

# LA ERA DEL **SILICIO.** DE LA ARENA AL MICROPROCESADOR

“Actualmente estamos inmersos en el cambio de una sociedad industrial por una sociedad de la información, en lo que se ha denominado la Revolución Tecnológica de la Información y la Comunicación”.

**POR CONCEPCIÓN ALDEA**



## La era del silicio. De la arena al microprocesador

**S**i en el siglo XIX tuvo lugar la Revolución Industrial, con el acero como materia prima y la industria pesada como protagonistas, el siglo XX fue la industria electrónica con los semiconductores, los agentes de la nueva revolución.

Actualmente estamos inmersos en el cambio de una sociedad industrial por una sociedad de la información, en lo que se ha denominado la Revolución Tecnológica de la Información y la Comunicación.

Entre las tecnologías que han hecho posible esta nueva era están: la Microelectrónica, los Nuevos Materiales, la Bioingeniería y la Informática, entre otras. Pero, sin duda, un elemento clave en esta revolución social ha sido el desarrollo de la Microelectrónica, proporcionándonos, día a día, circuitos integrados más pequeños, más baratos, más rápidos y más fiables. Este cambio tiene como máximo exponente la irrupción en nuestra vida cotidiana de equipos de telefonía móvil y telecomunicaciones, provocando un cambio radical en nuestros hábitos laborales y sociales.

En este artículo repasaremos la historia de esta revolución que nos ha llevado a nuestra actual sociedad tecnológica en tan solo unas décadas.

La Microelectrónica nace con la electrónica de estado sólido y tiene su origen en el descubrimiento del primer amplificador de estado sólido, el transistor de puntas de contacto.

El transistor surgió de la necesidad de sustituir a las válvulas de vacío que, a pesar de sus inherentes limitaciones, permitieron el diseño de los primeros equipos propiamente electrónicos (incluidos los primeros ordenadores), por un dispositivo que tuviera una vida media superior y un coste, tamaño y consumo mucho menor, manteniendo las funciones que realizaban las válvulas de vacío: interruptor, rectificador y amplificador de señal. Esto exigía la concepción de un dispositivo radicalmente distinto cuyo desarrollo conseguiría equipos electrónicos fiables en el ámbito de las comunicaciones y el tratamiento de datos.

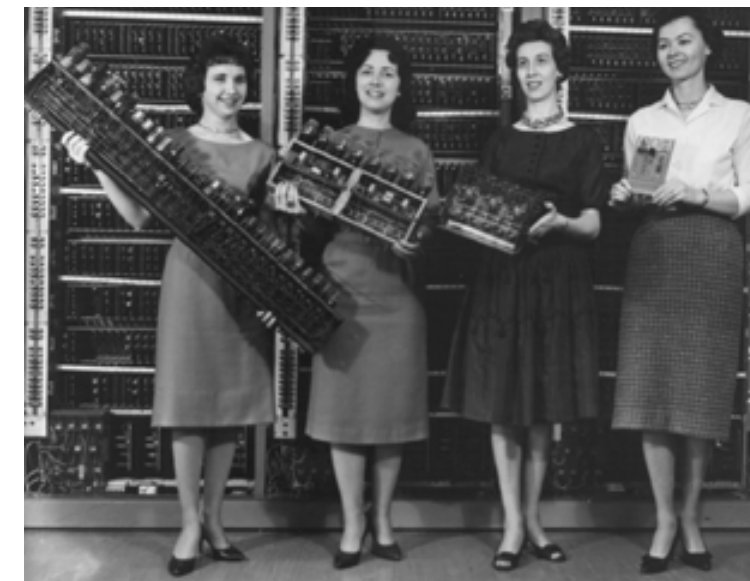
Como ejemplo paradigmático de esos primeros ordenadores está el ENIAC (Electronic

Numerical Integrator And Computer). Este ordenador totalmente digital fue construido en la Universidad de Pensilvania en 1946. Ocupaba una superficie de 167 m<sup>2</sup>, operaba con un total de más de 17.000 válvulas que le permitían realizar 5.000 sumas y 300 multiplicaciones por segundo con un consumo de 150 kW de potencia. Pesaba 27 toneladas, elevaba la temperatura del local a 50 grados y para "programar" las diferentes operaciones era preciso cambiar, conectar y reconectar los cables manualmente. Unas cifras estratosféricas si las comparamos con los ordenadores personales y *tablets* actuales.

### ORIGEN

El transistor, el dispositivo que reemplazaría a las válvulas de vacío y revolucionaría los campos de las comunicaciones y la computación, nació, junto a otros grandes descubrimientos, en los Laboratorios Bell.

Los orígenes de estos laboratorios se remontan a 1889 cuando Alexander Graham Bell crea el entonces conocido como Laboratorio Volta. Las oficinas y el laboratorio se encontraban en



A) ENIAC

B) Válvula de vacío (izquierda) y receptor de comunicaciones de onda corta (derecha).

itc.ua (A)

selfrescuingprincessociety.tumblr.com y  
www.burntorangenation.com (B)



## La era del silicio. De la arena al microprocesador

la casa del padre de Bell en el 1527 35<sup>th</sup> Street, en Washington, DC, donde la cochera se convirtió en su cuartel general. ¡Otra cochera importante! Unas décadas después, en los 40, otro garaje se convertiría en el origen de lo que es Hewlett-Packard HP y en los 70 otro garaje dio lugar al origen de Apple de la mano de Steve Jobs.

Posteriormente se crea la Bell Telephone Company y, en 1899, se establece un monopolio telefónico en los Estados Unidos al ser comprada por AT&T. En 1924, AT&T crea una nueva unidad llamada Laboratorios Telefónicos Bell (Bell Labs). Esta unidad de investigación y desarrollo ha llevado a cabo proyectos relacionados con la Astronomía, Semiconductores, Sistema Operativo Unix, y el lenguaje de programación C, entre otros. De sus laboratorios han salido más de 30.000 patentes, 8 premios Nobel y mucha de la tecnología que hace posible nuestra vida tal y como la entendemos actualmente. Por los pasillos de Bell Labs han pasado investigadores como Claude Shannon, uno de los padres de la Teoría de la Información, el Nobel de Física Clinton Davisson, los inventores del transistor o Russell Ohl, que patentó la primera célula fotovoltaica.

Volvamos a 1945. El entonces director de investigación de los Laboratorios Bell, Mervin J. Kelly, se dio cuenta de que el trabajo futuro requería un detallado conocimiento de la física de semiconductores. Los laboratorios Bell ya habían trabajado en el desarrollo del diodo de semiconductor (consecuencia de los avances del

radar en la Segunda Guerra Mundial), pero sin un completo entendimiento de la física de los electrones en semiconductores y metales. Mervin J. Kelly tomó una serie de decisiones que resultaron trascendentes para el desarrollo del proyecto y, en definitiva, de nuestra sociedad actual.

En 1945 creó el Grupo de Semiconductores con un conjunto de físicos y químicos brillantes: Brattain, Pearson, Moore, Gibney y Bardeen, dirigidos por William Shockley. Su objetivo: investigar los fenómenos de conducción eléctrica en semiconductores para poder desarrollar un amplificador que revolucionara los campos de las microondas y de la radio. Se limitó el estudio al silicio y al germanio como materiales base, y se retomó la idea patentada en 1926 por Julius Edgar Lilienfeld en el que un electrodo de control podría regular el flujo de corriente mediante el cambio del número de portadores que fluyen.

La combinación perfecta de estos factores, fruto de la visión de Mervin al crear un verdadero programa de I+D, culminó en el llamado mes del milagro, donde el 23 de diciembre de 1947, Brattain y Bardeen pusieron a punto el primer amplificador de estado sólido, el transistor de puntas de contacto. Había empezado la Era de la Microelectrónica.

