

## Tecnología

Jesús A. del Álamo

*Departamento de Ingeniería Electrónica y Ciencias de la Computación, Massachusetts Institute of Technology (MIT)*

<alamo@mit.edu>

Traducción: Grupo Mizar

Revisión: Ana María Nieda Calvo

## 1. Introducción

La tecnología de microelectrónica de silicio ha captado la imaginación del mundo. En la prensa «popular» se atribuyen a los diminutos microchips la potenciación de la nueva economía, la transformación de la esencia misma de los negocios y la presencia en casi todas partes, desde las lavadoras a los perros.

Si tuviésemos que intentar buscar una única razón para la enorme popularidad de la tecnología de la microelectrónica de silicio, probablemente habría que buscarla en el mundo de los ordenadores.

La **figura 1** pone en perspectiva el impacto de la microelectrónica sobre la computación con respecto a otras tecnologías anteriores [1]. Muestra de una forma sencilla el avance de la computación a lo largo del siglo xx: el número de cálculos por segundo que se pueden pagar con 1.000 dólares. También establece las prestaciones de un ordenador en relación con su precio.

La historia de la computación comienza a principios de siglo con la lógica mecánica, con enormes y caras máquinas. Se fue progresando lentamente por medio de la lógica electromecánica (básicamente con la utilización de relés) y la lógica de válvulas de vacío. Con la aparición de los transistores se reduce el tamaño de los ordenadores, aumentando la fiabilidad, reduciendo el coste e incrementando su rendimiento. Con los circuitos integrados, esta progresión se incrementa de una forma explosiva.

En los últimos treinta años, desde que se empezaron a utilizar los primeros circuitos integrados para construir ordenadores, el rendimiento de los ordenadores por cada dólar que cuestan ha mejorado ¡multiplicándose por un factor de un millón! Sólo hay que comprobar que cualquier ordenador personal en la actualidad es mucho más potente que el ordenador más potente de los años sesenta.

Este artículo se adentra en la evolución de la microelectrónica de silicio en los últimos 30 años. Se centra principalmente en la tecnología lógica, la tecnología que se utiliza para hacer circuitos integrados digitales, como un exponente de las capacidades del sector. En él se describen las tres claves del éxito de la microelectrónica de silicio. También se exponen las barreras que se oponen al progreso futuro de la

## Microelectrónica de Si: de la era de los ordenadores a la era de Internet

microelectrónica lógica en la era de Internet. Termina ofreciendo una visión más amplia de la microelectrónica de silicio en la era de Internet.

## 2. La microelectrónica de silicio en la era del ordenador

Los microprocesadores modernos tienen millones de transistores muy pequeños. Cuando hablamos del tamaño de un transistor, nos referimos a la longitud de su «puerta» o elemento de control. Como se describirá más adelante, esta dimensión controla muchos de los más importantes elementos del transistor. El resto de las dimensiones del transistor están a escala de ésta.

Las puertas de los transistores modernos tienen un tamaño de entre 0.2-0.3 mm. Para podernos hacer una idea, este tamaño equivale al tamaño de un virus normal.

En los 30 últimos años, como muestra la **figura 2**, esta dimensión crítica se ha reducido en dos órdenes de magnitud. En este gráfico, se muestra la longitud de las puertas de los transistores utilizados en los microprocesadores con tecnología Intel, desde la introducción de su primer microprocesador en 1971. Se ha escogido Intel porque es un elemento representativo del conjunto de este sector.

### La ley de Moore

Con la reducción cada vez mayor del tamaño de los transistores, la densidad de transistores en los circuitos integrados se ha incrementado muy rápidamente. En realidad se ha incrementado de forma exponencial.

En la **figura 3** se muestra la evolución de la densidad de integración de los microprocesadores de Intel desde 1971 hasta 1999. Como se puede observar, la densidad se ha incrementado en cuatro órdenes de magnitud en los últimos treinta años. Esto, por supuesto, se deriva de la reducción en dos órdenes de magnitud del tamaño de los transistores en el mismo periodo como pudimos observar en la **figura 2**.

Gordon Moore, uno de los fundadores de Intel, se dio cuenta a principios de los años setenta de que la densidad de integración crecía exponencialmente. Él fue la primera persona en indicar este hecho y, por ello, se le ha llamado «Ley de Moore».

