

Generación de energía eléctrica con **micromáquinas**

Adrián **Herrera Amaya**
L. A. **Aguilera Cortés**
A. L. **Herrera May**

La autonomía es un requisito para la eficacia

Jack Lang

El mundo está repleto de dispositivos electrónicos, son parte de nuestra vida cotidiana y tienen una infinidad de aplicaciones. Aunque su operación depende de una batería, la cual tiene que ser recargada y posee una cierta vida útil. Un ejemplo son los marcapasos, dispositivos electrónicos que ayudan a mantener el funcionamiento del corazón, cuyas baterías tienen una vida útil de unos 6 a 15 años. Sin embargo, existe una forma de aumentar esta vida útil en gran medida mediante micromáquinas generadoras de energía.

En diciembre de 1959, el premio Nobel de física Richard Feynman impartió una conferencia llamada “Hay mucho espacio en el fondo” (*There is plenty room at the bottom*), en la que abordó el desafío de manipular y controlar cosas en una escala muy pequeña. Desde aquel entonces, el doctor Feynman

visualizó el enorme campo de aplicación para la micro y nanoingeniería, con esto inspiró a muchos investigadores a trabajar para comprender la física a una escala muy pequeña.

Un campo de aplicación de la microingeniería es la fabricación de generadores de energía eléctrica por medio de la tecnología de Sistemas Microelectromecánicos (MEMS). Esta tecnología permite el desarrollo de dispositivos con tamaños entre 1 micrómetro y 1 milímetro, los cuales incluyen elementos mecánicos y electrónicos para realizar funciones de detección, procesamiento y control de una señal. Así, los dispositivos MEMS pueden tener longitudes similares a las del grosor de un cabello humano y presentar importantes ventajas como tamaño pequeño, peso ligero, bajo consumo de energía, reducido costo de fabricación y alta sensibilidad.

Los dispositivos MEMS que son utilizados para generar energía eléctrica son equivalentes a la planta de energía eléctrica que proporciona electricidad a nuestros hogares. En este tipo de plantas se emplea un fluido para mover una turbina, que a su vez hace girar un generador que convierte la energía mecánica a eléctrica. Generalmente, en estas plantas se tienen tres tipos diferentes de máquinas: turbinas, generadores y motores eléctricos. Estos dos últimos son estructuralmente iguales, con la diferencia de que un generador transforma energía mecánica en eléctrica y el motor lo contrario.

Otras máquinas generan energía eléctrica aprovechando fuentes de energía que ya se encuentran en el ambiente, la tecnología verde a microescala. Un ejemplo son las micromáquinas que aprovechan las vibraciones mecánicas (movimientos) como en los relojes de pulsera automáticos, en los que el movimiento del brazo puede proporcionarle cuerda al reloj. Estos son una solución muy interesante para suministrar energía a dispositivos médicos como el marcapasos.

MICROFABRICACIÓN

El diseño de máquinas en la microescala es diferente a aquellas convencionales en la macroescala. Esto debido

a la existencia de nuevos fenómenos físicos que afectan significativamente el comportamiento mecánico de las máquinas fabricadas con tecnología MEMS. Generalmente, esta tecnología tiene tres diferentes procesos de fabricación: el micromacizado en volumen, superficial, y LIGA (significa litografía, electrodepositación y moldeo). Por ejemplo, la Figura 1 muestra un micromotor fabricado en un proceso de micromacizado superficial en los Laboratorios Nacionales Sandia de Albuquerque, Nuevo México. Este micromotor contiene dos dientes tipo cuña que permiten la rotación de un engrane central cuando las dos vigas paralelas son desplazadas en una dirección horizontal.

A continuación se establece una analogía entre la construcción de una casa y los métodos de fabricación de micromáquinas.