### TRANSISTOR BIPOLAR DE UNIÓN

Pero la carrera no había hecho más que comenzar. Shockley, que no participó activamente en el descubrimiento del transistor de puntas de contacto, se dio cuenta de que era muy difícil de controlar el espacio de los electrodos y no creía que ese dispositivo fuera la solución definitiva. Pasó esa Nochevieja de 1947 y los dos días siguientes en un hotel de Chicago trabajando en algunas ideas para un

nuevo transistor que pudiera mejorar los resultados de Bardeen y Brattain (había ido allí a una reunión de la Physical Society). Esta conducta no era extraña en él, una mente brillante con un carácter difícil y complicado que traería sorprendentes consecuencias.

Una de las ideas que le surgieron fue construir un sándwich de semiconductores: tres capas de semiconductores apiladas juntas podrían trabajar como un tubo de vacío con la capa intermedia controlando el paso o no de corriente, pero no lo terminó de ver completo, así que lo dejó y se puso a trabajar en otra cosa.

En enero, Shockley estaba bastante deprimido, pensaba que él solo debería tener el mérito de la invención del transistor ya que, en definitiva, las ideas inicia-

**“Shockley, que no participó activamente en el descubrimiento del transistor de puntas de contacto, se dio cuenta de que era muy difícil de controlar el espacio de los electrodos y no creía que ese dispositivo fuera la solución definitiva”.**



Bardeen, Brattain y Shockley  
en los Laboratorios Bell.  
diario.latercera.com

**“La Microelectrónica tiene su origen en el descubrimiento del primer amplificador de estado sólido, el transistor de puntas de contacto”.**



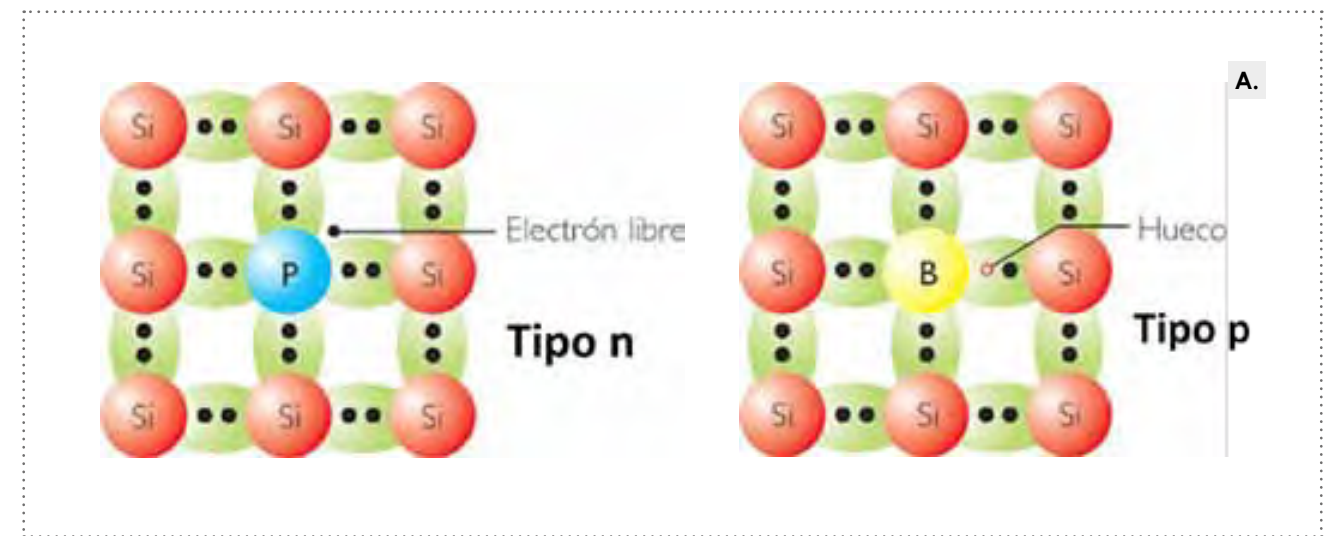
## La era del silicio. De la arena al microprocesador

les de la investigación habían sido suyas. Los abogados de Bell Labs no estaban de acuerdo y rechazaron incluso que apareciera en la patente. Mientras el resto del grupo trabajaba simplemente en mejorar el transistor de Brattain y Bardeen, Shockley seguía concentrado en sus propias ideas que, por supuesto, no compartió con nadie del equipo.

El 23 de enero de 1948, incapaz de conciliar el sueño, Shockley se encontraba sentado en la cocina de su casa y repentinamente tuvo la idea que mejoraba su concepción de transistor de tres capas que había postulado en

Nochevieja en Chicago. Las partes de las capas externas podrían ser semiconductores con muchos electrones, mientras que la del medio tendría muy pocos electrones. Esta capa actuaría como la llave de un grifo, controlando la corriente con una tensión eléctrica. La física detrás de este amplificador era muy diferente a la del transistor de puntas de contacto, ya que la corriente fluía a través de las piezas de semiconductor, no en la superficie. Acababa de concebir el transistor bipolar de unión (BJT en inglés).

El transistor bipolar de unión es un dispositivo que se obtiene dopando un monocristal semiconductor, es decir, introduciendo impurezas cuidadosamente seleccionadas y controladas, para modificar sus propiedades eléctricas. Si las impurezas son de valencia 5, como el antimonio o el fósforo, se producen materiales tipo n, en los que la conducción se debe principalmente a los electrones libres. Si las impurezas son de valencia 3, como el boro, se producen materiales tipo p donde los portadores son huecos. Las tres zonas semiconductoras se denominan emisor, E, que emite



A) Semiconductor dopado tipo n y tipo p respectivamente.

B) Estructura de un transistor bipolar npn (Microelectronic circuits, Sedra&Smith).

Imágenes cedidas por la autora

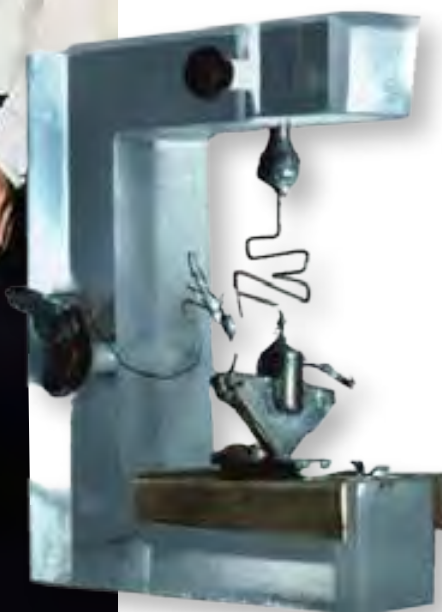
portadores y está fuertemente dopada, colector, C, que recibe o colecta los portadores y la base, B, que está intercalada entre las dos zonas anteriores y que sirve para modular el paso de portadores.

Para que estas dos uniones puedan funcionar como transistor se necesitan, al menos, dos condiciones:

1. Que la anchura de la base,  $W_B$ , sea muy pequeña comparada con la longitud de difusión,  $L$ , de los portadores que inyecta el emisor en la base.
2. Que la base esté ligeramente dopada con relación al emisor.

