienta por medio de una corriente eléctrica hasta obtener una atmósfera de vapor del metal. Así, cuando el vapor entra en contacto con la superficie, se empieza a condensar para formar una capa delgada de metal que servirá para reflejar un haz de luz.



**Figura 1.** Microespejos para la próxima generación de telescopios espaciales. García, E. J. (2001), "Compound Floating Pivot Micromechanisms", U. S. Patent, núm. 6220561.

Una característica importante de los microespejos es el control de su movimiento, con el cual se puede cambiar su orientación. Actualmente, se han desarrollado formas bastante ingeniosas para controlar el movimiento de estos dispositivos con una gran exactitud. Para este control se debe considerar su tamaño, que puede variar entre 16 y 1 000 micrómetros. ¿Se imaginan controlar el movimiento de un microespejo seis veces más pequeño que el ancho de un cabello humano?

### Principios de funcionamiento

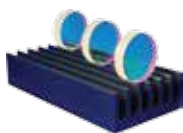
Generalmente se utilizan cuatro tipos de actuadores para generar los movimientos de los microespejos: electrostáticos, térmicos, magnéticos y piezoeléctricos. Como mencionamos anteriormente, en todos los microespejos se utiliza una capa metálica como elemento reflejante, la cual puede ser de aluminio, oro o platino. Los dispositivos orientados mediante fuerzas electrostáticas funcionan considerando el concepto de que cargas iguales se repelen y cargas opuestas se atraen. La superficie del espejo puede operar como un primer electrodo, y un segundo electrodo puede ser depositado en la superficie del sustrato del silicio, debajo del espejo. Así, al conectar los dos electrodos a una fuente de voltaje, se puede ajustar la intensidad y frecuencia de la fuerza electrostática entre los electrodos. De esta forma, se pueden controlar las magnitudes y frecuencias de los movimientos de los microespejos.

Con respecto a los actuadores térmicos, se requieren vigas empotradas en un extremo y fabricadas de materiales con diferentes coeficientes de dilatación térmica, o vigas del mismo material pero con diferente forma geométrica, con la finalidad de variar su resistencia térmica. Al conectar estas vigas a una fuente de voltaje, se genera un incremento de temperatura que ocasiona diferentes deformaciones térmicas en las vigas. Si en la parte superior se coloca la viga con mayor coeficiente de dilatación, entonces el espejo tendrá un movimiento hacia abajo; si el arreglo de vigas es contrario, entonces este dispositivo sufrirá un movimiento hacia arriba. Utilizando un arreglo de vigas se puede conseguir un sistema de posicionamiento para el dispositivo. Por lo tanto, un microespejo conectado con actuadores térmicos podría obtener un movimiento inclinado.

Por su parte, los actuadores magnéticos pueden utilizar materiales magnetostrictivos, los cuales tienen la característica de sufrir un cambio en sus dimensiones cuando son expuestos a un campo magnético. Además, la deformación de estos materiales puede alterar el campo magnético que los rodea, lo cual es una característica para la fabricación de microespejos inalámbricos. Esto se puede conseguir aplicando un campo magnético controlable, generado por una bobina, a la viga soporte del espejo. Así, el cambio controlado del campo magnético provocará una deflexión de la viga, lo cual permitirá controlar el movimiento del espejo. Desafortunadamente, el volumen ocupado por estas bobinas incrementa el tamaño de los dispositivos. Además, la fabricación de microespejos con materiales magnetostrictivos a nivel microescala no es un proceso estándar económico.