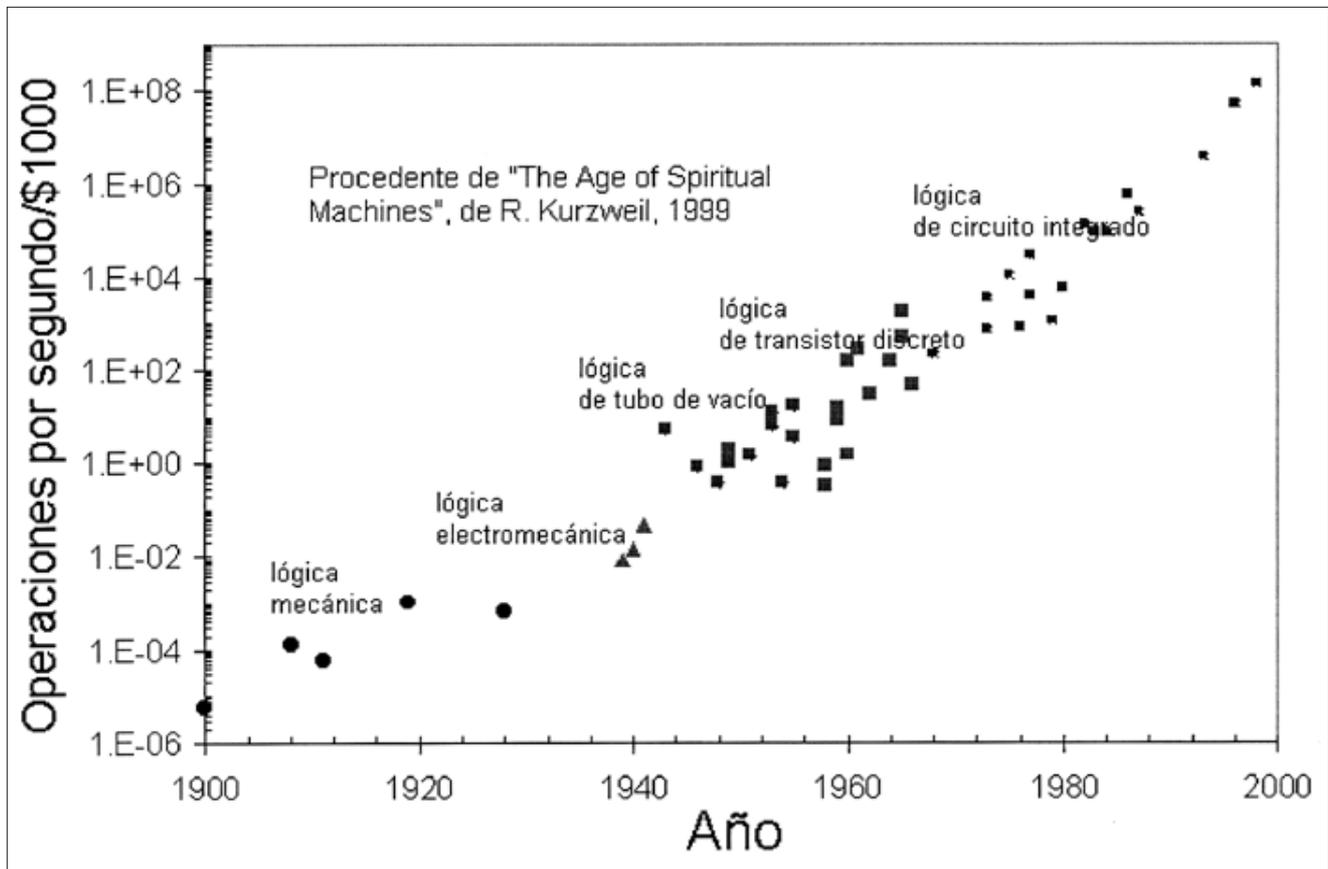


Figura 1. Progreso en la potencia de los ordenadores en el siglo xx, medido en cálculos por segundo por 1000\$ en hardware (datos de Kurzweil [1])

Mucho más importante que la percepción que tuvo Moore sobre el incremento de la densidad de una forma exponencial es el pronóstico que realizó sobre las consecuencias que podría tener dicho incremento. Nos referimos al incremento exponencial del rendimiento de los sistemas, el coste por función, la energía consumida en la realización de cada función y la fiabilidad de todo el sistema.

La combinación de estos factores es la responsable del revolucionario impacto que ha tenido la microelectrónica en la sociedad en las últimas décadas.

La frecuencia de reloj es una medida rudimentaria del rendimiento del sistema en un sistema lógico. Es la velocidad a la que se realizan las operaciones lógicas. La figura 4 muestra la frecuencia de reloj de los procesadores Intel a lo largo de los años. Ésta se ha incrementado en cuatro órdenes de magnitud en los últimos treinta años. Antes de finales del año 2000 muy posiblemente se tendrán microprocesadores en el mercado que superen 1GHz.

En cuanto al coste, el coste por transistor en los procesadores Intel se ha reducido en los últimos treinta años considerablemente, casi tres órdenes de magnitud, de diez céntimos a diez milicéntimos de dólar. Claro que los usuarios finales no se preocupan por el coste de los transistores pero si por el coste de las funciones que realizan éstos.

La figura 5 muestra el coste por megahercio de los procesadores Intel. Este gráfico indica cómo se ha reducido el coste de los procesadores Intel en alrededor de cuatro órdenes de magnitud en los últimos treinta años. Si a esto le

añadimos el incremento en casi un orden de magnitud en el tamaño de la palabra al pasar de 4 bits a 32 bits así como muchas mejoras en la arquitectura del microprocesador, no es difícil contemplar un panorama muy coherente con la mejora en un factor de un millón que la figura de Kurzweil sugiere (ver la figura 1).

### 3. Las claves del éxito de la microelectrónica de silicio

El éxito de la microelectrónica de silicio se basa en unos pocos desarrollos clave. Aquí trataremos tres de los más significativos.

#### 3.1. MOSFET

El transistor de efecto de campo de metal óxido-semiconductor (MOSFET), es el dispositivo que está en el centro de la revolución microelectrónica. Tiene en su interior una estructura compuesta de una puerta de polisilicio (anteriormente de metal), una capa fina de óxido de silicio, situada encima de la placa de silicio (figura 6).

Aplicando un voltaje a la puerta por encima de un cierto umbral, atrae electrones a la interfaz del semiconductor y el óxido. Estos electrones pueden entonces cerrar el interruptor entre otros dos grupos de electrones llamados fuente y sumidero ubicados en las proximidades, de forma que la corriente pueda fluir de uno a otro.

En esencia, un MOSFET es un interruptor que se activa electrónicamente. Si el voltaje aplicado a la puerta está por

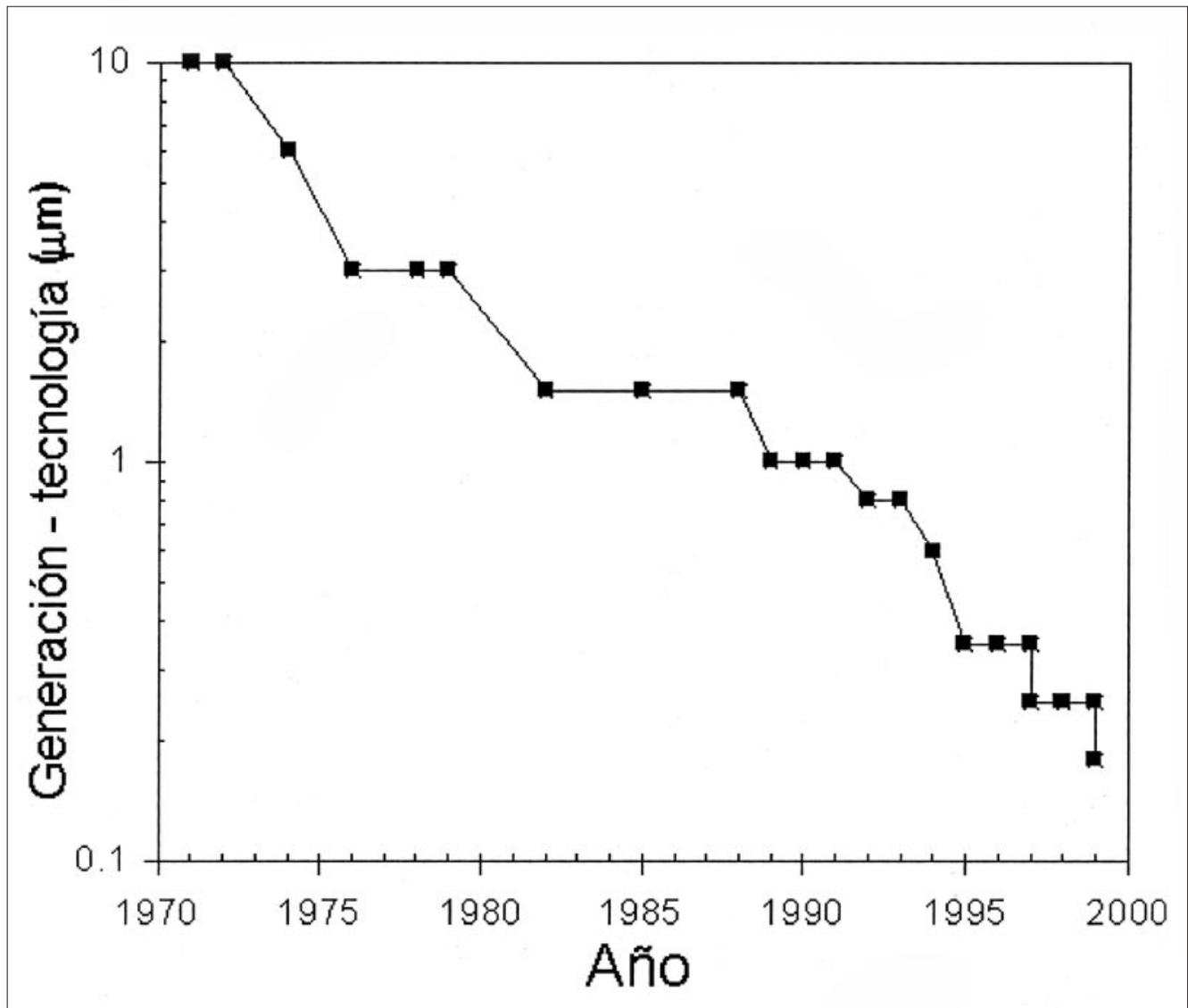


Figura 2. Evolución de la dimensión crítica del transistor

debajo del umbral, el interruptor se abre. Si está por encima, el interruptor se cierra. De esta forma se pueden hacer operaciones lógicas.