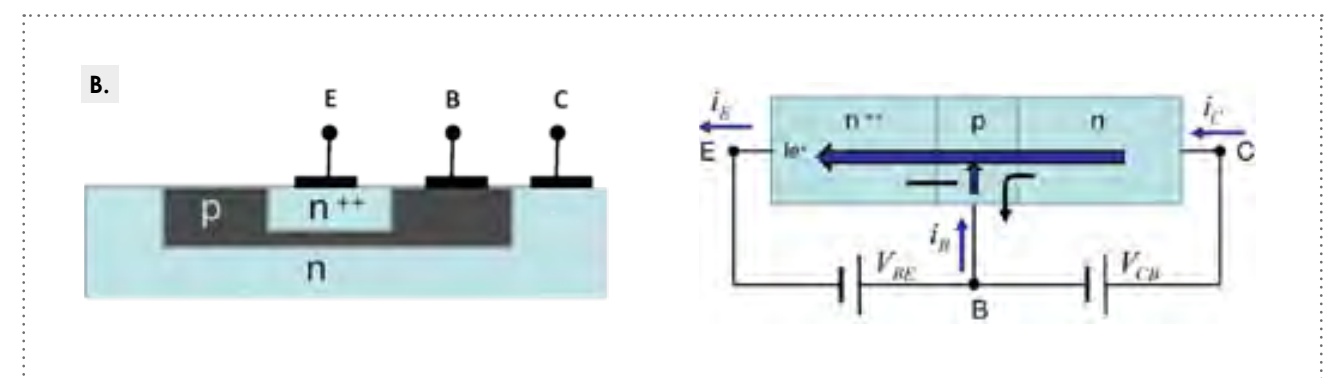
El 18 de febrero dos miembros del equipo, que estaban trabajando en un experimento aparte, presentaron al grupo unos resultados sorprendentes que habían ob-

**“El transistor bipolar de unión es un dispositivo que se obtiene dopando un monocristal semiconductor”.**



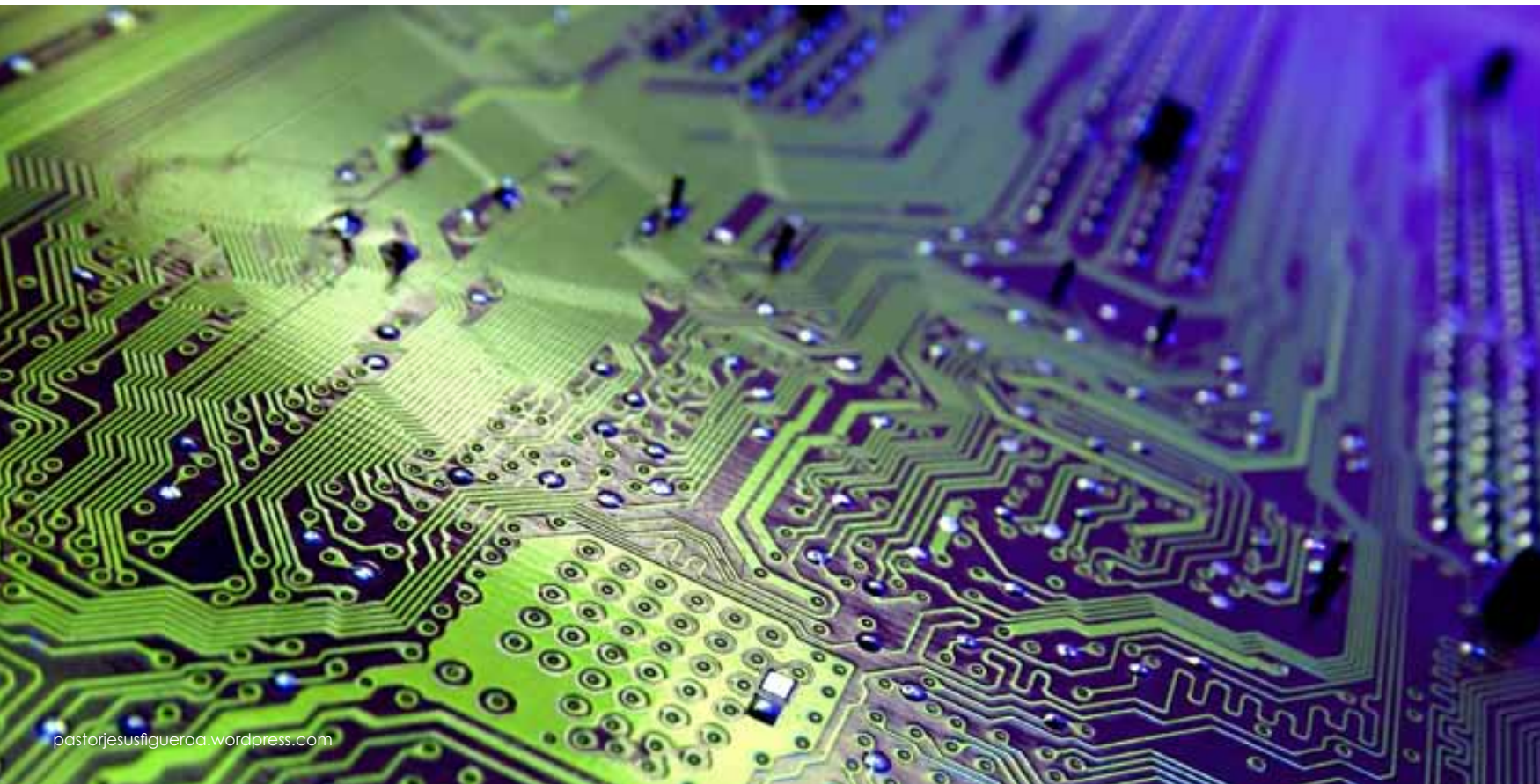
Portada de la revista Electronics, septiembre de 1948 (izquierda) y primer transistor (derecha).

beatriceco.com (derecha)  
harddepc.blogspot.com (izquierda)





## La era del silicio. De la arena al microprocesador



pastorjesusfigueroa.wordpress.com

**“El primer transistor bipolar de unión fue construido en 1951, dos años después de que Shockley formulara la teoría del dispositivo”.**

tenido y que solo podían ser explicados si los electrones viajaban a través del sustrato de un semiconductor. En ese momento, Shockley supo que tenía la prueba que necesitaba y compartió su concepto del nuevo transistor al resto del equipo.

Como es de imaginar, el ambiente en el laboratorio se enrareció. Bardeen recordaría años después que todo había ido como la seda hasta ese fatídico 23 de diciembre de 1947 en que vio la luz el primer transistor. Shockley, que al fin y al cabo era su jefe, no facilitó que Bardeen y su amigo Brattain trabajaran en proyectos que pudieran interesarles, lo que les llevó a salir de la empresa. No sería esta la última vez que la personalidad de Shockley llevara a gente de su alrededor a huir de él lo más lejos posible. La siguiente vez que coincidieron fue en la entrega del Premio Nobel que se les había concedido a los tres por el descubrimiento del transistor en 1956.

El primer transistor bipolar de unión fue construido en 1951, dos años después de que Shockley formulara la teoría del dispositivo. Curiosamente dicha teoría no fue, inicialmente, aceptada para su publi-

cación en *Physical Review*. Transcurrieron varios años antes de que la industria electrónica aceptase la utilización de este nuevo dispositivo en sus productos. Varias causas contribuyeron a ello: deficiencias iniciales en la fabricación así como la necesidad de reciclaje de los diseñadores para conocer en profundidad el nuevo dispositivo. Conscientes de ello, y para colaborar en su difusión, se realizó un Symposium patrocinado por el IRE\* (Institute of Radio Engineers) en 1952. En dicha reunión se revelaron los procesos de construcción del transistor de puntas de contacto, así como los progresos realizados con el de unión. Asistieron unas 35 compañías, obteniendo todas ellas la licencia de explotación.

El comienzo de la producción comercial de transistores bipolares permitió sustituir a las válvulas en los receptores de radio. Después de varios prototipos, el primer receptor que solo empleaba transistores comenzó a comercializarse en 1954. Este cambio tecnológico permitió que estos receptores fueran más pequeños y funcionaran a pilas. Su éxito fue enorme, hasta el punto de que para mucha gente “transistor” sigue siendo sinónimo de radio portátil.

