

# **MICROTECNOLOGÍAS**

## **Una breve visión actual**

*Comunicación efectuada  
por el Académico Titular Ing. Antonio Adrián Quijano  
en la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires,  
en la sesión plenaria del 29 de septiembre de 2008*



## 1.- Introducción

En esta comunicación intentaremos dar una referencia acerca de los conceptos en que se basa un campo muy actual del conocimiento, que resulta fundamental para el desarrollo de múltiples aplicaciones en muy variadas áreas de la ingeniería, entre las cuales se cuentan la informática, las comunicaciones, el control automático y la bioingeniería, para citar algunas. Se trata de la **Microtecnología**, que ha surgido como una extensión aplicable a otras variables físicas, de las metodologías que caracterizan a la **Microelectrónica** en relación con variables eléctricas.

Una definición de esta disciplina está vinculada al tamaño, a las dimensiones de dispositivos, subsistemas y sistemas que pertenecen a dicho campo. Podría entonces decirse que **Microtecnología** es tecnología con rasgos dimensionales del orden del micrómetro (la millo-nésima parte del metro, o sea  $10^{-6}$  m, o bien  $1\mu\text{m}$ ).

Esto implica lo que suele denominarse “miniaturización” de un amplio conjunto de elementos que son la base principal de muchas industrias. La miniaturización de componentes, especialmente en las industrias electrónicas de computación, telecomunicación y transportes, ha estado al frente del crecimiento económico en los últimos 20 años. Los Microsistemas, que introduciremos más adelante, se producen en grandes volúmenes debido a las nuevas demandas sobre los períodos de garantía, la confiabilidad, las normas de seguridad, prestaciones, confort y costos. Los costos de sistemas y subsistemas para automóviles que se desarrollan en las plantas de microelectrónica están alcanzando el 15 % del total de un auto, y se espera un gran incremento en el futuro con la plena penetración de Microsistemas tanto en nuevas aplicaciones como con el reemplazo de tecnologías tradicionales en las ya existentes.

## 2.- Los dos sectores de la Microtecnología

Lo que se acaba de indicar en cuanto a las variables vinculadas a la Microtecnología, determina que en ésta sea posible distinguir dos sectores diferentes:

- La **Microelectrónica**, que creció notablemente con el desarrollo de la física de los semiconductores y apareció con motivo de la invención del **transistor** a mediados del siglo XX. Poco más adelante, casi entrando a la década de 1960, se logró disponer gran número de transistores en una sola pastilla (chip) de silicio, y con ello surgieron los **circuitos integrados** que mejoran notablemente el rendimiento, la funcionalidad y la confiabilidad, a la vez que reducen el costo y disminuyen el volumen.
- Los **Microsistemas**, entre los cuales tienen gran importancia los denominados **MEMS** (Micro Electro Mechanical Systems) en los que se ha llegado a miniaturizar dispositivos mecánicos, que se pueden fabricar en masa con los mismos beneficios para el mundo mecánico que los logrados por la Microelectrónica para el mundo eléctrico. Así como esta última provee el “cerebro” para los sistemas y productos avanzados de hoy, los componentes micromecánicos pueden ser los sensores o elementos activos que se relacionan con el mundo externo. Actualmente, son elementos fundamentales para muchos productos como los “*airbags*” de los automóviles, los impresores de chorro de tinta, los medidores de tensión arterial, y los proyectores de imágenes. Se puede pensar que, en un futuro próximo, alcanzarán tanta difusión como los dispositivos microelectrónicos.

### 3.- Microelectrónica: la evolución hacia la alta complejidad [1],[2],[3],[4]

- Como se ha indicado, en 1959 se introduce el circuito integrado (“microcircuito”) que es consecuencia de la tecnología “**monolítica planar**”. Esta invención fue casi simultánea e independientemente anunciada por Jack Kilby (de Texas Instruments) y por Robert Noyce (de la firma Fairchild).
- A partir de allí, hubo un progreso incesante, con el aumento creciente del número de transistores debido a la disminución del rasgo (“*feature*”, o sea la mínima dimensión apreciable por la tecnología) desde 37 micras en 1960, hasta valores submicrónicos en la actualidad, para la tecnología de silicio.
- Ello determina el crecimiento de la complejidad del circuito integrado, que tiene un número cada vez mayor de transistores en el **chip**, desde la integración en pequeña escala (SSI), pasando por mediana (MSI), grande (LSI), muy grande (VLSI), y ultra grande (ULSI); o sea por apenas decenas de transistores en la

primera de ellas, para llegar a millones en el extremo superior actual.