### 3.2. Escalabilidad de tamaño

Una segunda clave del éxito de la microelectrónica de silicio es el hecho de que el funcionamiento del MOSFET como interruptor mejora al reducirse de tamaño. Mejora de dos formas. Primera, reduciéndose el tiempo de activación del interruptor; y segunda, reduciéndose también la energía necesaria para activarlo.

Un punto importante a tener en cuenta es que cuando se reducen las dimensiones laterales del transistor, sus dimensiones verticales tienen que reducirse también de una forma armoniosa para mantener la integridad electrostática del dispositivo.

### 3.3. CMOS

La tercera clave del éxito se llama CMOS, metal-óxido

semiconductor complementario. Esto significa que realmente hay no uno sino dos tipos de MOSFETs, uno que se activa con un voltaje por encima de un cierto valor y otro complementario que se activa con un voltaje por debajo de un valor diferente. Esto permite lo que se denomina lógica complementaria lo que básicamente quiere decir que cuando un interruptor está cerrado, el otro está abierto.

De esta forma, es posible realizar operaciones lógicas sin tener una derivación directa entre la fuente de potencia y tierra evitando por lo tanto la corriente continua. Ninguna otra familia lógica lo hace. Este simple atributo es la clave que hay detrás de las enormes densidades de transistores de los modernos microprocesadores.

## 4. La microelectrónica de silicio en la era de Internet

Ahora miremos hacia el futuro. El titular de un artículo de primera página que apareció en el *New York Times* el 9 de octubre de 1999 cita las previsiones de los ingenieros de Intel de serias barreras en el progreso del chip [2]. Ésta no

es la primera vez que se han predicho panoramas tan catastróficos.

Durante muchos años se ha hablado sobre la rápida aproximación al «final» de la microelectrónica. Sin embargo, ésta es la primera vez que una importante empresa fabricante de semiconductores hace pública una afirmación de este tipo sobre este tema. ¿Por qué esta previsión tan pesimista? ¿Qué significa esto para la microelectrónica en la era de Internet?

#### 4.1. Límites de la microelectrónica de silicio

Existen al menos cuatro tipos de límites relacionados con el ulterior progreso de la microelectrónica de silicio, de los que

se habla extensamente: económicos, físicos, termodinámicos y estadísticos [3]. Los comentaremos brevemente a continuación.

Cuando nos referimos a límites económicos, estamos hablando del coste de una nueva fábrica. Desgraciadamente, la ley de Moore sobre cambio exponencial se aplica también a los costes de fabricación. En los últimos veinticinco años, el coste de una fábrica ha aumentado en más de un orden de magnitud y ahora supera con mucho los 1.000 millones de dólares.

Lo que es importante de estos datos es el enorme riesgo que una determinada empresa tiene que afrontar cuando decide