El transistor fue una invención científica, fruto de una investigación realizada por científicos pero con muy poca conexión con la industria. Una vez aceptada por esta, el transistor supuso una auténtica revolución, dando origen a la denominada Electrónica de estado sólido. Tal es así

que afectó incluso a la enseñanza de la Electrónica como disciplina universitaria. A tal fin, y con objeto de preparar un material educativo que reflejase estos cambios, se formó a finales de 1960 un grupo de expertos conocidos como SEEC (Semiconductor Electronics Education Committee). Estaba compuesto por profesores universitarios y personal cualificado de industrias electrónicas y coordinados por los profesores Searle y Adler del Massachusetts Institute of Technology (MIT). El resultado final se plasmó en siete tomos dedicados a la enseñanza de la nueva Electrónica en estudios universitarios.

### SILICON VALLEY

Shockley decidió marcharse de Bell Labs en 1953 al ver que le negaban el acceso a puestos de más responsabilidad; decisión que sin duda la empresa tomó al ver cómo había gestionado su equipo de investigación. Regresó al lugar donde había crecido, en Palo Alto, California, cerca de la Universidad de Stanford, y unos años después, en 1955, fundó una división de semiconductores, Shockley Semiconductors Laboratory en los dominios de lo que hoy conocemos como Silicon Valley, con el capital de la empresa de un amigo suyo. La empresa era Beckman Instruments.

**“No sería esta la última vez que la personalidad de Shockley llevara a gente de su alrededor a huir de él lo más lejos posible”.**

\* La fusión del IRE (*Institute of Radio Engineers*), fundado en 1912 y el AIEE (*The American Institute of Electrical Engineers*), fundado en 1884 dio lugar en 1963 al IEEE (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers*), instituto internacional sin fines de lucro dedicado a promover la innovación y la excelencia tecnológica en beneficio de la humanidad.



## La era del silicio. De la arena al microprocesador



**Fundadores de Fairchild Semiconductors. De izquierda a derecha: Gordon Moore, Sheldon Roberts, Eugene Kleiner, Robert Noyce, Victor Grinich, Julius Blank, Jean Hoerni, Jay Last.**

Wayne Miller/Magnum

**“La ruptura se hizo real, a mediados del año 1957, cuando ocho hombres abandonaron a Shockley para buscar su propio camino de la mano de Sherman Fairchild”.**

A la hora de formar equipo, trató de reclutar sin éxito a antiguos compañeros de trabajo. Ninguno quiso acompañarle en su aventura, así que decidió recorrer el ámbito universitario en busca de los más prometedores estudiantes. Shockley, que tenía mucho ojo y gozaba de un enorme prestigio, logró reunir un auténtico 'dream team' de ingenieros, físicos y químicos jóvenes y talentosos. Alguno de ellos fueron: Julius Blank, Victor Grinich, Jean Hoerni, Eugene Kleiner, Jay Last, Gordon Moore, Robert Noyce y Sheldon Roberts.

Los problemas a la hora de trabajar fueron numerosos y se sucedieron en poco tiempo, llevando a un grupo de colaboradores a replantearse su pertenencia a la compañía. La ruptura se hizo real, a mediados del año 1957, cuando ocho hombres abandonaron a Shockley para buscar su propio camino de la mano de Sherman Fairchild, gracias al cual crearon su propio laboratorio de semiconductores, Fairchild Semiconductor. La nueva compañía se convirtió muy pronto en un líder de la industria de los semiconductores y sería la primera de un buen número de

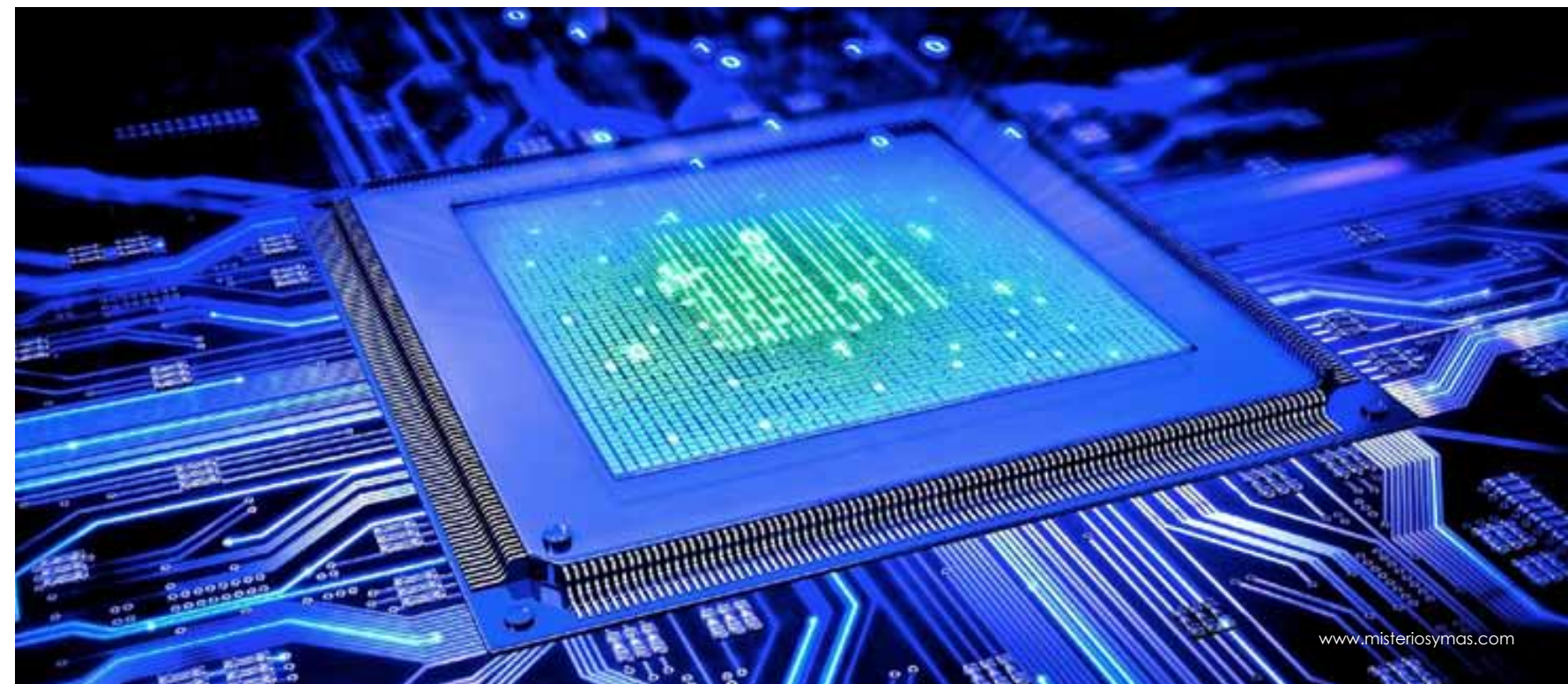
empresas del sector que se establecerían en lo que acabó conociéndose como Silicon Valley. Hablar de los inicios de Silicon Valley es hacerlo de este grupo de hombres con un peculiar sobrenombre. Son conocidos como “los ocho traidores”, y son en buena parte responsables de la creación de ese enclave de la tecnología y la computación. Entre aquellos hombres se contaban Robert Noyce, uno de los inventores del primer circuito integrado junto a Jack Kilby (Texas Instruments), y Gordon Moore, que acuñaría la ley, que lleva su apellido, en la que predijo que el número máximo de transistores por circuito integrado se duplicaría cada 18 meses.