- Los efectos del crecimiento de la complejidad son la disminución del costo por año, y el aumento de la confiabilidad.

Esta complejidad aumenta con el tiempo, según una observación de Gordon Moore, que se puede apreciar en la siguiente Fig. 1:



FIG. 1

#### 4.- Procesos básicos de fabricación [5],[6],[10],[13]

La clave de los progresos arriba indicados está en la evolución de los procesos de fabricación de los **chips** a partir de la oblea de silicio, y también de la metodología de diseño con ayuda de computador (CAD, Computer Aided Design). Sin entrar aquí en detalles sobre estos temas, conviene mencionar algunas operaciones esenciales para la fabricación, ya que su empleo se ha extendido al caso de los **Microsistemas**. Todo el proceso se aplica a partir de un **sustrato**, que es el cuerpo macroscópico de silicio de alta pureza, inicialmente con débil concentración de impurezas **n** o **p** introducidas durante el crecimiento del cristal. A partir de ese silicio tipo **n** o tipo **p** se realiza el **dopado** introduciendo impurezas, respectivamente **p** (depósito superficial de átomos de boro) o **n** (arsenio o fósforo) para obtener

regiones de mayor concentración de impurezas mediante procesos tales como el de **difusión**, que a muy altas temperaturas, mayores de 800°C, mediante un horno (tubo de cuarzo rodeado de elementos calefactores eléctricos), determina la migración de átomos desde la superficie rica en dopantes obtenidos en un paso previo de predeposición, hacia el interior pobre en dopantes. La figura 2 nos da una idea sobre estos conceptos:

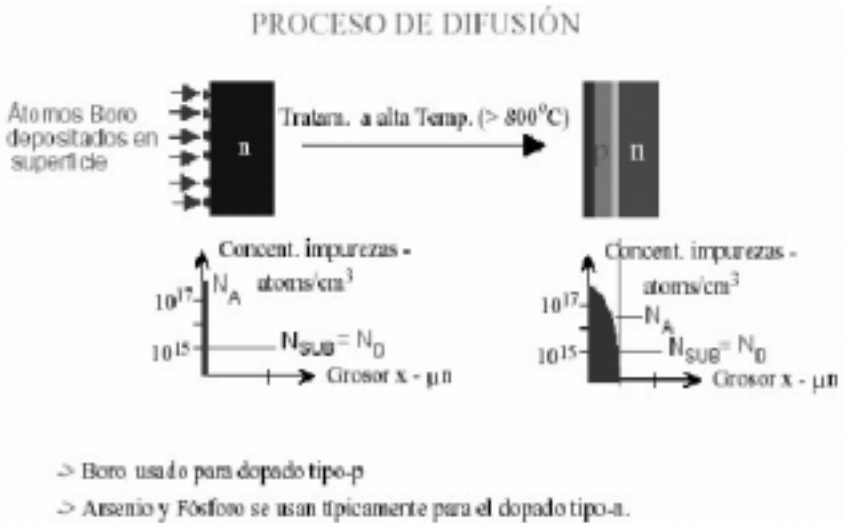


FIG. 2

Otro proceso importante que debemos mencionar es la **fotolitografía**, que usa imágenes ópticas y películas fotosensibles para producir patrones geométricos sobre el sustrato. La figura 3 muestra una película delgada de dióxido de silicio depositada en un sustrato de silicio. Se desea remover selectivamente una parte de dicho dióxido, de modo que únicamente quede en ciertas áreas de la oblea de silicio (Fig. 3f).

Es necesario disponer de una máscara, que en casos típicos será un esquema hecho con cromo sobre una placa de vidrio. Se cubre luego la superficie de la oblea con lo que en inglés se denomina "*photoresist*", y aquí llamaremos "*resist*", siendo un polímero sensible a la luz ultravioleta (Fig. 3b). Un haz de esta luz se hace incidir a través de la máscara sobre dicho resist (Fig. 3c). Éste, al ser revelado transfiere el esquema de la máscara a la capa que debe recibirlo (Fig. 3d).