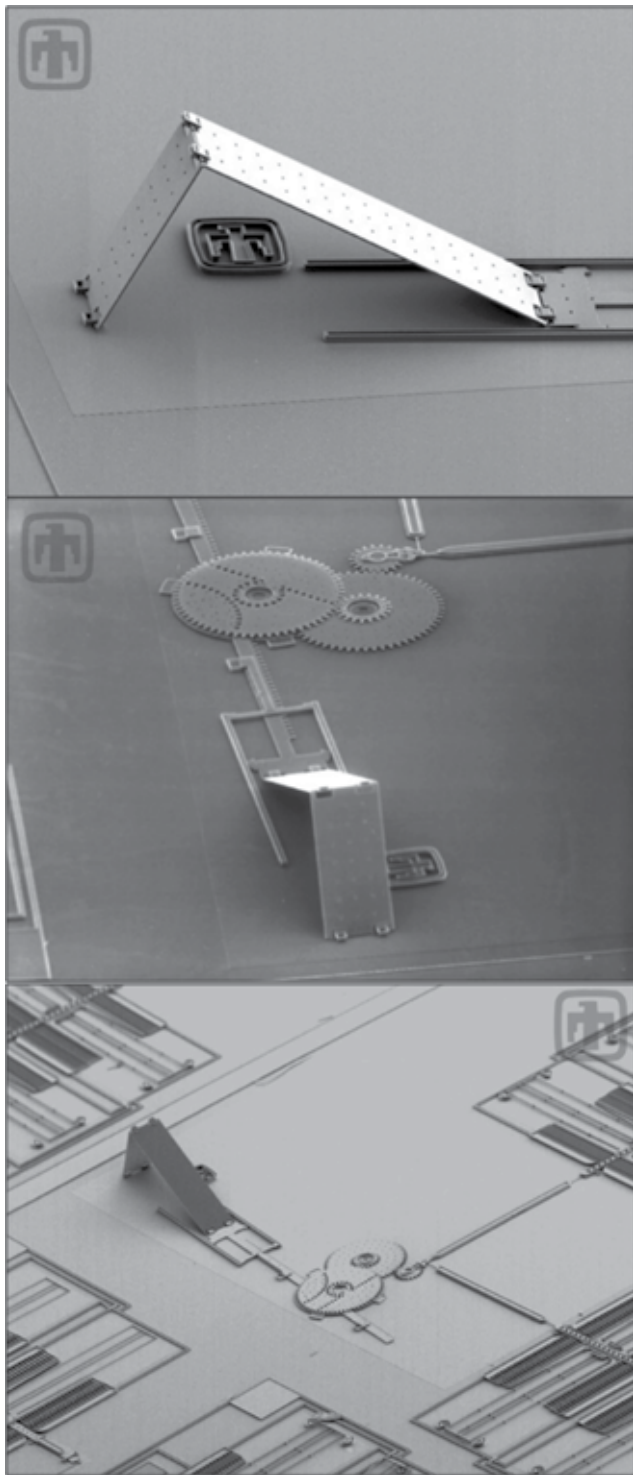
Finalmente, los microespejos activados con actuadores piezoeléctricos tienen una respuesta de alta velocidad, así como bajo consumo de corriente y voltaje. Un material piezoeléctrico sometido a una deformación mecánica puede generar una carga eléctrica, y viceversa; es decir, un cambio en su carga eléctrica puede producirle una deformación mecánica. Estos materiales piezoeléctricos ofrecen grandes cualidades para la fabricación de microespejos, como una muy alta velocidad de respuesta y un bajo consumo de potencia.

Varios factores deben ser considerados en la selección del tipo de actuador más adecuado para un espejo. Por ejemplo, en la tecnología usada para aplicaciones de proyección, los actuadores electrostáticos integrados en la estructura del espejo son los más efectivos. Esto es debido a su buena precisión, bajo consumo de energía y facilidad de adaptarse a procesos de microfabricación comerciales, lo cual reduce sus costos de producción. Para aplicaciones médicas, donde es necesario una alta confiabilidad en tamaños muy reducidos, los actuadores piezoeléctricos pueden ser lo más adecuado, aunque su costo sea mayor. Ahora, cuando el tamaño no es un problema, pero se requiere una gran desviación del haz de luz, se pueden utilizar arreglos mecánicos como los desarrollados en los Laboratorios Nacionales Sandia, en los que un sistema de actuación electrostático se acopla a una transmisión formada por engranes y cremalleras.



## Aplicaciones para la proyección de imágenes

Retomando la tecnología DMD, la compañía Texas Instruments ofrece el chip de Procesamiento Digital



**Figura 2.** Microespejo. Cortesía de Laboratorios Nacionales Sandia, Albuquerque, Nuevo México.

de la Luz (DLP, por sus siglas en inglés), que es una tecnología de proyección de imágenes basada en microespejos automatizados. El chip DLP incluye aproximadamente dos millones de espejos en su versión de mejor calidad de imagen, en donde cada espejo tiene una dimensión de  $16 \times 16$  micras. El espejo tiene la función de un pixel y se pueden colocar en dos posiciones: encendido o apagado.