### **TODO (O CASI TODO) VIENE DE FAIRCHILD**

En 1958 Hoerni inventa la técnica para difundir impurezas en el Si y construir transistores en tecnología planar. Y, un año después, Noyce desarrolla el primer circuito integrado utilizando esta técnica. Paralelamente, Jack Kilby en Texas Instruments (TI) postula la idea de un circuito integrado monolítico. Había nacido la Microelectrónica. A la gran invención científica que resultó el descubrimiento del transistor

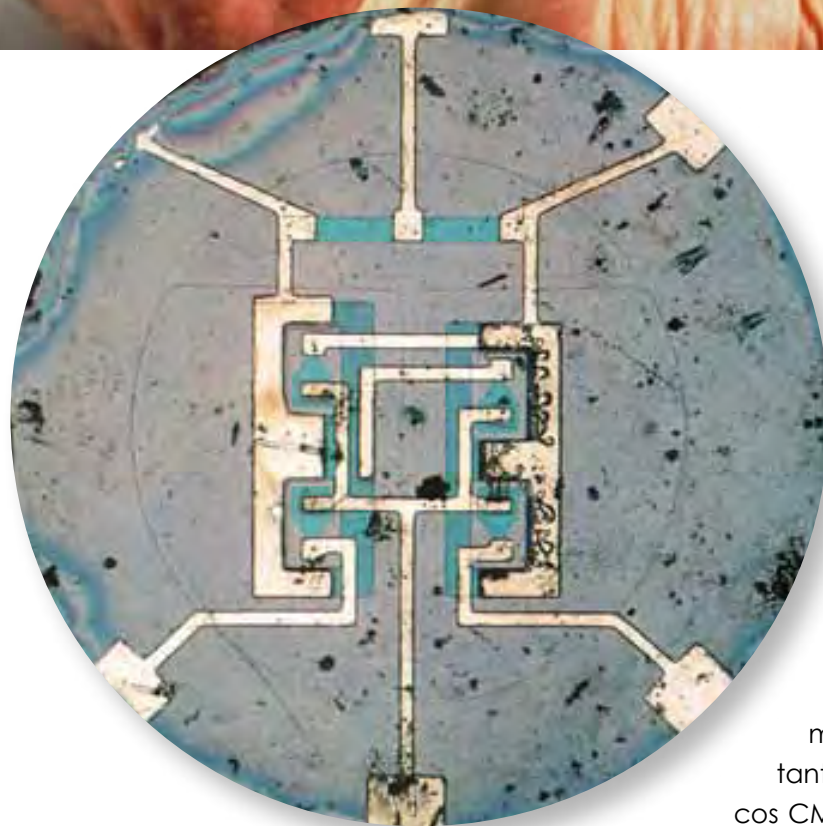
le siguió la invención tecnológica del circuito integrado. Las ventajas de la fabricación en masa de circuitos integrados eran enormes y podemos destacar entre ellas: la posibilidad de obtener componentes con tamaños de micras ( $10^{-3}$  mm), todos fabricados en el mismo sustrato, minimizar los fallos en sistemas complejos, disponer del máximo número de dispositivos en un chip de tamaño mínimo y disminuir el coste por función. El impacto de esta invención tecnológica sobre la industria electrónica fue aún mayor que la invención científica del transistor. Su desarrollo propició en la década de los 70 el nacimiento del microprocesador, hecho que para muchos marcó el comienzo de una revolución digital y cuya influencia está presente en prácticamente la totalidad de los aspectos de nuestra vida.

Gracias al método propuesto por Noyce, Fairchild pasó de facturar unos pocos miles de dólares, en sus inicios, a más de 130 millones, alcanzando los 12.000 empleados. Y, gracias a la tecnología del silicio, habían contribuido a uno de los mayores hitos tecnológicos de la Historia de la Humanidad: el vuelo del Apolo 8.





## La era del silicio. De la arena al microprocesador



**Jack Kilby con el primer circuito integrado (arriba) y primer circuito integrado con tecnología planar.**

[www.bevezetem.hu](http://www.bevezetem.hu) (arriba)  
Fairchild Semiconductor (abajo)

Desde ese momento, los avances se sucedieron rápidamente en el tiempo. En 1961 aparecen los primeros circuitos integrados digitales comerciales (TI & Fairchild) y en 1962 RCA Research Laboratories desarrolla el primer dispositivo integrado con 16 transistores MOS (metal-aislante-semiconductor). RCA fue pionera en la producción de tecnología MOS (bajo el nombre comercial COS/ OS) para circuitos integrados de muy baja potencia, primero en el sector aeroespacial y más tarde en aplicaciones comerciales. Gerald Herzog lideró un importante programa de diseño de circuitos lógicos CMOS (tecnología MOS complementaria) y memorias para la Fuerza Aérea en 1965. En 1968 la compañía presentó una memoria RAM estática de 256 bits y los primeros miembros de la popular familia de dispositivos lógicos de propósito general CD4000.

La idea de estos transistores MOS ya había sido patentada por Lilienfeld en los primeros años de la década de 1930, bastante antes de la invención del BJT. Sin embargo, debido a las limitaciones de fabricación, las tecnologías MOS no pudieron hacerse realidad

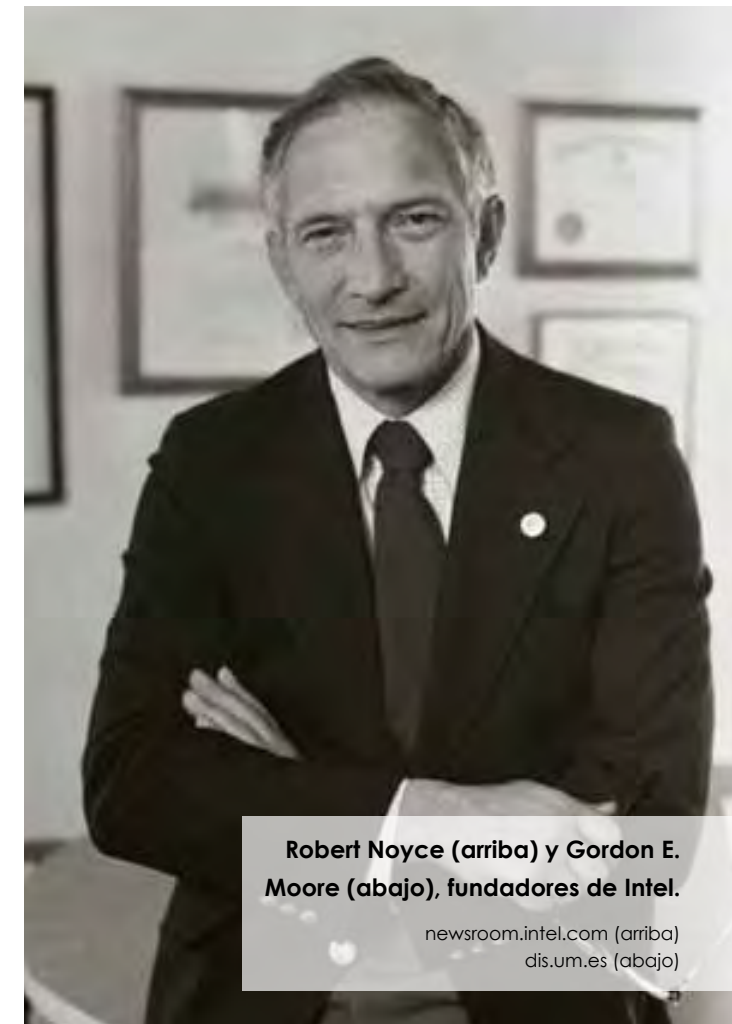
hasta los 60. Los circuitos CMOS rápidamente capturaron el mercado digital, ya que las puertas CMOS solo disipaban potencia durante la conmutación y se requerían muy pocos dispositivos para su implementación (en contraste su contrapartida bipolar). Además, se descubrió que las dimensiones de los dispositivos CMOS se podían escalar más fácilmente que las de otros tipos de transistores.