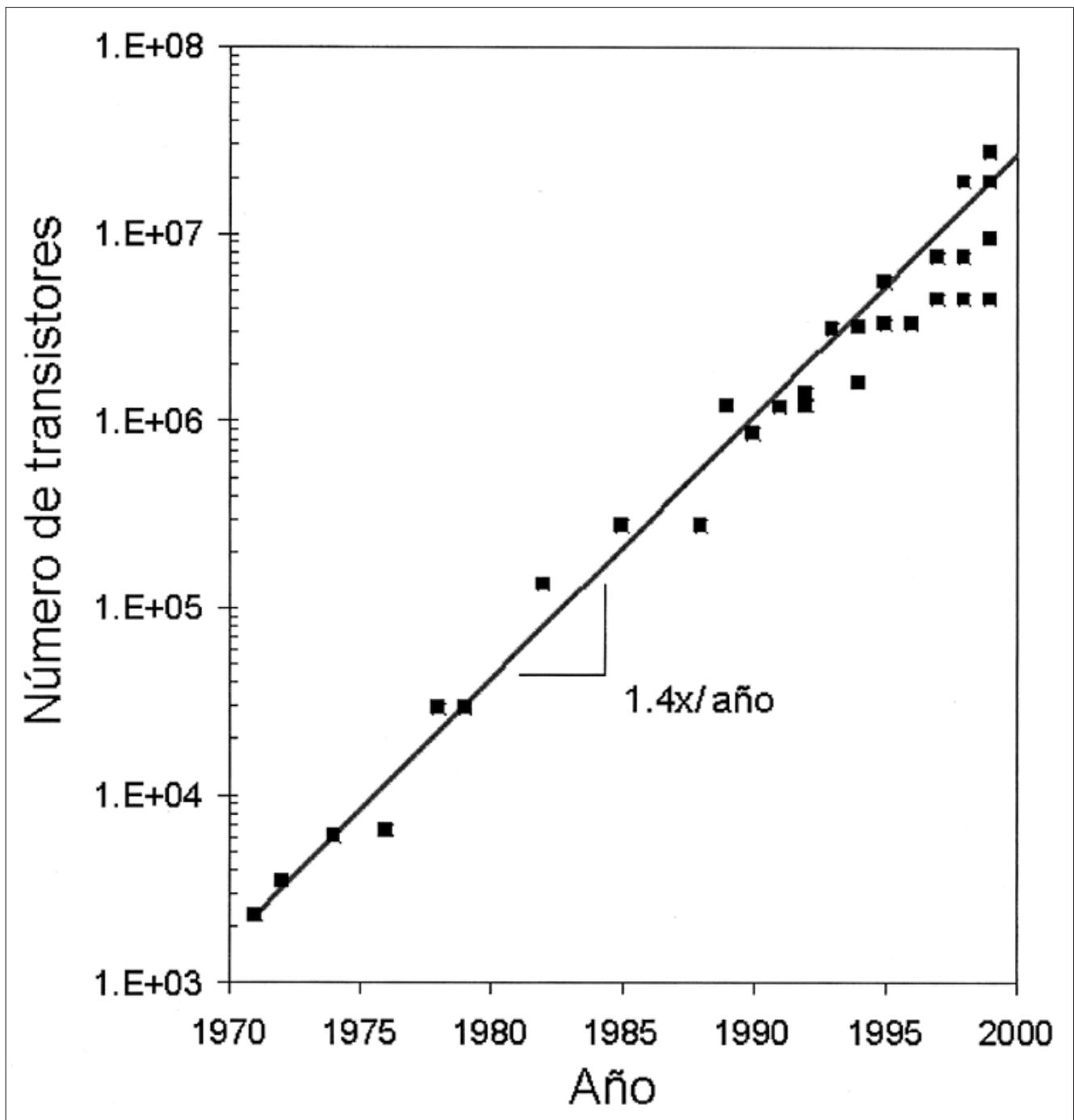


Figura 3. Evolución de la densidad del transistor en los microprocesadores Intel

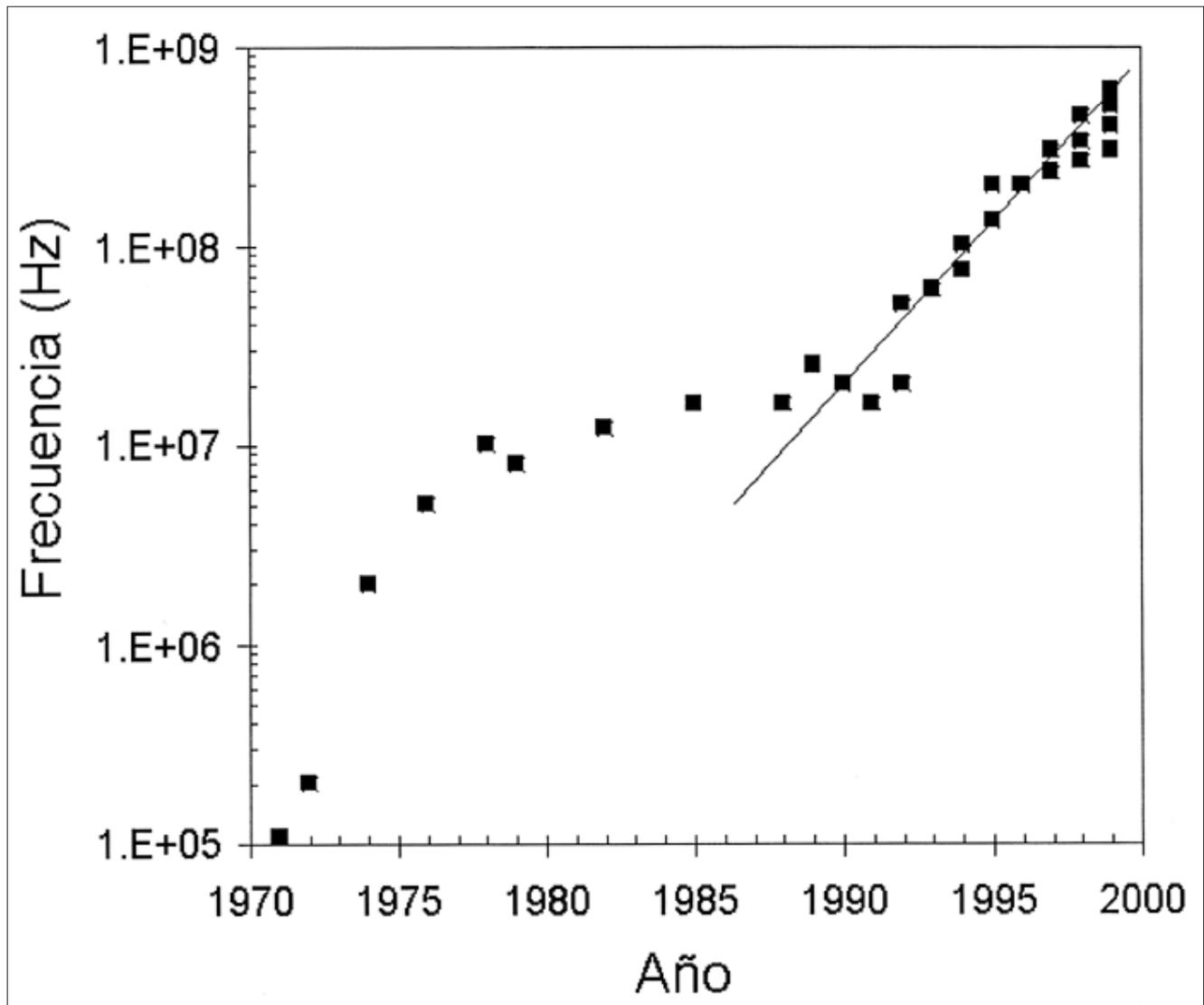


Figura 4. Evolución de la frecuencia de reloj de los microprocesadores

construir una nueva fábrica. Este riesgo se está haciendo casi insoportable y lo único que va a hacer es empeorar.

La segunda limitación viene de la física, o más concretamente, de la mecánica cuántica. A medida que las dimensiones laterales del transistor se reducen, el grosor del aislante de la puerta tiene que reducirse también.

El problema es que, muy pronto, el aislante de la puerta del MOSFET será tan fino que tendrá «escapes» a causa del paso de los electrones por la misma. Esto es malo por muchas razones: consumo de energía, retención de memoria y otras.

Se cree que el límite mínimo del grosor del óxido está entre 1,5 y 1,6 nm. Esto implica que el límite último del tamaño de la puerta del transistor es del orden de 30 a 60 nm, lo que se prevé conseguir dentro de diez años aproximadamente.

El límite termodinámico se refiere a la dificultad de fabricar las zonas fuente y sumidero en el MOSFET con la alta concentración de impurezas requerida para conseguir baja resistencia. Nuestra capacidad de introducir altas concen-

traciones de impurezas de una forma estable tiene un límite termodinámico.

Finalmente, los transistores se están reduciendo tanto que actualmente el número de impurezas en el cuerpo del transistor está llegando a ser bastante pequeño. Como resultado, la fluctuación estadística de concentración de impurezas se está haciendo muy significativa.

Esto quiere decir que las mismas características del transistor también mostrarán una amplia distribución estadística. Esto es problemático cuando hay decenas o centenas de millones de transistores en un chip.

Por lo tanto, con el conocimiento de estos límites, ¿hasta dónde es probable que llegue la microelectrónica? Arno Penzias, premio Nobel de los laboratorios de Bell, piensa que a pesar de todas estas y de otras limitaciones que tenemos ante nosotros, el poder de la microelectrónica probablemente aumentará un millón más [4]. Su argumento es el siguiente: supongamos que podemos reducir el tamaño del transistor en un factor de 10. Como se ha mencionado anteriormente, esto no deja de ser razonable. Esta reducción

de 10X en tamaño debería traducirse en un aumento de 100X en la densidad del transistor y en una mejora de 100X en la velocidad del circuito. Penzias espera otra mejora de 100X proveniente de alguna sorpresa en la arquitectura del circuito o en otra área (algo que no deja de ser razonable si nos remontamos al pasado). El total es entonces de una mejora de un millón de veces.

#### 4.2. Mas allá de la lógica

En este artículo, hasta ahora hemos tratado sobre el uso de tecnología lógica para mejorar sistemas digitales. En realidad, esta es una visión bastante estrecha de la microelectrónica.

