

DANIEL PARDO COLLANTES



VNIVERSIDAD D SALAMANCA
Secretaría General

Electrónica:

del pasado al presente

Lección Inaugural del Curso Académico 2011-2012
pronunciada por el Profesor Dr. D. Daniel Pardo Collantes,
Catedrático de Electrónica en la Facultad de Ciencias
de la Universidad de Salamanca,
en el solemne Acto Académico celebrado
el día 23 de septiembre de 2011
presidido por el Sr. Rector Magnífico
D. Daniel Hernández Ruipérez.

DANIEL PARDO COLLANTES

Electrónica: del pasado al presente



VNiVERSiDAD
D SALAMANCA

© Universidad de Salamanca
Autor

Depósito Legal: S. 1.050-2011

Impreso en España - Printed in Spain

GRÁFICAS LOPE

C/ Laguna Grande, 79. Polígono «El Montalvo II»

Teléf. 923 19 41 31 - Salamanca (España)

www.graficaslope.com

*Todos los derechos reservados. Ni la totalidad ni parte de este libro
puede reproducirse ni transmitirse sin permiso escrito
de la Universidad de Salamanca.*

*Excmo Sr Rector Magnífico,
Excmos e Ilmos Señores,
miembros de la Comunidad Universitaria,
amigas y amigos,
señoras y señores:*

Es para mí un gran honor presentar hoy y aquí, en el Paraninfo de la Universidad, la lección inaugural del curso 2011-2012. Y de ello estoy agradecido a muchas personas: en primer lugar, a los componentes del Consejo de Gobierno por aceptar la propuesta que para tal fin recibieron de los directores de Departamento de Ciencias; y a estos, y en particular a mi director de Departamento, por confiar en mí para que los represente en este acto. A unos y otros espero no defraudar.

A la hora de elegir el tema que voy a presentar, mi primer pensamiento se dirigió a las personas que asisten normalmente a una lección inaugural. Ante su heterogeneidad, decidí que fuese una lección accesible a todos, sin últimos avances cuantitativos en investigación, y con contenidos que en algunos de sus apartados se imparten a los alumnos como introducción de las asignaturas correspondientes a esta materia. Por tanto, voy a presentar una panorámica de la Electrónica resaltando aquellos aspectos que considero han sido esenciales en su desarrollo y que la han encuadrado como materia científica, y que sirva para satisfacer el interés cultural de los aquí presentes.

INTRODUCCIÓN

El siglo xx será recordado por los historiadores como el de la Revolución Científica y Tecnológica, con tres representantes fundamentales: átomo, gen y bit. Admitiremos que relacionada con el bit está la Electrónica. Y en pocas ramas de la Ciencia pueden percibirse mayores transformaciones y cambios más profundos que los experimentados por la Electrónica desde su nacimiento. Es una especialidad científica del siglo xx, cuyo desarrollo es tan vertiginoso que en la actualidad sus resultados están presentes en todos los sectores de la actividad humana. Por citar algunos datos, existen más de 1500 millones de teléfonos móviles en todo el mundo, y más de 500 millones de ordenadores. Se estima que el

negocio de la Electrónica supera el 10% del producto mundial bruto.

Por ello precisamente la Electrónica no presenta un cuerpo de doctrina bien asentado y estructurado. Su carácter evolutivo se debe a que la Electrónica actual es una combinación o mezcla entre ciencia básica, aplicada y tecnología, y que cualquier variación en uno de estos aspectos produce cambios en el conjunto y puede modificar su contenido. Además, presenta un carácter marcadamente innovador, promoviendo y estimulando avances en otras ciencias. Sin avances en la Electrónica, un país desarrollado quedaría obsoleto en poco tiempo y su capacidad competitiva internacional se vería debilitada, lo cual constituiría una amenaza para el nivel de vida de sus ciudadanos. El nivel de desarrollo que la Electrónica ha logrado en un país es, en nuestros días, un parámetro que se utiliza para establecer su grado de desarrollo.