Primero se colocan los cimientos, una losa plana de cemento, después se deposita arena hasta obtener la altura deseada para el segundo piso. En esta capa de arena se realizan agujeros donde estarán las columnas que sostendrán al segundo piso. Posteriormente, se deposita una segunda capa de cemento para llenar los agujeros y hacer el segundo piso. Este proceso se repite para los niveles de piso deseados, y después que el cemento esté completamente endurecido, se quitará toda la arena con agua a presión. De esta forma, la arena será retirada y se obtendrá la estructura de la casa.

Ahora bien, en la tecnología MEMS, en vez de cemento se utiliza polisilicio y metales como aluminio, cobre u oro para fabricar la estructura de la micromáquina, y

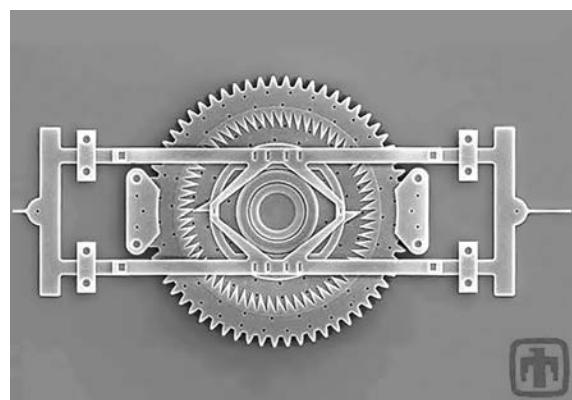


Figura 1. Micromotor fabricado en micromacizado superficial. Cortesía de Laboratorios Nacionales Sandia, Albuquerque, Nuevo México, Estados Unidos.

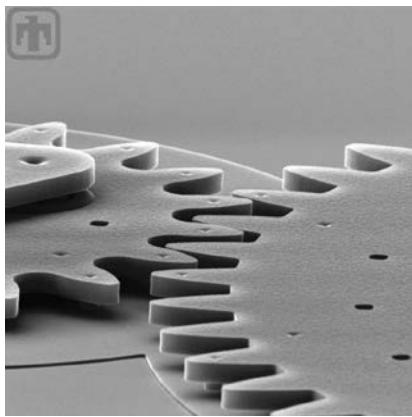


Figura 2. Microengranes fabricados en un proceso de micromaquinado superficial. Cortesía de Laboratorios Nacionales Sandia, Albuquerque, Nuevo México, Estados Unidos.

dioxido de silicio para las capas de sacrificio (la arena en la casa). Para entender la diferencia entre los tres diferentes procesos de fabricación, se explicará de manera general cada uno.

Micromaqinado en volumen. Este proceso se basa en el grabado de una oblea de silicio para obtener la forma de la estructura mecánica de la micromáquina o dispositivo. Generalmente, este grabado se puede realizar con un ataque de iones reactivos y por sustancias químicas. Con el grabado de iones reactivos se pueden generar superficies con espesores superiores a $100 \mu\text{m}$ (espesor promedio de un cabello) y con relaciones de aspecto (longitud/espesor de la superficie) de 100 a 1.

Micromaqinado superficial. Este proceso es muy similar a la analogía de la construcción de la casa, en la cual se fabrican microestructuras mediante la deposición de capas de diferentes materiales sobre un sustrato de silicio (oblea) donde se genera y se obtiene la forma deseada mediante fotolitografía y grabado. En general, se utilizan capas estructurales y de sacrificio. Estas últimas son removidas al final del proceso de fabricación. La Figura 2 muestra detalles de los dientes de dos microengranes fabricados mediante un proceso de micromaqinado superficial en los Laboratorios Nacionales Sandia.

LIGA. Este proceso es utilizado para fabricar microestructuras con una relación de aspecto muy grande, lo cual permite microestructuras muy delgadas y altas. Esto se logra mediante un molde que comúnmente es de polimetilmetacrilato (PMMA). En un sustrato de

silicio se deposita una capa de PMMA y se usa una máscara con el patrón geométrico de la microestructura a generar, la cual es grabada con rayos X. Así, se obtiene el molde de PMMA y después se realiza la deposición del metal sobre el molde para fabricar la microestructura.