Existen muchos otros tipos de funciones que pueden realizarse utilizando la tecnología de circuitos integrados de silicio. La memoria semiconductor ha progresado de manera similar a la tecnología de microordenadores. La densidad de la memoria se ha incrementado en seis órdenes de magnitud en los últimos treinta años. Como consecuencia, el precio por bit ha disminuido también en cuatro órdenes de magnitud.

Otras funciones que se hacen muy bien con silicio son las analógicas, como los amplificadores y conversores analógico-digitales, control de potencia (en lo que se llama potencia inteligente), y Radio-Frecuencia (RF). En realidad, los circuitos integrados de Radio-Frecuencia de silicio o CIRFs (RFICs en inglés) son actualmente de un enorme interés para la fabricación dispositivos de bajo ruido como amplificadores, mezcladores, amplificadores de potencia, osciladores y otros tipos de circuitos de comunicaciones que operan en un régimen de RF.

En los últimos diez años, la explosión del mercado de los teléfonos móviles ha generado para los CIRFs un mercado comercial muy grande que crece muy rápidamente.

El silicio puede ser usado también para realizar otros tipos de funciones. Un área de aplicación muy interesante de la tecnología del silicio es lo que se ha dado en llamar genéricamente sistemas microelectromecánicos. Como su nombre indica, estos sistemas consisten en estructuras mecánicas de silicio que son activadas o interrogadas de manera eléctrica. Uno de los primeros éxitos comerciales de esta tecnología