Para caracterizar a la Electrónica suele decirse que es una combinación de realidad física, contrastada experimentalmente, y una realidad abstracta comprobada mediante modelos matemáticos. Su conocimiento debe hacerse a través de varios niveles, acoplados entre sí y consistentes. Pero estas características, que por supuesto cumple, no informan explícitamente de su contenido.

Es muy difícil, por no decir imposible, enclaustrar a la Electrónica en una definición exacta y concisa. Y una descripción más amplia, estableciendo una relación exhaustiva de los temas que trata, tampoco resulta adecuada al no poder especificar con exactitud sus fronteras actuales, pues los límites son difusos y cambiantes. Quizá una mezcla de argumentos en extenso e intenso permitirá alcanzar un concepto más claro de esta materia. Además, un cierto conocimiento de su evolución histórica nos permitirá entender conceptos y teorías modernas asociados a su desarrollo.

Para poner de manifiesto lo poco adecuado que resulta una definición concisa de la Electrónica, solemos decir que **«Electrónica es la parte de la Física que estudia el transporte controlado de cargas eléctricas»**. Y enseguida nos daríamos cuenta de que si bien esta definición contiene algunas características de lo que es la Electrónica, es lo suficientemente imprecisa como para que requiera algunos comentarios que la delimiten.

Por ejemplo: ¿Qué entendemos por «transporte controlado»? Evidentemente no está explícito en la definición y cada persona puede proponer una respuesta. Podrá por ejemplo decirse: por «controlado» entiendo todo sistema en el que el experimentador puede variar a voluntad, en este caso, la conducción eléctrica. ¿Podemos entonces inferir que cualquier material resistivo es objeto de la Electrónica, ya que en él puede controlarse la corriente eléctrica? Sabemos que no, el estudio de una simple resistencia, que

puede controlar la corriente, cae dentro de la Electrodinámica.

Las discusiones que podrían seguir sobre lo que entra dentro del dominio de la Electrónica llegarían a ser definidas, sin ambigüedad, como bizantinas. Y todo ello debido al hecho de que la Electrónica no es exclusiva en su contenido, es decir, el entendimiento de la materia que nosotros llamamos Electrónica presupone el conocimiento de una cierta cantidad de leyes de otras partes de la Física, de las cuales la más cercana es sin duda el Electromagnetismo. Encontramos sumamente difícil establecer en unas palabras dónde acaba una y dónde comienza la otra. Y esto no sólo con relación al Electromagnetismo. Por ejemplo: en el estudio «electrónico» de los semiconductores, ¿dónde acaba la Física del Estado Sólido para dar paso a la Electrónica?

La alternativa a la infructuosa labor de definir qué entendemos por Electrónica, como ya hemos dicho antes, sería dar una

relación de todos y cada uno de los dispositivos que con el nombre de «electrónicos» conocemos. Pero este camino no es mejor. Los inconvenientes son manifiestos: requeriría un conocimiento completo de la materia y no sabríamos a ciencia cierta si un nuevo hallazgo debe o no ser añadido a la lista.

Como ya he dicho antes, quizás la mejor solución sea una mezcla de los dos caminos señalados previamente: indicar las características generales de la Electrónica y añadir una relación de los temas que se han ido agrupando sucesivamente para formar la parte de la Física que hoy conocemos como Electrónica.

Vamos entonces a presentar en esta lección una evolución de la Electrónica a través del tiempo mediante la ordenación de los acontecimientos y desarrollos científicos principales que han configurado lo que hoy conocemos como tal. Este planteamiento nos permitirá delimitar y concretar los aspectos esenciales de la Electrónica.

Posteriormente presentaremos los grandes temas en los que la Electrónica, hoy en día, encuentra su desarrollo.

ELECTRÓNICA DE VACÍO

A diferencia de otras disciplinas que forman parte de la Física y que tienen su origen en el conocimiento del Universo que nos rodea, el motor que desarrolla la Electrónica reside en un intento de mejora e innovación de los sistemas de transmisión y recepción de información a distancia, así como del procesado y almacenamiento de la misma. Su origen puede situarse muy a finales del siglo XIX, época caracterizada por un desarrollo espectacular de la Ciencia, cuando se aborda el estudio de una serie de fenómenos curiosos y casi mágicos, conocidos desde la antigua Grecia. El resultado es el establecimiento de un cuerpo de doctrina perfectamente asentado para una nueva parte de la Física, denominada actualmente Electromagnetismo.