La estructura de un transistor MOS de canal n consta de dos pozos fuertemente dopados tipo n sobre un sustrato tipo p. El terminal de puerta está aislado del sustrato por un dieléctrico,  $\text{SiO}_2$  y el sustrato está conectado al punto más negativo del circuito para asegurar que las uniones pn estén inversamente polarizadas. Los transistores MOS son dispositivos de estado sólido en el que un campo eléctrico perpendicular controla el flujo de los portadores en el canal de conducción. Como los transistores bipolares, los transistores de efecto de campo pueden funcionar como amplificadores o bien como interruptores.

Si el valor que creó Fairchild se midiera en dólares de hoy en día, la empresa podría ser la primera 'startup' de un millón de millones del mundo (Endeavor Insights). El rastro de Fairchild, la compañía que sacó al mercado el primer chip, puede seguirse hasta la práctica totalidad de los gigantes actuales de la tecnología: Apple, Google, Facebook, Yahoo... Aquellos ocho pioneros sentaron las bases, formaron a los ingenieros y aportaron la financiación necesaria para prender la mecha que desembocó, décadas más tarde, en el boom de la informática, el de Internet e incluso el de las redes sociales.

### INTEL

*Innovation is everything. When you're on the forefront, you can see what the next innovation needs to be. When you're behind, you have to spend your energy catching up. (Robert Noyce)*



**Robert Noyce (arriba) y Gordon E. Moore (abajo), fundadores de Intel.**

[newsroom.intel.com](http://newsroom.intel.com) (arriba)  
[dis.um.es](http://dis.um.es) (abajo)





## La era del silicio. De la arena al microprocesador

Fue en el año 1968 cuando Moore y Noyce deciden emprender una nueva aventura empresarial. Moore y Noyce inicialmente quisieron llamar a la compañía "Moore Noyce" pero sonaba mal, ya que en inglés suena como *more noise*, que literalmente significa: más ruido, un nombre poco adecuado para una empresa electrónica, ya que el ruido en electrónica suele ser muy indeseable. Utilizaron el nombre NM Electronics durante casi un año, antes de decidirse a llamar a su compañía Integrated Electronics abreviado "Intel". Recorrer la evolución de la Microelectrónica a partir de esa fecha es hacerlo a través de los grandes hitos de Intel.

En 1971, se creaba en su seno otro invento crucial: el microprocesador. El Intel 4004 (i4004), una CPU de 4 bits, fue el primer microprocesador en un solo chip, así como el primero disponible comercialmente. Este circuito integrado tenía 2.300 transistores en una tecnología CMOS de 10 micras. El objetivo era reunir en un mi-

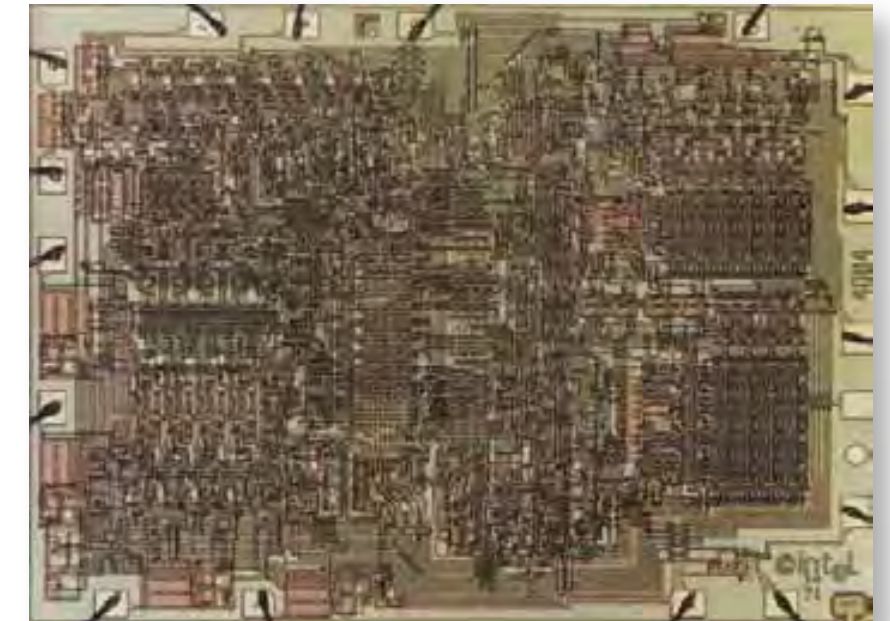
croprocesador todos los elementos necesarios para crear un ordenador, a excepción de los dispositivos de entrada y salida (teclado, pantalla, impresora, etc.) imposibles de miniaturizar. El 4004 fue diseñado e implementado por Federico Faggin, entre 1970 y 1971. En cuanto empezó a trabajar en Intel, Faggin creó una nueva metodología de "random logic design" con Silicon Gate, que no existía previamente, la cual se utilizó para encajar el microprocesador en un único chip. Esta metodología fue usada en todos los primeros diseños de microprocesadores Intel. El 4004 fue diseñado originalmente por Intel para la compañía japonesa Busicom, para ser usado en su línea de calculadoras. Este primer procesador tenía características únicas para su tiempo, como la velocidad del reloj, que sobrepasaba los 100 kHz.

El 22 de marzo del 1993 ve la luz por primera vez el "Pentium", también conocido por nombre clave P54C. Estos procesadores partían de una velocidad inicial de 60 MHz, llegando a los 200 MHz, algo que nadie había sido capaz de augurar unos años antes. Con una arquitectura real de 32 bits, se usaba de nuevo la tecnología de 0.8 micras, con lo que se lograba realizar más unidades en menos espacio. El Pentium poseía una arquitectura capaz de ejecu-

**"Como los transistores bipolares, los transistores de efecto de campo pueden funcionar como amplificadores o bien como interruptores".**

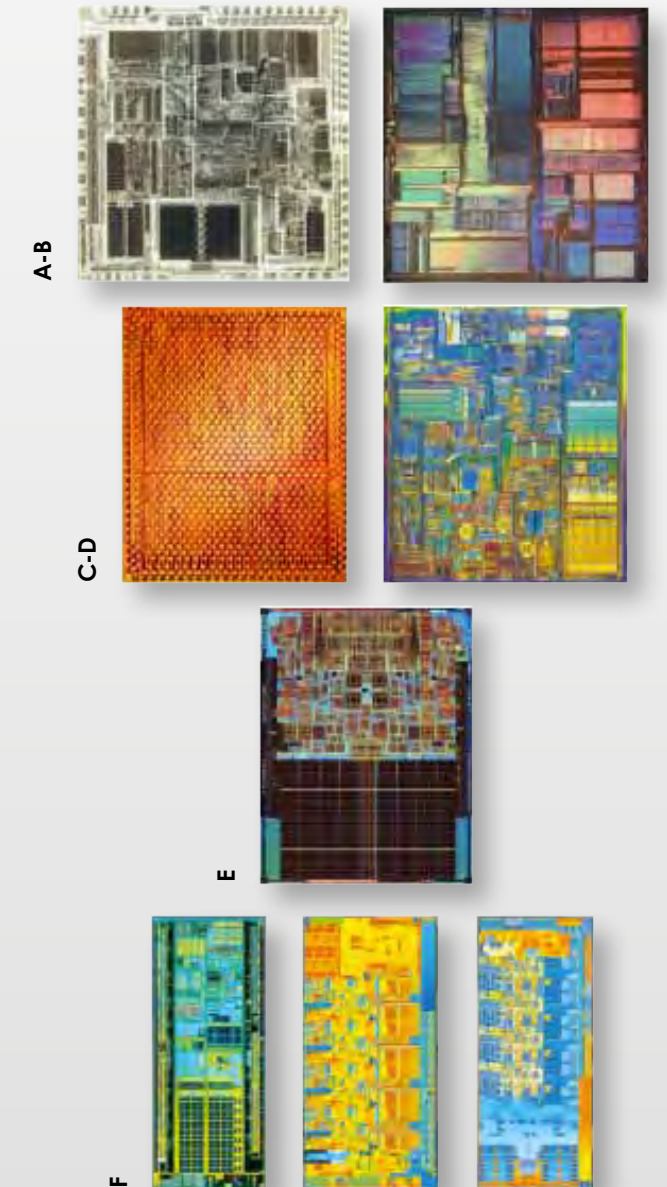
tar dos operaciones a la vez, gracias a sus dos *pipeline* de datos de 32 bits cada uno, uno equivalente al i486DX y el otro equivalente al 486SX.