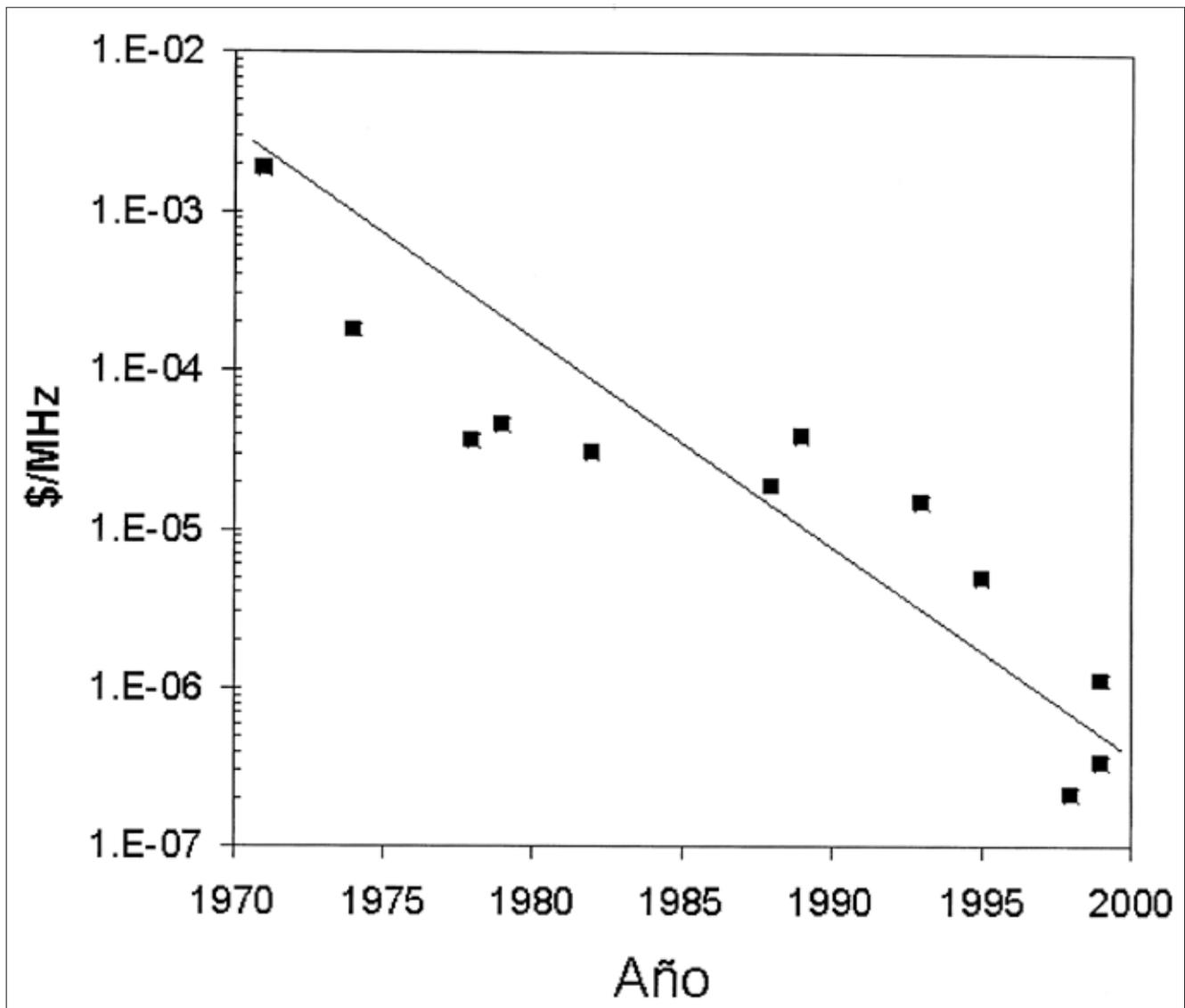


Figura 5. Evolución del coste por megahercio de un microprocesador Intel

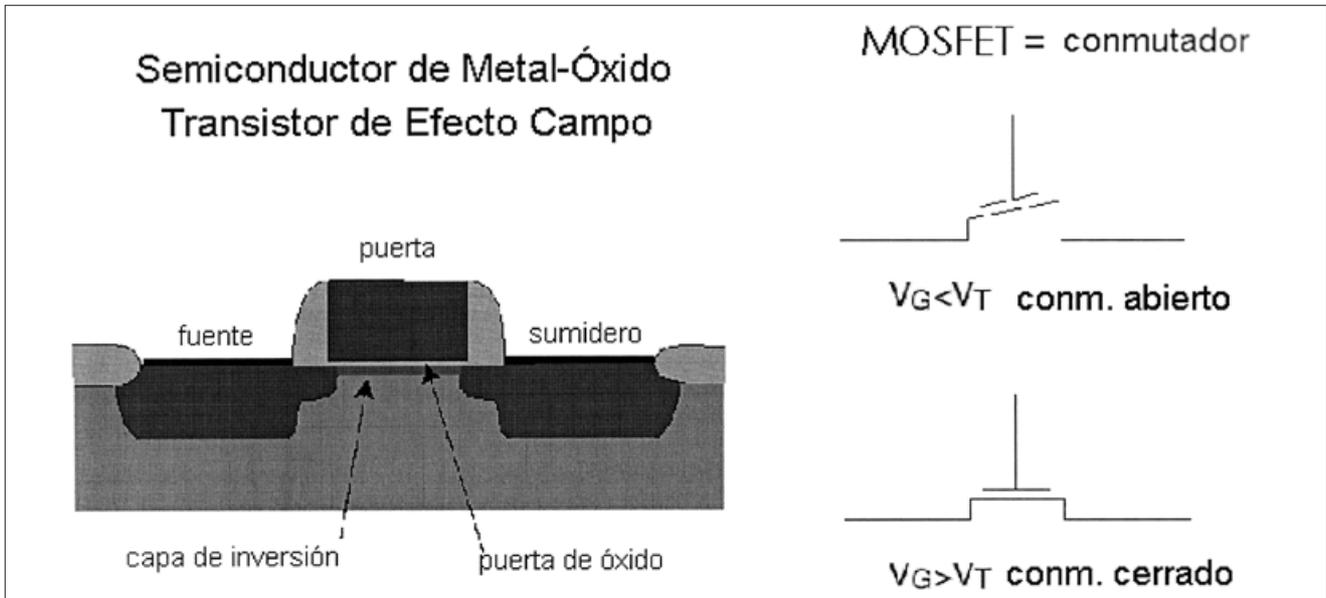


Figura 6. Esbozo del transistor MOSFET

son los acelerómetros, que ahora son ampliamente usados en el desarrollo de los *airbags* de los coches. Este dispositivo consta de una masa de silicio que está suspendida por cuatro postes sobre una placa también de silicio. La masa está sujeta por muelles planos de silicio que permiten que se mueva en dos dimensiones. De esta manera, la masa se mueve en respuesta a la aceleración. La posición de la masa se mide por medio de condensadores.

Otro ejemplo de un sistema microelectromecánico que se puede encontrar en el mercado hoy día es el visor de microespejos (*micromirror display*) (figura 7). Es un chip que está cubierto por diminutos espejos metálicos. Cada espejo puede ser estimulado electrostáticamente y rotar a lo largo de un eje. Iluminando este chip, y posicionando apropiadamente los espejos podemos proyectar imágenes de resolución extremadamente alta.

Estos visores de microespejos están en el centro de una nueva generación de pantallas de ordenadores portátiles para uso personal. También se usan en los cines para proyecciones de muy alta resolución.

El cajón de sorpresas que ofrece el silicio está muy lejos de quedar vacío. Parece que sólo nuestra imaginación puede poner límites a lo que se puede hacer con el silicio. Por ejemplo, en el MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), un grupo de profesores y estudiantes andan detrás de conseguir reactores microquímicos en los que se producen reacciones químicas de muy pequeño volumen (figura 8).

La síntesis de compuestos peligrosos justo en el momento de ser usados y en la cantidad exacta podría ser una aplicación de esta tecnología.

Estos reactores consisten en una cavidad grabada en silicio cubierta por otra placa de silicio. Unos agujeros posibilitan la entrada en el reactor de los reactivos, y la salida de los compuestos producidos. La temperatura de reacción la

proporciona un calentador colocado sobre la cavidad. Esta temperatura puede ser controlada a través de sensores térmicos y circuitería externa de control. En un futuro, la circuitería de control estará integrada en el mismo chip.

#### 4.3. El Sistema en un Chip (*System On Chip*)

Debido a la destacable funcionalidad de la tecnología de silicio, hace tiempo que existe interés por combinar diferentes funciones en un único chip de silicio. A menudo esto da a lugar a un aumento significativo en el rendimiento global del sistema. En los sistemas digitales, por ejemplo, hay una importante diferencia entre el tiempo de acceso a la memoria desde el microprocesador y la velocidad del microprocesador mismo.

El ancho de banda de la comunicación entre lógica y memoria se convierte en un cuello de botella por los cables que conectan ambos chips. Al colocar la memoria y microprocesador juntos en un solo chip, podrán obtenerse importantes mejoras en el rendimiento del sistema. A menudo este concepto se le llama *embedded memory* (memoria embebida).

Además, se espera que la integración de distintas funciones en un único chip resulte en una reducción del tamaño y coste del sistema. El menor número de piezas mejora la fiabilidad del sistema. Los dos sistemas micromecánicos mencionados antes ofrecen excelentes ejemplos de esto.

En el caso del acelerómetro, ya hay un gran número de componentes electrónicos integrados en este dispositivo para evaluar de forma adecuada la aceleración y enviar una orden para desplegar los *airbags*.

En el futuro, toda la parte digital del sistema podría ser integrada también con el resto del sistema para formar una solución de chip único. En el visor de microespejos se pueden conseguir grandes ganancias en el rendimiento, coste y tamaño del sistema si los espejos, la memoria y un

procesador lógico pueden ser integrados en una única fina capa de silicio.

La gran explosión de Internet, de las comunicaciones personales inalámbricas y de los ordenadores portátiles han creado una nueva área para la microelectrónica con nuevos retos y oportunidades. En la era Internet, estamos presenciando el nacimiento de pequeños sistemas con una potencia sin precedentes en computación y capacidades de comunicación inalámbrica.

Algunos ejemplos son los receptores GPS, los teléfonos móviles, los ordenadores portátiles, los asistentes personales y los enlaces de Radio Frecuencia (RF) de los periféricos. Esto ha generado enormes fuerzas de mercado que empujan hacia el desarrollo de circuitos integrados pequeños, de bajo coste y potencia, que combinen funciones digitales, analógicas, memoria, RF y de gestión de potencia en un único chip.

Esta rica plataforma tecnológica funcional a menudo se denomina «el sistema en un chip» (*System on Chip* - SOC). Un sistema de chip único basado en esta tecnología SOC promete una funcionalidad, tamaño, bajo consumo de potencia y fiabilidad del sistema sin precedentes, todo a muy bajo coste.

Los retos tecnológicos a los que debe enfrentarse el concepto de SOC son enormes. Hoy en día no existe tecnología que sea, al mismo tiempo, adecuada para todas esas diferentes funciones, por lo que tendrá que ser desarrollada integrando módulos especializados.

Los compromisos clave son los costes de producción y el tiempo de desarrollo tecnológico. Puesto que la lógica de alto

rendimiento estará siempre en el centro de cualquier sistema futuro, en cualquier tecnología SOC figurará un núcleo lógico CMOS dentro del cual podrán ser «encajados» a voluntad módulos analógicos, de potencia, memoria y RF, dependiendo del sistema específico.

Actualmente hay numerosas plataformas SOC en desarrollo. Una solución completa CMOS es muy apropiada para los sistemas de señales mixtas con un gran núcleo digital y algunas funciones analógicas de baja potencia y RF a media frecuencia, como los asistentes personales, los enlaces inalámbricos de los periféricos y los microteléfonos inalámbricos.

Se requiere una combinación de transistores bipolares (un tipo diferente de transistor caracterizado por altas velocidades y capacidades de gestión de corriente) y CMOS, lo que se conoce por BiCMOS, para manejar niveles altos de potencia y mayores frecuencias, tales como los módems de banda ancha, teléfonos móviles y terminales inalámbricos de red de área local.

Para altos niveles de potencia y muy altas frecuencias, SiGe BiCMOS podría ser la mejor solución. En esta tecnología, se introduce dentro del transistor bipolar una pequeña cantidad de germanio. Esto mejora su actual conductividad y su respuesta frecuencial.

Los sistemas SiGeBiCMOS SOC probablemente serán usados en los futuros interruptores y encaminadores de fibra óptica de alta velocidad en la red principal de Internet.