Imaginen que tienen un arreglo de miles de espejos en un chip y los iluminan con luz blanca. Cuando este dispositivo está en la posición de encendido, puede reflejar la luz hacia los lentes del proyector; cuando se encuentra en la posición de apagado, el haz de luz nunca sale de la caja de proyección. Así, se obtiene un pixel brillante u oscuro en la pantalla.

Los espejos del chip DLP son capaces de cambiar de una posición a otra en sólo 10 microsegundos, es decir, un tiempo 210 000 veces menor al empleado por un auto de Fórmula Uno para cambiar de velocidad de 0 a 100 km/h. Con esta increíble velocidad se pueden proyectar imágenes en blanco y negro con una altísima calidad, debido a que nuestros ojos observan estos cambios entre blanco y negro como una amplia gama de tonalidades de gris, aproximadamente 1 024 distintas formas de gris.

El siguiente paso es agregar el color a las imágenes, lo que en los proyectores convencionales se logra mediante una superficie de colores. Ésta consiste en un disco con micas de colores localizado en la trayectoria del haz de luz blanca y con la capacidad de girar de una manera controlada. Generalmente, el disco consta de una mica roja, una azul y otra verde. Con estos haces de luz de colores, el movimiento de los espejos y una muy precisa sincronización, se obtienen las imágenes de los proyectores convencionales usados en los salones de clases. Además, en los proyectores de alta definición, el disco con micas de colores se puede remplazar por un prisma que descompone la luz blanca en tres haces de luz de los colores mencionados anteriormente. También, estos proyectores disponen de un chip DLP para cada color. Posteriormente se combinan los haces de luz en el juego de lentes del proyector, con lo que se obtiene una proyección de cerca de 35 trillones de colores diferentes para crear imágenes increíblemente reales.

Aunque los sistemas DLP son los más comunes, existen otras tecnologías de proyección. El proyector de tubo de rayos catódicos (TRC) es la más antigua de todas y está casi en extinción, ya que sólo es adecuada para instalaciones fijas debido a que los dispositivos son grandes y muy pesados. Por otro lado, tenemos los sistemas de pantalla de cristal líquido (LCD). Esta tecnología también es bastante común en sistemas domésticos y portátiles, pues tiene la ventaja de producir imágenes más brillantes que las obtenidas con un chip DLP. Sin embargo, es muy probable la aparición de píxeles muertos (imágenes pixeladas).

### Aplicaciones en el campo de la medicina

Diversos estudios han demostrado que el número de sobrevivientes a cáncer de mama, colon, recto, próstata y de cavidad oral aumenta 95% cuando estos tipos de cánceres son detectados en una etapa precancerígena. Por lo tanto, la detección temprana es esencial para reducir la mortalidad en pacientes con cáncer. Algunos investigadores expertos en este tema han estimado que 85% de los distintos tipos de cáncer se genera dentro de la capa epitelial, esto es, en capas internas de los órganos; por ello, es de suma importancia desarrollar métodos para detectar y diagnosticar el cáncer justo por debajo de la superficie de los tejidos.

Existe una técnica llamada Tomografía de Coherencia Óptica (OCT, por sus siglas en inglés) la cual, mediante un escaneo, puede obtener imágenes de muestras biológicas con alta resolución. Basada en un interferómetro de luz infrarroja, es capaz de tomar imágenes del interior de un tejido con una profundidad de hasta dos o tres milímetros. El OCT promete ser una herramienta muy importante para muchas situaciones clínicas, en donde se tiene el objetivo de lograr biopsias totalmente ópticas (procedimientos no invasivos) y así reducir el dolor o la molestia en los pacientes. También, se puede utilizar como guía en procedimientos quirúrgicos mediante endoscopia. Por ende, es necesario alcanzar la miniaturización de esta técnica OCT.

La tecnología MEMS ofrece la posibilidad de crear sistemas compactos, ligeros y robustos para efectuar endoscopias mediante tomografía de coherencia óptica, con la fabricación de un interferómetro con microespe-



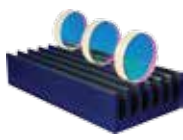
jos. En la literatura del tema se reportan dispositivos a los cuales se ha logrado introducir arreglos ópticos dentro de un catéter (tubo con 3 mm de diámetro) para exploración en el cuerpo humano y con ellos se han obtenido buenas resoluciones de imagen. Actualmente, las endoscopias mediante tomografía de coherencia óptica permiten al médico tomar una muestra del lugar exacto en donde se encuentra un tumor. Con esta técnica, el proceso de recuperación del paciente sería más corto y se podría lograr una biopsia 100% no invasiva en un futuro.