MICROMOTORES Y MICROGENERADORES

Los micromotores y microgeneradores son micromáquinas que transforman energía eléctrica a mecánica y viceversa. Estas funcionan bajo el mismo principio de los motores eléctricos convencionales usados en nuestras casas. Por ejemplo, la bomba de agua tiene motores eléctricos que operan con electromagnetismo para generar una fuerza motriz. En función de la alineación de los polos de un imán, se puede atraer o rechazar otro imán. En los motores se utiliza la electricidad para producir campos magnéticos opuestos, lo cual puede permitir el movimiento de un rotor.

Estas micromáquinas tienen dos elementos principales: un estator (estático) y un rotor (móvil). En el caso a microescala, el motor tiene un diseño más sencillo que los motores convencionales debido a que cuenta con dos discos, uno es el estator (empotrado en la base del micromotor) y el otro el rotor. En el estator se realiza la deposición de los electrodos para generar campos magnéticos, y en el rotor se utilizan polos magnéticos. En ambos se graba un microcanal en sus orillas para albergar micro-rodamientos, los cuales permiten mantener separado el rotor del estator. Así, el campo magnético producido en los electrodos puede inducir una fuerza magnética en los polos del rotor para obtener una fuerza tangencial. Con la adecuada sincronización de los electrodos se puede mantener un movimiento rotatorio en la parte móvil del micromotor (Figura 3).

Generalmente, para fabricar un micromotor se utiliza un proceso combinado de micromaqinado en volumen y superficial. Con el micromaqinado en volumen se generan los discos que integran al estator y al rotor; en el caso del estator se producen los micro-rodamientos y después se efectúa la deposición de los electrodos. En el rotor se generan los polos y el canal para los micro-rodamientos. Además, en ocasiones el rotor es

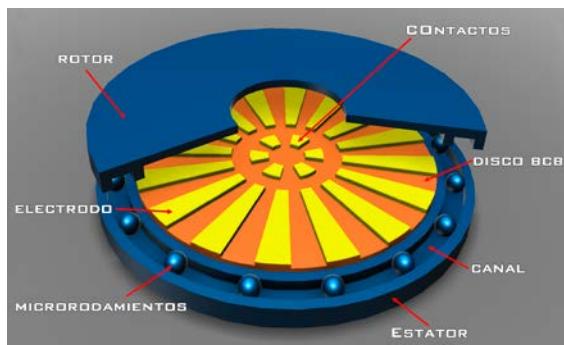


Figura 3. Elementos principales de un micromotor.

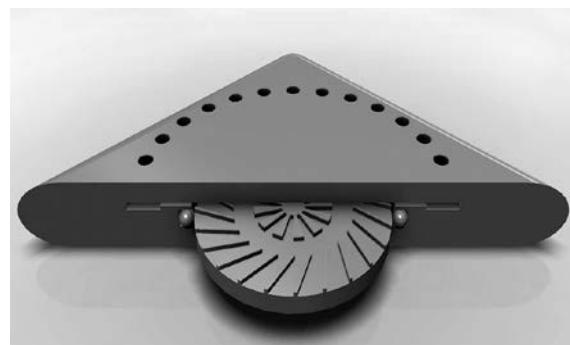


Figura 4. Dibujo en 3D de una microturbina.

protegido por una delgada capa de carburo de silicio (SiC) para reducir la fricción generada en los rodamientos y mejorar la eficiencia del motor.

MICROTURBINAS

Una turbina es una máquina que transforma la energía cinética de un fluido en energía mecánica (par torsional). Este fluido puede ser una corriente de agua, vapor de agua o aire. Para generar el movimiento del rotor, este cuenta con álabes (superficies unidas al rotor) de tal forma que el fluido en movimiento circula a través de ellos y produce una fuerza tangencial que impulsa y hace rotar nuestro eje.