Con la tecnología SOC, la microelectrónica continuará proporcionando en la era de Internet el asombroso ritmo de progreso al que nos hemos acostumbrado durante la era de

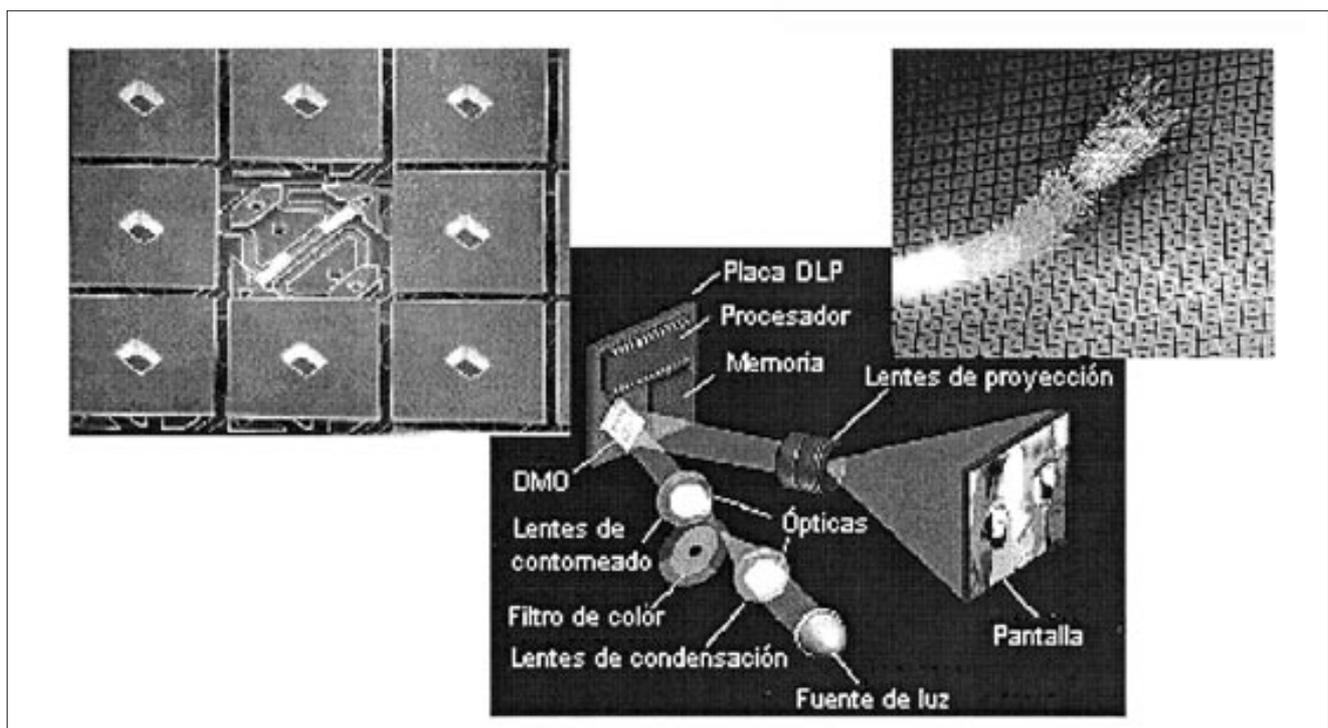


Figura 7. Visor de microespejos (© Texas Instruments)

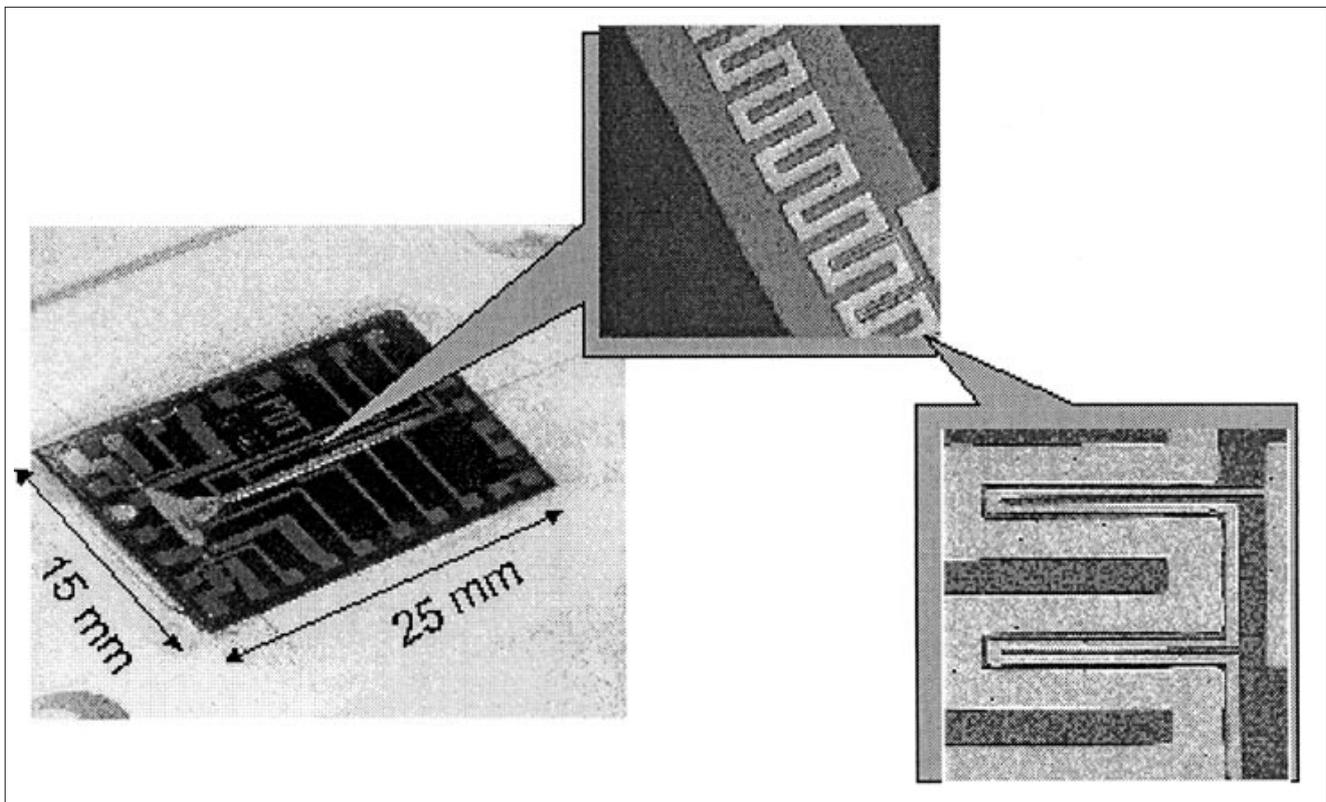


Figura 8. Reactor microquímico de silicio del MIT (© Felice Frankel)

los ordenadores. La próxima era verá el acceso barato de ancha banda a grandes cantidades de información desde cualquier punto, en cualquier momento, comunicaciones inalámbricas de banda ancha y bajo coste, control remoto de sistemas complejos en tiempo real desde cualquier punto del mundo y una gran variedad de dispositivos personales pequeños e inteligentes con una funcionalidad sin precedentes.