Existen dos tipos de *resist*, el positivo y el negativo. Si la luz ultravioleta incide sobre un *resist* positivo, el polímero se debilita, de modo tal que, al revelar, el *resist* es eliminado de esas partes, transfiriéndoles una imagen positiva. Lo contrario ocurre con el *resist* negativo, que es fortalecido por la luz ultravioleta, por lo cual la revelación hace que se retire el *resist* no expuesto a la luz, transfiriendo una imagen negativa.

Generalmente, con un ataque químico se quita el óxido a través de las aperturas del *resist* expuesto (Fig. 3e), y finalmente el *resist* es eliminado, quedando el óxido con el esquema deseado (Fig. 3f).

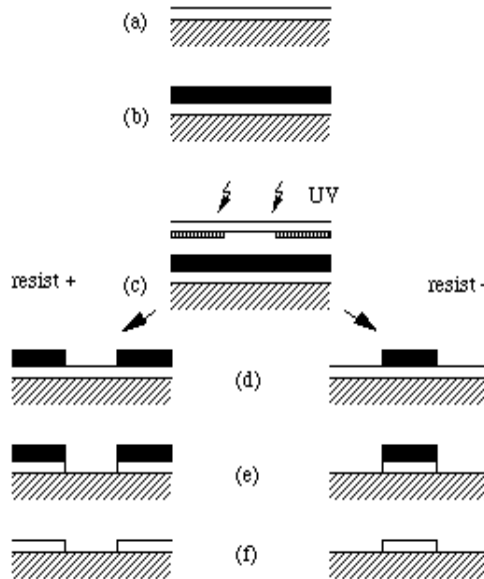


FIG. 3

Finalmente, debemos referirnos a una técnica que es especialmente importante para la fabricación de **microsistemas**, y es el **micromaquinado**, que permite construir estructuras mecánicas de pequeña dimensión (orden de micrómetros). Nos referiremos a dos variantes de esta técnica: el micromaquinado en volumen o de substrato (*bulk micromachining*), y el micromaquinado superficial (*surface micromachining*).

El micromaquinado en volumen se basa en atacar el substrato de silicio eliminando parte del material, de forma que las estructuras

que se construyen son hechas con el propio silicio cristalino o de capas de otros materiales depositados o crecidos sobre éste. Mediante diferentes técnicas de ataque, que pueden ser secas o húmedas, se elimina el material no deseado del sustrato.

Normalmente, para el micromaquinado en volumen, el ataque químico húmedo es anisotrópico, de forma que la velocidad de ataque no es igual en todos los planos cristalinos del silicio. Para el ataque químico seco se utilizan generalmente técnicas RIE (*Reactive Ion Etching*). construidas sobre la superficie del sustrato. Sin embargo esta técnica se caracteriza por lograr estructuras de espesores superiores a los 100  $\mu\text{m}$  con relaciones de aspecto entre sus dimensiones verticales y horizontales del orden de 100 a 1. Muchas de estas técnicas de alta relación de aspecto han sido concebidas de forma que se construyen moldes sofisticados y costosos mediante micromaquinado, para producir posteriormente partes de mucho menor costo.

En el micromaquinado superficial se construyen estructuras mediante la deposición sucesiva de capas sobre un sustrato. Ellas son conformadas mediante técnicas de fotolitografía y ataque. En general se usan dos tipos de capas: la estructural y la de sacrificio. Estas últimas actúan como separadores entre los niveles estructurales. Dichas capas son removidas normalmente como paso final del proceso para dejar libres las estructuras formadas por la capa estructural.

Existen diferentes combinaciones de materiales estructurales y de sacrificio. Una de las más comunes es la combinación de polisilicio, utilizado como material estructural, y dióxido de silicio empleado como material de sacrificio. Este último es eliminado sumergiendo las obleas en una solución de ácido fluorhídrico (HF) que ataca rápidamente y de forma isotrópica el dióxido de silicio, dejando prácticamente intacto al polisilicio. El micromaquinado superficial es tecnológicamente más complicado que el de volumen, aunque ahora se producen volúmenes considerables de dispositivos con técnicas de micromaquinado superficial y se espera que predominen en el mercado.