Para ilustrar una microturbina (Figura 4) se explicará el funcionamiento y fabricación de una turbina de flujo radial, en la que el fluido fluye en dirección radial hacia el centro del rotor. La turbina cuenta con una parte fija que es la carcasa de la turbina y dentro de esta se encuentra el rotor. En este diseño se utilizan micro-rodamientos localizados en la periferia del rotor. La carcasa tiene orificios en su parte superior, por los cuales ingresa el fluido de trabajo, el cual gira el rotor.

La fabricación de una microturbina es más complicada que la de un micromotor; para ello se utiliza un proceso combinado de micromaquinado en volumen y superficial, para lo que se emplean dos obleas de silicio por separado, a las cuales se graba el microcanal por donde se localizarán los micro-rodamientos y después se efectuará la deposición de una capa para unir las dos obleas. Antes de unirlas, se realiza la deposición

manual de los micro-rodamientos en la parte superior de la oblea. Además, se generan los álabes y los canales por donde circulará el aire. Asimismo, en la parte superior e inferior se elimina material del microcanal para liberar el rotor del resto de la estructura. Finalmente, en la oblea superior se graba un orificio central (salida del aire) y varios orificios en forma circular que serán la entrada del aire.

GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Existen dos importantes métodos (electromagnético y piezoelectrónico) para transformar la energía causada por las vibraciones mecánicas en energía eléctrica. En el electromagnético se utiliza un campo magnético variable para inducir una corriente eléctrica en un material conductor (fenómeno llamado inducción); es decir, si colocamos imanes cerca de una bobina de metal (alambre conductor enrollado en un cilindro) y estos se mueven por vibraciones mecánicas, entonces se inducirá una corriente eléctrica en la bobina. En cuanto al fenómeno piezoelectrónico, se emplean materiales piezoelectrónicos, los cuales presentan una estructura cristalina con una característica muy interesante. Estos cristales al ser deformados mecánicamente adquieren una polarización eléctrica que genera una diferencia de voltaje eléctrico y una corriente eléctrica.

Una micromáquina diseñada para obtener energía eléctrica aprovechando el movimiento humano recibe el nombre de microgenerador (Figura 5) y utiliza los métodos electromagnético y piezoelectrónico. La unión de ambos métodos es debida a la naturaleza de las vibraciones mecánicas relacionadas con el movimiento



Figura 5. Microgenerador propuesto para obtener energía eléctrica del movimiento humano.

humano. Este microgenerador tiene en su centro una masa vibratoria (con imanes, generalmente de neodimio), la cual es unida a un marco fijo mediante vigas flexibles (tipo resorte) de material piezoelectrico. Además, alrededor de su centro de masa vibratoria es colocada una bobina de cobre que está unida a un marco fijo. Así, el movimiento humano permitirá la oscilación de la masa vibratoria y las vigas flexibles piezoelectricas, lo que permitirá a su vez la generación de energía eléctrica mediante ambos métodos, electromagnético y piezoelectrico. Podemos imaginar que este tipo de dispositivos puede proporcionar energía a un marcapasos, para lo cual solo se requeriría su conexión eléctrica a un pequeño circuito regulador de potencia y una pequeña batería para asegurar una corriente continua. De esta forma podemos suministrar energía por más tiempo al marcapasos que la proporcionada por una batería. Además, se generaría menos daño ambiental debido a que la fabricación de baterías químicas da lugar a serios daños para el medio ambiente.

Las principales micromáquinas diseñadas en tecnología MEMS son los micromotores, microgeneradores y las microturbinas. Estas micromáquinas pueden utilizarse para la generación de energía, la cual puede ser una solución al uso de baterías en los dispositivos electrónicos portátiles. Sin embargo, se necesita mucho trabajo de investigación para desarrollar una micromáquina que sustituya a una batería.