## 5. Conclusión

En resumen, este artículo ha expuesto brevemente una gran proeza de la ingeniería humana: la revolución de la microelectrónica de silicio. Ésta ha tenido un impacto amplio y profundo sobre la sociedad humana en la última parte del siglo xx. No resulta sorprendente, al entrar en el tercer milenio, que el silicio sea probablemente el material mejor conocido por la humanidad.

Con vistas al futuro, la microelectrónica de silicio no va a ceder su papel principal. La tecnología de silicio será explotada para desarrollar nuevas clases de dispositivos basados en nuevas capacidades funcionales.

Al mismo tiempo, en la era Internet se fabricarán en un único chip integrado sistemas que combinen lógica, memoria, comunicaciones, gestión de potencia y quizá otras funciones. Esto dará lugar a sistemas diminutos, fiables y baratos con un rendimiento y funcionalidad sorprendentes.

Aunque la tecnología lógica se está acercando a sus límites fundamentales, la tecnología SOC producirá beneficios globales en el rendimiento de los sistemas que continuarán sin cesar en las próximas décadas.

## 6. Referencias

- [1] R. Kurzweil, *The Age of Spiritual Machines*, 1999 («La edad de las máquinas espirituales»).
- [2] *The New York Times*, October 9, 1999 (9 de octubre 1999).
- [3] P. A. Packan, *Science* 285, p 2079 (24 de septiembre 1999).
- [4] A.A. Penzias. *Bells Labs Technical Journal*, 2, 155 (otoño 1999).

## Tecnología

Alejandro Alonso, Juan A. de la Puente  
ETSI de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid

<{aalonso, jpunte}@dit.upm.es>

**Resumen:** *el propósito de este artículo es intentar explorar el futuro de los sistemas de tiempo real durante los próximos 25 años. Aunque hacer prospectiva siempre es difícil, en el caso de los sistemas de tiempo real se pueden observar algunas tendencias que sin duda tendrán un gran impacto en el futuro próximo.*

## 1. Sistemas empotrados

En primer lugar, resulta significativo el hecho de que cada vez es mayor el número y la variedad de sistemas de tiempo real que toman la forma de **sistemas empotrados** en todo tipo de sistemas de ingeniería y de consumo. El abaratamiento del hardware ha hecho posible la extensión de los sistemas de tiempo real empotrados, que hasta hace poco se limitaban a sistemas de alto coste y alta tecnología, a los productos de uso cotidiano. Así, los sistemas de tiempo real ya no se encuentran únicamente en sistemas de control de aviones o cohetes, control de fábricas o sistemas de telecomunicación complejos, sino que también forman parte, a menudo invisible, de productos como teléfonos móviles, reproductores de discos DVD, televisores e incluso afeitadoras o aspiradoras. Varios estudios de mercado estiman en unos 5 millardos de dólares el mercado de los sistemas empotrados para el año 2001, con una tendencia creciente. Otros estudios cifran el mercado de sistemas empotrados conectados a Internet en el año 2005 en unos 6,5 millardos de dólares. Los mercados con una tendencia al alza más significativa, según estos mismos estudios, son los de consumo doméstico y telecomunicaciones avanzadas. Es de suponer que esta tendencia continuará durante los próximos 25 años, y que los sistemas empotrados de tiempo real serán cada vez más comunes y permitirán construir sistemas cada vez más autónomos.

Por otro lado, todo hace pensar que en los sistemas del futuro convergerán una serie de tecnologías, cuya evolución hay que tener en cuenta si queremos tener al menos un atisbo de cuáles serán sus características más importantes. Algunos de estos campos son:

### Comunicaciones

Los medios de comunicación para sistemas de tiempo real tienen que cumplir un requisito fundamental: es necesario poder predecir la duración máxima del tiempo de transmisión de los mensajes. Esta necesidad sólo se ha manifestado recientemente y ha dado lugar a la aparición en los últimos años de protocolos de comunicación con tiempo de transmisión determinista. Aunque el motivo principal de estos desarrollos ha sido la necesidad de implementar sistemas de tiempo real distribuidos en la industria del automóvil, se ha extendido rápidamente a otros campos de aplicación. Es de esperar que esta tendencia continúe y que en un futuro próximo se generalicen los protocolos de comunicación con

## Sistemas de Tiempo Real: previsiones para los próximos 25 años

comportamiento temporal previsible, junto un mayor ancho de banda y tolerancia de fallos. El desarrollo de protocolos de comunicación por radio, además, facilitará previsiblemente el desarrollo de sistemas empotrados portátiles.

### Ingeniería de software

El abaratamiento del hardware y el incremento de la densidad de integración facilita la realización de sistemas de tiempo real cada vez más complejos. Es de prever que esta tendencia continúe en el futuro próximo, lo que hace necesario disponer de métodos y herramientas adecuados para desarrollar sistemas de tiempo real complejos, teniendo en cuenta además que la dificultad de desarrollar este tipo de sistemas es mayor que en el caso de sistemas convencionales. Esto se debe a que hay que considerar los requisitos temporales y fiabilidad, ya que los fallos en estos sistemas pueden causar cuantiosos daños materiales, e incluso en ocasiones la pérdida de vidas humanas.

Por este motivo resulta preocupante la visión, ingenua pero frecuente, de que el desarrollo de sistemas empotrados se simplifica utilizando sin más los métodos de desarrollo de software que han dado buenos resultados en otros campos de aplicación, o que hacer sistemas de tiempo real consiste únicamente en hacer sistemas más rápidos o más eficientes.

Para poder desarrollar este tipo de sistemas de forma que satisfagan los requisitos de determinismo temporal y fiabilidad que les son inherentes manteniendo unos costes razonables, es absolutamente necesario disponer de técnicas de ingeniería de software más avanzadas. En este sentido se dispone un buen bagaje de técnicas de diseño y análisis desarrolladas en su mayor parte en los últimos diez años, que se pueden utilizar de manera efectiva para conseguir estos objetivos. No obstante resulta preocupante el hecho de que en algunos desarrollos recientes de lenguajes de programación o de sistemas operativos se hayan ignorado casi completamente los avances tecnológicos realizados en este campo en los últimos años. Basta pensar en el tratamiento de la concurrencia en Java o en los mecanismos de planificación de Windows CE para darse cuenta de que herramientas tan populares presentan problemas serios para la realización de los sistemas de tiempo real de los próximos años, precisamente por ignorar el estado actual de la tecnología y sus previsible desarrollos futuros.

### Inteligencia artificial

La complejidad de las aplicaciones de sistemas de tiempo real del futuro hace pensar que será necesario emplear técnicas de inteligencia artificial para adaptar su comportamiento a los cambios del entorno, aprender y emplear técnicas de toma de decisiones, y para aumentar su autonomía y prestaciones. Estas técnicas ya se utilizan en muchos tipos de sistemas informáticos, pero la satisfacción de