La última familia, el Intel Atom, utiliza transistores con tres puertas (en lugar de una) envueltas alrededor del canal de silicio en una estructura 3-D, lo que permite una combinación sin precedentes de rendimiento y eficiencia energética. Intel diseñó este nuevo transistor para su uso en dispositivos portátiles, como teléfonos inteligentes y tabletas.



**Intel 4004, primer microprocesador (1971).**

[www.semiconvn.com](http://www.semiconvn.com)

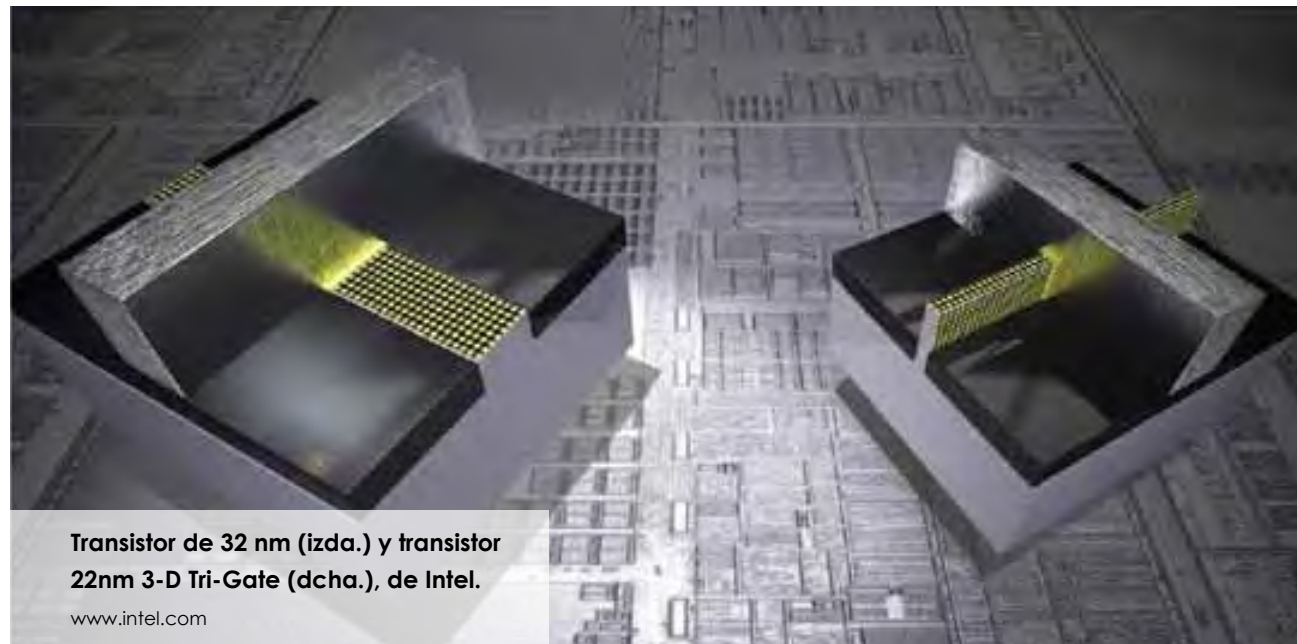


- A) 1982: Intel® 286  
134000 transistores 6MHz / 1.5 micras
- B) 1993: Intel® Pentium® / 3.1 millones de transistores 66MHz / 0.8 micras
- C) 1998: Intel® Celeron® / 7.5 millones de transistores 266MHz / 0.25 micras
- D) Intel® Pentium® 4 / 42 millones de transistores 1.5GHz / 0.18 micras
- E) 2006: Intel® Core™2 Duo / 291 millones de transistores 2.66GHz / 65 nm
- F) 2008-2015: Intel® Atom™  
1.4 billones de transistores / 22 nm

[www.intel.com](http://www.intel.com)



## La era del silicio. De la arena al microprocesador



Transistor de 32 nm (izda.) y transistor 22nm 3-D Tri-Gate (dcha.), de Intel.

www.intel.com

### FABRICACIÓN DE CIRCUITOS INTEGRADOS

Ha sido necesario un avance continuo en las tecnologías de integración para lograr fabricar los circuitos integrados actuales. Una de las estrategias ha consistido en disminuir el tamaño de los componentes, que están fabricados en el mismo sustrato, junto con la tecnología que permite obtener el máximo número de dispositivos en un chip de tamaño mínimo.

Resulta difícil pensar en el esfuerzo de miniaturización, en el grado de reducción que se ha logrado en los dispositivos capaces de procesar información. El cabello humano tiene unas 50 micras de diámetro y actualmente se fabrican circuitos integrados con elementos que permitirían colocar 5.000 dispositivos en un solo cabello.

Para tener una idea de este nivel de escala basta pensar en la relación que existe entre la lámpara de la mesita de noche de un dormitorio de un piso de París y el área metropolitana de dicha ciudad.

Esto es equivalente a la relación entre un circuito integrado (por ejemplo, un microprocesador) y uno de los transistores que lo forman.

Un circuito integrado complejo es como una gran ciudad. Los barrios, zonas residenciales y parques industriales desempeñan funciones complejas en el tránsito de las personas, del mismo modo que los sistemas electrónicos procesan el flujo de información de manera distinta. Memorias, unidades centrales de proceso, procesadores digitales de señales, interfaces entrada salida. Incluso las líneas de alimentación y buses de datos de los circuitos tienen su contrapartida en las rondas periféricas y avenidas de las ciudades. Otro nivel es el constituido

**“Una de las estrategias ha consistido en disminuir el tamaño de los componentes, y obtener el máximo número de dispositivos en un chip de tamaño mínimo”.**

por los edificios, donde el flujo de personas es procesado de manera local dependiendo de sus interrelaciones personales y grupales. Esto tiene el equivalente en los distintos tipos de circuitos (amplificadores, convertidores A/D y D/A) que procesan las señales eléctricas de manera muy diferente. El siguiente nivel, las subsecciones de un circuito (etapas de polarización, protección, referencias, etc.) son como las dependencias de un edificio: cada una está especializada en una función. Y por último, los componentes y dispositivos elementales (resistencias, condensadores, transistores) son como el mobiliario de las habitaciones.