### Otras aplicaciones

Un gran campo de aplicación de los microespejos se encuentra en las telecomunicaciones, en donde se pueden utilizar estos dispositivos para direccionar señales en redes de fibra óptica, lo que implicaría una disminución de tiempo y dinero. Además, se utilizan métodos de medición óptica en distintos tipos de sensores, como acelerómetros, sensores de campo magnético y diversos biosensores que cuentan con microespejos en sus estructuras. Los sensores con sistemas ópticos de detección pueden ser inmunes a interferencias electromagnéticas y más confiables que otros sistemas de medición.

### Conclusiones

La tecnología MEMS tiene un gran potencial en el desarrollo de microespejos para aplicaciones biomédicas y de los sectores de telecomunicación, militar y



electrónica de consumo. Los espejos usados en la electrónica de consumo han sido ampliamente estudiados; por ende, son uno de los dispositivos MEMS más confiables. Sin embargo, existen retos en otras aplicaciones: la tendencia para esta tecnología está encaminada a equipo médico y militar, pues se deben crear dispositivos altamente precisos y confiables.

Un ejemplo es el microespejo desarrollado para la siguiente generación de telescopios espaciales, a cargo del doctor Ernest J. Garcia, en los Laboratorios Nacionales Sandia. Justamente en la sede de estos laboratorios en Albuquerque, Nuevo México, una red de universidades y centros de investigación mexicanos cuenta con la posibilidad de fabricar sus propios diseños de dispositivos MEMS gracias al Programa Nacional para el Desarrollo de MEMS. Además, varios centros de investigación y universidades de nuestro país están trabajando en áreas relacionadas con tecnología MEMS. Sin embargo, se necesita más apoyo e inversión en esta tecnología, tanto por parte del gobierno como de la iniciativa privada.

**Adrián Herrera Amaya** estudió Ingeniería Mecánica en la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato y actualmente cursa la maestría en Ingeniería Mecánica en la misma institución. Ha realizado distintas estancias de investigación en México y Estados Unidos. También ha participado en concursos internacionales de MEMS, como la *University Alliance Competition*, organizada por los Laboratorios Nacionales Sandia y la Universidad de Nuevo México en Albuquerque. Es miembro de la *American Society of Mechanical Engineering* (ASME) desde 2010 y miembro de la Sociedad Internacional de Honor en Ingeniería Mecánica Pi Tau Sigma desde 2015. Sus áreas de interés incluyen diseño mecánico, ingeniería biomédica y método del elemento finito. [herreraugto@gmail.com](mailto:herreraugto@gmail.com)

**Agustín L. Herrera May** estudió Ingeniería Mecánica y Eléctrica en la Universidad Veracruzana, así como la maestría y el doctorado en Ingeniería Mecánica en la Universidad de Guanajuato. Actualmente es investigador del Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología (MICRONA) de la Universidad Veracruzana. Ha publicado más de 40 artículos científicos en revistas indexadas y

es miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Sus áreas de interés incluyen los sistemas microelectromecánicos y nanoelectromecánicos, vibraciones mecánicas, fractura y método del elemento finito.

[leherrera@uv.mx](mailto:leherrera@uv.mx)

**Luz A. Aguilera Cortés** nació en León, Guanajuato, en 1962. Recibió los títulos de licenciatura (1988), maestría (1990) y doctorado (1995) en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Guanajuato. En 1988 se unió a la Facultad de Ingeniería de la misma institución, donde fungió como secretario académico de 1995 a 1997. Actualmente es profesor de Ingeniería Mecánica. Ha servido como revisor de proyectos financiados por el gobierno mexicano. Ha publicado más de 25 artículos científicos en revistas indexadas y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel I. Es miembro de la *American Society of Mechanical Engineering* (ASME) desde 1999. Sus áreas de interés incluyen vibraciones mecánicas, mecatrónica, MEMS, ergonomía y diseño mecánico.