Los elementos construidos mediante micromaquinado se pueden clasificar en tres grupos fundamentales:

- **Dispositivos micromecánicos estáticos:** incluyen todos los elementos tridimensionales no móviles tales como orificios, cavidades, puntos de apoyo, etcétera.
- **Dispositivos micromecánicos dinámicos:** tienen en común que requieren de un desplazamiento controlado para cumplir su función. Entre estos se pueden citar diafragmas, membranas, resonadores entre otros.

- **Dispositivos micromecánicos cinemáticos:** en este caso son dispositivos que deben ser excitados para que exista cierto movimiento en ellos. Ejemplos de éstos son micromotores, muelles, engranajes y otros.
- Los elementos de los dos primeros grupos encuentran su aplicación fundamentalmente como dispositivos sensores, mientras los del tercero han sido mayormente empleados en micro-robótica y sistemas ópticos.

## 5.- Microsistemas [8],[9],[11]

Hemos visto que la Microtecnología se refiere a las técnicas para realizar estructuras tridimensionales y dispositivos con dimensiones en el orden de los micrómetros. La Microelectrónica, que produce circuitos electrónicos sobre *chips* de silicio está muy desarrollada, y a ella se agrega el Micromaquinado, que genera las estructuras y partes móviles para los dispositivos micromecánicos.

Uno de los principales objetivos consiste en integrar circuitos microelectrónicos sobre estructuras micromaquinadas, a fin de obtener sistemas completamente integrados (Microsistemas). Ellos pueden tener las mismas ventajas de bajo costo, confiabilidad y pequeño tamaño como los chips de silicio producidos por la industria microelectrónica.

Estos pequeños dispositivos sufren efectos físicos que tienen distinto significado en la escala micrométrica en comparación con la escala macroscópica. Su estudio renueva el interés en áreas como la Micromecánica que se relaciona con las partes móviles de los microsistemas, así como la Microfluídica, etc.

Son sistemas inteligentes con elementos de procesamiento y sensores y/o actuadores eléctricos, mecánicos, ópticos, químicos, biológicos, magnéticos u otros en un mono o multi-chip.

Según la definición establecida por la Unión Europea, “un microsistema es un sistema inteligente miniaturizado que integra funciones sensoras, de proceso y/o actuación. Comprenderá como mínimo dos de las siguientes propiedades: eléctricas, magnéticas, mecánicas, ópticas, químicas, biológicas u otras, de forma integrada en un solo chip o en un módulo híbrido multichip”.

## 6.- Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS) [7],[12],[14],[17]

Una variante muy importante de los Microsistemas son los de

naturaleza electromecánica, que en inglés se denominan **MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)**.

Se trata de una tecnología emergente con muy rápido crecimiento, que se basa en la infraestructura previamente existente del sector microelectrónico para el diseño de elementos mecánicos complejos en una escala dimensional que puede apreciarse en la figura 4, tomada de [17].

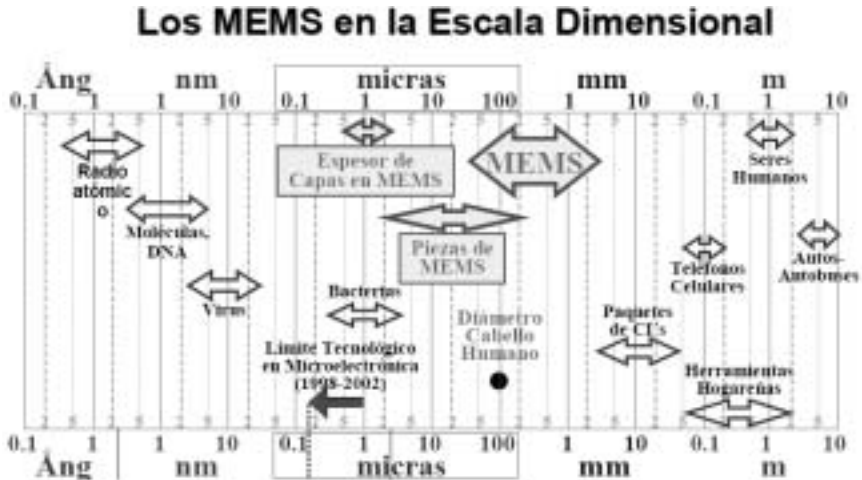


FIG. 4

Los MEMS comprenden la integración de dispositivos electrónicos y mecánicos por medio del uso de la tecnología microelectrónica y la de micromaquinado en forma conjunta sobre un mismo sustrato. Se pueden obtener de ese modo, **microsistemas inteligentes** con capacidad de sensado, procesamiento, comunicación y actuación en un mismo bloque.