Ya existían antecedentes, pues S. F. Morse concibe la idea del telégrafo electromagnético, que se prueba en 1844 con una línea entre Baltimore y Washington. Y en 1876 A. G. Bell solicitaba la patente del teléfono.

Sin embargo, desde un punto de vista científico, el momento culminante se produce en 1865 con los trabajos de J. C. Maxwell estableciendo las bases teóricas del Campo Electromagnético. Sus ecuaciones no se limitan a una simple formulación matemática de los trabajos de M. Faraday, sino que predicen la existencia de ondas electromagnéticas.

La generación y detección de dichas ondas electromagnéticas es realizada por H. R. Hertz en 1886, comprobando además que obedecían a la formulación matemática de J. C. Maxwell. La verdadera trascendencia de estas investigaciones es que, por un lado, proporcionaron una verificación experimental de las ecuaciones de

Maxwell y, por otro, sentaron las bases para una nueva era en las comunicaciones.

Estos trabajos de Hertz dieron lugar a que en 1895 G. Marconi intuyera las posibilidades comerciales de las ondas hertzianas (Premio Nobel de Física en 1909). La primera patente de la radio en 1897, aunque en un solo país, Reino Unido, fue suya. Esto le ha acreditado habitualmente como el padre de la radio y de las telecomunicaciones inalámbricas.

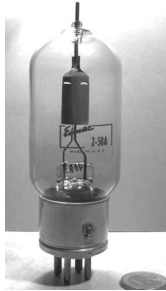
Paralelamente en el tiempo, en 1880 se observó el primer fenómeno electrónico propiamente dicho. Fue T. A. Edison quien descubrió el efecto que inicialmente llevó su nombre y que en la actualidad se conoce con el nombre de efecto termoiónico. Observó que en una ampolla de vidrio en la que se hacía el vacío, la conducción eléctrica se establecía entre un filamento caliente y un segundo electrodo, sin que hubiese entre ellos ningún medio conductor. Edison no llegó a interpretar su observación, y ésta llegaría años más tarde, en

1903, llevándola a cabo O. W. Richardson (Premio Nobel de Física en 1928), quien demostró que los electrones son emitidos por superficies metálicas calientes mediante un proceso similar a la evaporación.

Ligeramente posterior, en 1887, H. R. Hertz descubre la emisión fotoeléctrica al observar que el arco que salta entre dos electrodos conectados a alta tensión alcanza mayores distancias cuando se ilumina con luz ultravioleta. También este fenómeno fue explicado científicamente unos años más tarde por A. Einstein, en 1905 (Premio Nobel de Física en 1921).

Clave para estas explicaciones fue el descubrimiento del electrón por J. J. Thomson en 1897 (Premio Nobel de Física en 1906). La aparición del electrón como partícula «discreta» tuvo su origen en los trabajos de H. Geissler y J. W. Hittorf sobre la conductividad en gases. Ellos descubrieron lo que denominaron «rayos catódicos»

y que en realidad no era otra cosa que el flujo de electrones saliendo del cátodo.



Diodo de Vacío de J. A. Fleming
(hacia 1910)

J. J. Thomson sometió a los «rayos catódicos» a la acción de campos eléctricos y magnéticos y determinó la relación carga/ masa de las partículas que constituían esos rayos catódicos (el electrón). Posteriormente, en 1912, R. A. Millikan (Premio Nobel de Física en 1923), con su célebre experimento de las gotas de aceite, logró determinar con gran exactitud la carga de la nueva partícula (la carga del electrón y por tanto también su masa). El

descubrimiento del electrón significó un duro golpe a la mentalidad del «continuo» (reforzada por el éxito de la teoría de Maxwell), por lo que no es de extrañar que la existencia del electrón fuera admitida, inicialmente, con gran resistencia.