[aguilera@ugto.mx](mailto:aguilera@ugto.mx)

### Lecturas recomendadas

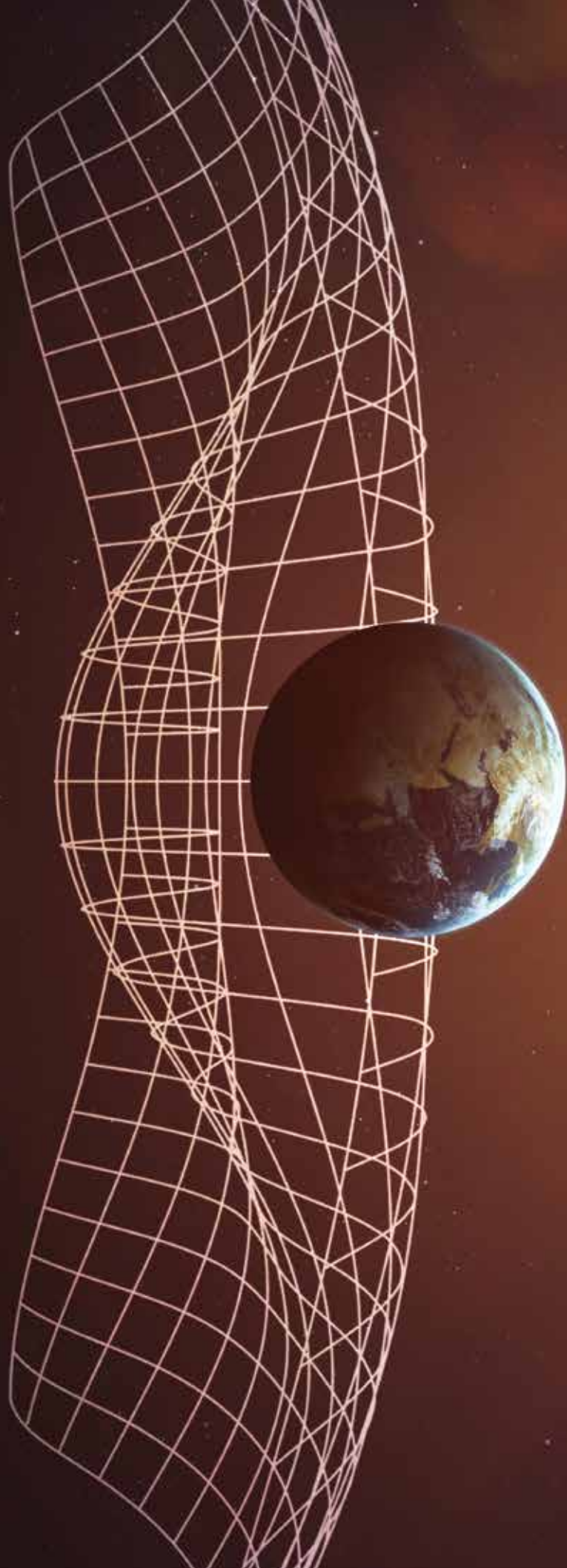
Estrada, H. (2009), "Establecimiento de un Programa Nacional para el Diseño y Fabricación de Prototipos MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), proyecto financiado por FORDECYT-Conacyt 115976", en *Integración regional para el surgimiento de territorios innovadores*, México, Conacyt-Foro Consultivo Científico y Tecnológico, pp. 20-29. Disponible en: <[http://www.foroconsultivo.org.mx/libros\\_editados/fomix\\_regional.pdf](http://www.foroconsultivo.org.mx/libros_editados/fomix_regional.pdf)>, consultado el 10 de febrero de 2016.

Herrera-May, A. L., L. A. Aguilera-Cortés, P. García-Ramírez y E. Manjarrez (2009), "Resonant Magnetic Field Sensors Based On MEMS Technology", *Sensors*, 9:7785-7813.

Kaajakari, V. (2009), *Practical MEMS*, Las Vegas, Small Gear Publishing.

Sandia National Laboratories (2008), "MicroElectroMechanical Systems (MEMS)", *Sandia National Laboratories*. Disponible en: <<http://mems.sandia.gov/>>, consultado el 10 de febrero de 2016.

Texas Instruments (2009), "Cómo funciona la tecnología DLP", *Tecnología DLP*. Disponible en: <<http://www.ti.com/dlp-technology/es/technology/how-dlp-works/default.htm>>, consultado el 10 de febrero de 2016.



**DE ACTUALIDAD**

**NOTICIAS DE LA AMC**