La tecnología MEMS puede aplicarse utilizando un sinnúmero de diferentes materiales y técnicas de fabricación; la elección dependerá del tipo de dispositivo que se está creando y el sector comercial en el que tiene que operar.

El silicio es el material utilizado para crear la mayoría de los circuitos integrados utilizados en la electrónica de consumo en el mundo moderno. Las economías de escala, facilidad de obtención y el bajo costo de los materiales de alta calidad y la capacidad para incorporar la funcionalidad electrónica hacen al silicio atractivo para una amplia variedad de aplicaciones de MEMS.

Uno de los elementos básicos en el procesamiento de MEMS es la capacidad de depósito de películas delgadas de materiales; asumimos que una fina película puede tener un espesor de entre unos pocos nanómetros a unos 100 micrómetros. Los procesos de deposición de uso común son: Electroenchapado (Electroplating), Deposición Pulverizada (Sputter Deposition), la deposición de vapor: física (PVD) y química (CVD).

La fotolitografía y el micromaquinado, tal como se han introducido en 4, son técnicas fundamentales para la fabricación de MEMS

**El micromaquinado volumétrico** es el paradigma más antiguo de los MEMS basado en silicio. Todo el grosor de una oblea de silicio se utiliza para la construcción de las micro-estructuras mecánicas. El silicio es mecanizado utilizando diversos procesos de grabado. La unión anódica de placas de vidrio u obleas de silicio adicionales se utilizan para añadir características tridimensionales y para encapsulación hermética. El micromaquinado volumétrico ha sido esencial para los sensores de presión de alto rendimiento y acelerómetros que han cambiado la forma de la industria de los sensores en los '80 y '90.

**El micromaquinado superficial** se creó a fines de los 80 para hacer el micromaquinado de silicio más compatible con la tecnología de circuito integrado plano, con el objetivo de la combinación de MEMS y circuitos integrados en la misma oblea de silicio. El concepto original del micromaquinado superficial se basa en delgadas capas de silicio policristalino modelado como estructuras mecánicas móviles y expuestas por grabado de sacrificio de las subcapas de óxido. Electrodo en peine interdigital son utilizados para producir fuerzas en plano y detectar movimientos en plano de forma capacitiva. Este paradigma MEMS ha permitido la manufactura de acelerómetros de bajo costo, sistemas de bolsas de aire para automóviles (*air-bags*) y otras aplicaciones donde bajos rendimientos y/o altos rangos de "g" son suficientes. Mecanismos Analógicos han sido pioneros en la industrialización del micromaquinado superficial y han realizado la co-integración de los MEMS y los circuitos integrados.

## **7.- Otros importantes tipos de microsistemas relacionados con los MEMS [15],[16]**

**7.1.- Los sistemas micro-óptico-electromecánicos (MOEMS, micro-opto-electro mechanical systems)** son una clase especial de MEMS para el sensado o manipulación de señales ópticas, en una muy pequeña escala de tamaño, usando sistemas integrados mecá-

nicos y eléctricos. Comprenden una amplia variedad de dispositivos, entre los que se pueden mencionar los conmutadores ópticos (*optical switches*), *cross-connect* ópticos, y los microbolómetros, entre otros. Estos dispositivos se fabrican usando tecnologías de micromaquinado y materiales como silicio, dióxido de silicio, nitruro de silicio, y galio.

**7.2.- Los sistemas micro-electromecánicos de RF (RF Micro-Electromechanical Systems, RF MEMS)** son componentes cuyas partes móviles de tamaño submilimétrico poseen funcionalidad para radio frecuencias. RF MEMS permite realizar dispositivos pasivos superiores, tales como interruptores, condensadores conmutables de dos estados, condensadores continuamente variables, inductores, líneas de transmisión y resonadores. Esta tecnología es de la mayor importancia para la realización de una gran cantidad de elementos inalámbricos operantes en los ámbitos del hogar, terrestre, móvil y del espacio, como lo son los microteléfonos, estaciones base y satélites. Las propiedades esenciales que estos sistemas presentan son las de bajo consumo de potencia y reconfigurabilidad. Es por estas razones que se considera que los RF MEMS pueden ser fundamentales para llegar a la conectividad inalámbrica universal.