El proceso de desarrollo de micromáquinas está dividido en varias etapas. Primero, se empieza con una idea o diseño inicial de la micromáquina, para posteriormente (en una segunda etapa) ejecutar un análisis multífísico que evalúe su comportamiento

electromagnético y mecánico (desplazamientos, esfuerzos y desgaste). Estos análisis se pueden efectuar mediante modelos analíticos (cálculos realizados por el diseñador) y/o paquetes especializados de cómputo (por ejemplo, ANSYS, COMSOL, CoventorWare e IntelliSuite) basados en métodos numéricos. Con estos análisis se puede obtener un re-diseño de la micromáquina propuesta inicialmente hasta encontrar la configuración geométrica y la dimensión ideal que optimicen su funcionamiento. En una tercera etapa, se realiza en computadora el dibujo y verificación final del diseño optimizado de la micromáquina, el cual considera las reglas de fabricación del proceso de micromáquinado elegido por el diseñador. La cuarta etapa involucra la fabricación de la micromáquina en laboratorios especiales de micromáquinado. La siguiente etapa incluye pruebas del funcionamiento y confiabilidad para comprobar que cumpla con las especificaciones del diseño original. Si estas especificaciones son satisfechas, entonces la micromáquina fabricada puede ser comercializada.

La mayoría de las micromáquinas que abordamos en esta revisión han sido desarrolladas por diferentes investigadores hasta llegar a la etapa de caracterización de su funcionamiento a nivel laboratorio. Sin embargo, se necesitan más pruebas de confiabilidad para poder comercializar las micromáquinas en tecnología MEMS, lo cual representa un gran reto de investigación.

Revisando la literatura podemos encontrar micromáquinas en tecnología MEMS que pueden generar potencia eléctrica del orden de miliwatts. Entre las aplicaciones futuras de las micromáquinas se encuentran las siguientes: suministro de combustibles, suministro de energía a dispositivos electrónicos portátiles, sistemas de ecografía intravascular, cirugía en microescala, microsistemas de suministro de fármacos, endoscopía, microescáneres, microsistemas de enfriamiento, microensambles y control de los movimientos de microrrobots. Sin embargo, la mayor parte del esfuerzo hasta el momento se ha enfocado en mejorar por separado cada una de estas micromáquinas y se han obtenido avances interesantes, pero aún falta trabajar en su acoplamiento.



© Enrique Soto, Mesa con fotografías de la Casa de los Arcos, 2015.

Otro problema de una microplanta de generación de energía es la necesidad de microquemadores, los cuales requieren materiales adecuados para su fabricación. Un aspecto adicional es la obtención de energía por vibraciones mecánicas. Esta, por su parte, es una alternativa más viable y demandada para suministrar energía eléctrica a dispositivos electrónicos de bajo consumo de potencia, como son pequeños transmisores inalámbricos e implantes médicos.

B I B L I O G R A F Í A

Laboratorios Nacionales Sandia. <http://www.sandia.gov/mstc/mems/>

Laboratorio de Nanofabricación de la Universidad de Utah. https://www.nanofab.utah.edu/video/watch_video.php?file=MEMSmovie_0002.flv.

Arnold DP, Das S, Cros F, Zana I, Allen MG, Lang JH (2006). Magnetic induction machines integrated into bulk-micromachined silicon. *Journal of Microelectromechanical Systems* 15(2): 406-414.

Ghalichehian N, Modafe A, Beyaz MI, Ghodssi R (2008). Design, Fabrication, and Characterization of a Rotary Micromotor Supported on Microball Bearings. *Journal of Microelectromechanical Systems* 17(3): 632-642.

McCarthy M, Waits CM, Ghodssi R (2009). Dynamic Friction and Wear in a Planar-Contact Encapsulated Microball Bearing Using an Integrated Microturbine. *Journal of Microelectromechanical Systems* 18(2): 263-273.

Adrián Herrera Amaya
herreraugto@gmail.com

L. A. Aguilera Cortés
División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca
Universidad de Guanajuato

A. L. Herrera May
Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología
Universidad Veracruzana