Estos procesos de fabricación se llevan a cabo bajo unas condiciones muy controladas de limpieza, partículas de polvo en suspensión, vibración, temperatura, humedad, etc. en las deno-

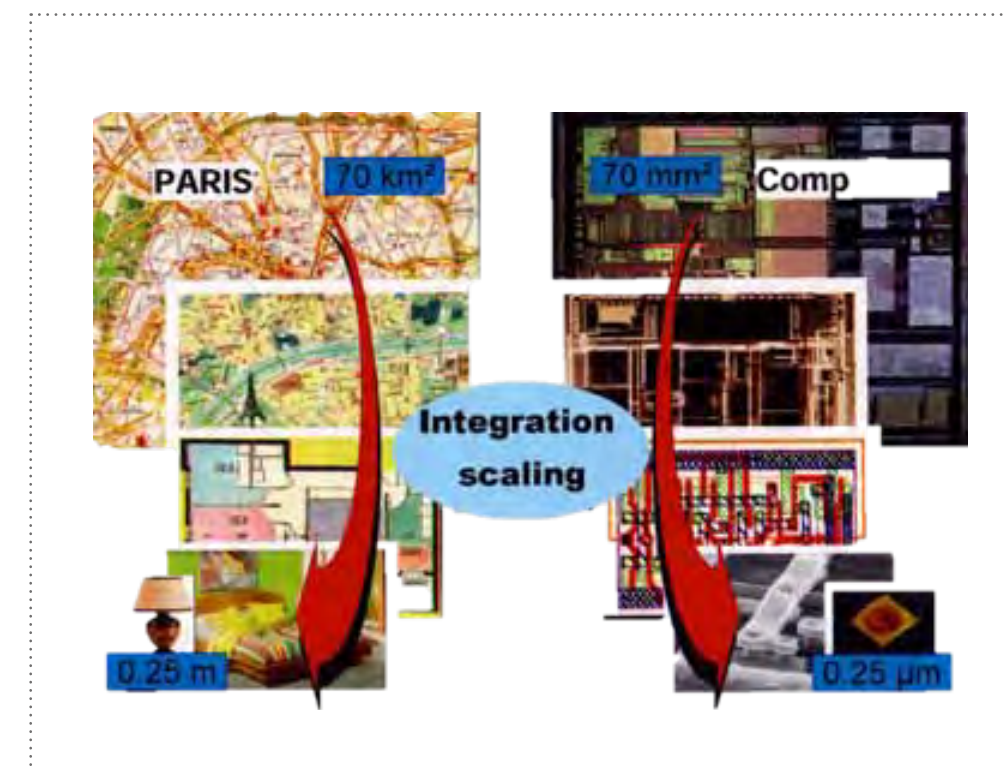


Ejemplo de la ENIAC y el iPhone 6: factor 10<sup>9</sup> de reducción y de eficacia.

itc.ua y www.tekrevue.com



minadas salas blancas donde el personal técnico requiere de un vestuario especial y servicios específicos. Una sala de operaciones estándar en un hospital está considerada un nivel clase 100 en que hay 100 partes por millón de impurezas. Normalmente las fábricas de circuitos integrados tienen salas blancas de nivel 10 (10 partes impuras por millón). Habitaciones de clase 10 son posibles si los



Relación entre el área de un circuito integrado complejo y uno de sus transistores.

Imagen cedida por la autora.



## La era del silicio. De la arena al microprocesador

usuarios utilizan respiración artificial (filtros, ventilación artificial); incluso está prohibido entrar a personal que, aunque ya no lo sea, haya sido fumador.

Los avances en la fabricación de circuitos integrados han desarrollado hasta tal punto la tecnología de silicio que ha derivado en la fabricación de microsistemas electromecánicos (MEMS) de gran precisión para nuevas aplicaciones. Algunos ejemplos son los sensores integrados en numerosos dispositivos, incluyendo el conocido sistema *airbag* de los automóviles o los MEMS aplicados a la Biología o BioMEMS diseñados para interactuar con los sistemas biológicos, abriendo un nuevo campo a la Nanotecnología.

### ¿PRESENTE O FUTURO? NANOTRANSISTORES

Hace ya más de 50 años, en una reunión de la Sociedad Americana de Física organizada por el Instituto Tecnológico de California (Caltech), Richard Feynman (Premio Nobel de Física en 1965) dio una charla denominada "Hay mu-

cho sitio al fondo." En su discurso imaginativo, Feynman discutió la promesa tecnológica de máquinas diminutas tan pequeñas como unos pocos átomos dando origen a la Nanotecnología. Existe actualmente la tecnología para la realización de transistores de longitudes de canal de 22 nm y ya hay en producción transistores de 14 nm. Se prevé llegar a tener transistores de 5 nm en 2020. Esto obligará a solucionar problemas tecnológicos que suceden como consecuencia de esas dimensiones. La resolución de la litografía es clave en la miniaturización de los circuitos. Se debe garantizar un alineado perfecto de la máscara con la oblea durante todos los procesos litográficos minimizando los efectos de difracción y distorsión ópticas, por no hablar de la resolución exigida a la máscara. Hay que tener en cuenta que, cuanto menores son las dimensiones de los componentes, menor debe ser la longitud de onda de la luz para que la difracción sea inapreciable. La luz UV es una solución estándar pero las lentes de vidrio son opacas a ella (se utiliza cuarzo). Una solución puede estar en la utilización de rayos X (aún más energética) pero hace falta encon-



Sala blanca de Intel.

Imagen cedida por la autora.

**“Se prevé llegar a tener transistores de 5 nm en 2020. Esto obligará a solucionar problemas tecnológicos que suceden como consecuencia de esas dimensiones”.**

trar un material que sea opaco a los penetrantes rayos X y avanzar en las películas fotosensibles a estas longitudes de onda.

¿Podría llegarse a una densidad de dispositivos equivalente a la densidad neuronal en el cerebro humano? Si queremos establecer una relación entre número de transistores y neuronas, nos encontraremos con el problema de la conectividad. Al aumentar el número de transistores por chip, surge la necesidad de un mayor número de conexiones entre ellos, por lo que se necesitan más capas de metal -separadas por aislante- para la interconexión. Actualmente el número de capas de metal y los parásitos asociados a ellas es uno de los mayores problemas a resolver por la tecnología microelectrónica.

Quedan todavía muchos retos por alcanzar en la tecnología del silicio, una tecnología consolidada y todavía imbatible a otras alternativas, y que ha sido y es fuente de continuos hitos tecnológicos y sociales.

Concepción Aldea

Dpto. de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones  
Facultad de Ciencias  
Universidad de Zaragoza

### REFERENCIAS

1. J. S. Kilby, "The Integrated Circuit's Early History", Proceedings of the IEEE, vol. 88, n. 1, Jan 2000
2. W. F. Brinkman, D. E. Haggan and W. W. Troutman, "A History of the Invention of the Transistor and Where It Will Lead Us", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 32, n. 12, Dec 1997
3. J. Singh, Dispositivos Semiconductores, McGraw-Hill, 1997
4. K. Dean and G. White, The Semiconductor Story, Wireless World, 1973
5. E. Braun and S. Mc. Donald, Revolution in Miniature, Cambridge University Press, 1978
6. C. T. Sah, "Evolution of the MOS Transistor," Proceedings of the IEEE, vol. 76, n. 10, Oct. 1988
7. R. G. Arns, "The Other Transistor: Early history of the Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor," IEEE Engineering Science and Education Journal, vol. 7, n. 5, Oct. 1998

<http://www.endeavor.org/blog/new-endeavor-insight-report-analyzes-the-source-of-silicon-valleys-development/>

<http://www.intel.com/content/www/us/en/history/museum-visiting-intel.html>

[http://www.intel.la/content/dam/www/public/lar/xl/es/documents/40\\_aniversario\\_del\\_procesador.pdf](http://www.intel.la/content/dam/www/public/lar/xl/es/documents/40_aniversario_del_procesador.pdf)

<http://www.computerhistory.org/>

<http://www.pbs.org/transistor/index.html>