## **8.- El futuro**

En esta comunicación se ha intentado presentar brevemente el estado de la Microtecnología, que ha determinado extraordinarios avances y aplicaciones en innumerables campos de la actividad humana, y posiblemente ha de continuar progresando y obteniendo nuevos logros, ya que se trata de un sector bien consolidado. Además, es de destacar que en el presente está en pleno desarrollo la Nanotecnología, un reciente sector del conocimiento al que no nos referiremos en esta comunicación, no obstante lo cual señalaremos que nos lleva a dimensiones físicas aun menores, en la escala atómica y molecular, entre 1 y 100 nanómetros como se puede apreciar en la figura 4. Es un campo multidisciplinario y sin ninguna duda habrá de trascender a insospechadas realizaciones que complementarán lo logrado a través del dominio de la Microtecnología.

## **9.- Bibliografía**

- [1] E. D. Fabricius, *Introduction to VLSI Design*, McGraw-Hill, 1990. VLSI Systems Series, 1980.

- [2] C. Mead, L. Conway, *Introduction to VLSI Systems*, Addison-Wesley, VLSI Systems Series, 1980.
- [3] N. Weste and K. Eschragian, *Principles of CMOS VLSI Design: A Systems Perspective*, 2nd Edition, Addison Wesley, 1994.
- [4] Antonio A. Quijano, “*Microtecnologías: Evolución del Diseño*”, Anales de la Academia Nacional de Ciencias de Buenos Aires, Vol. XXXIX, pág. 49 a 74, ISBN-10:987-537-062-2;ISBN-13: 978-987-537-062-3, octubre de 2006.
- [5] Marc Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, 1997. 589 pp. ISBN 0-8493-9451-1.
- [6] P. Rai-Choudhury, *Handbook of microlithography, micromachining, and microfabrication*, vol. 2. Institution of Electrical Engineers (London, 1997), 692 pp. ISBN 0-8194-2379-3.
- [7] T. Fukuda and W. Menz, *Micro mechanical systems. Principles and technology. Handbook of sensors and actuators*. Elsevier Science (Amsterdam, 1998), 268 pp. ISBN 0-444-82363-8.
- [8] Stephen D. Senturia, *Microsystem design*. Kluwer Academic Publishers (Boston, 2000), 689 pp. ISBN 0-7923-7246-8.
- [9] W. Menz, J. Mohr and O. Paul, *Microsystem Technology*. Wiley-VCH (Germany, 2001). 500 pp. ISBN 3-527-29634-4.
- [10] Stephen A. Campbell, *The science and engineering of microelectronic fabrication*. Oxford University Press, 2001, 624 pp. ISBN-13:978-0-19.
- [11] Y. Gianchandani, O. Tabata and H. Zappe, *Comprehensive Microsystems (volume 1-3)*. Elsevier Science 2007. 2100 pp. ISBN: 978-0-444-52194-1.
- [12] M. Gad-el-Hak, “*The MEMS Handbook*”, CRC Press, 2002.
- [13] M. Madou, “*Fundamentals of Microfabrication*”, CRC Press, 2002.
- [14] J. A. Pelesko and D. H. Bernstein, “*Modeling MEMS and NEMS*”, Chapman & Hall, 2003.
- [15] Manouchehr E. Motamedi (Editor), *MOEMS: Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems (SPIE Press Monograph, Vol. PM126, 2005)*.
- [16] [www.mtt.org/dl/index.php?S01\\_DeLosSantos.pdf](http://www.mtt.org/dl/index.php?S01_DeLosSantos.pdf), “RF MEMS Para Lograr Conectividad Inalámbrica Universal”.
- [17] [www.cife.unam.mx/Programa/D16/03Ciencias60IsmaelMartinezLopez.pdf](http://www.cife.unam.mx/Programa/D16/03Ciencias60IsmaelMartinezLopez.pdf) - “Proyecto UNAMems, La investigación de Microsistemas Electromecánicos en la UNAM”