Los primeros dispositivos electrónicos no se hacen esperar. En 1905, J. A. Fleming inventa el diodo de vacío, encerrando en una ampolla de vidrio, donde hizo el vacío, dos placas metálicas. Calentó una (cátodo) a la que aplicó una tensión negativa con respecto a la otra (ánodo). El cátodo emitía electrones que eran recolectados por el ánodo. Cuando el tubo se incluía en un circuito receptor de ondas hertzianas, los electrones eran atraídos solo cuando el ánodo o placa era positivo con respecto al cátodo. Lograba pues rectificar la señal recibida y la corriente obtenida podía actuar, por ejemplo, sobre un receptor telefónico.

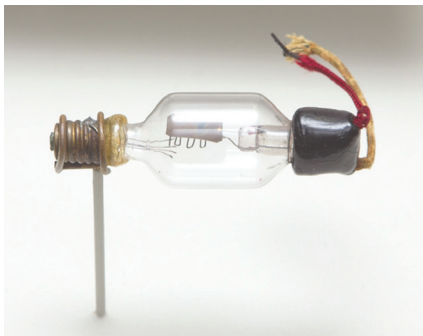
Este había sido el objetivo de J. A. Fleming: encontrar un detector para ondas hertzianas. Sin embargo la aplicación

práctica no fue inmediata y hasta que esto ocurrió fue sustituido por un detector de cristal de plomo (la galena). El tubo de vacío se fue perfeccionado, aumentando el vacío de su interior, hasta que su funcionamiento fue más seguro que el detector de cristal.

ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES

Comenzaba así la larga marcha común que emprendían la Electrónica y las Comunicaciones, de la que ambas saldrían beneficiadas. Los dispositivos electrónicos de vacío mejoraron en aquel entonces las comunicaciones y la necesidad de mejorar estas animaba al espíritu de investigación.

Poco tiempo después de la aparición del diodo, en 1907 aparece el triodo (llamado «audiión» en su tiempo) descubierto por L. de Forest, introduciendo un tercer electrodo (una rejilla) entre ánodo y cátodo del diodo de vacío. Observó que aplicando una tensión adecuada a esta rejilla controlaba



El primer triodo utilizado por Lee de Forest

la corriente que fluía entre ánodo y cátodo, ventaja fundamental si se tiene en cuenta que en el diodo de J. A. Fleming el único control posible era el de la temperatura del cátodo. Así, una pequeña señal eléctrica aplicada a la rejilla puede producir grandes variaciones en la corriente entre ánodo y cátodo. Como detector de ondas hertzianas resultaba ser una válvula mucho más sensible que el diodo y además era capaz de amplificar la señal que se aplicaba a su rejilla. En 1912, L. de Forest diseñó y aplicó el

primer amplificador de válvulas con varios triodos en cascada, obteniendo más amplificación que con uno solo.

Hemos hablado de la Electrónica y las Comunicaciones. No es desde luego el único campo de aplicación y progreso de la Electrónica. El efecto fotoeléctrico, conocido mucho antes, se utiliza en la célula fotoeléctrica, que encuentra aplicación en los siguientes años en la televisión y el cine sonoro. La emisión secundaria da lugar a los tubos fotomultiplicadores, los cuales se utilizaban para amplificar señales radiantes, pero han visto reducirse en gran medida sus aplicaciones, quedando prácticamente limitadas a la detección de partículas.

Las mejoras tecnológicas de los tubos de vacío existentes hasta ese momento permitieron el diseño y la puesta en uso de amplificadores y osciladores, que constituyen circuitos básicos para los sistemas de transmisión de señales a distancia. En particular, la utilización del triodo como

oscilador (generador de señales sustituyendo a los antiguos de arco o chispa) fue un factor determinante para el sistema heterodino de transmisión y recepción de información (la radio).

Resumiendo la situación hasta 1930, se puede decir que no surge ninguna nueva aportación en el campo de los dispositivos electrónicos, sino que los esfuerzos investigadores se centran en perfeccionar lo que se tenía y en profundizar en los conocimientos que expliquen los continuos avances experimentales. Así, en estos años se desarrollan los aspectos teóricos, estableciendo una verdadera base científica que transformará paulatinamente el carácter experimental de lo obtenido hasta el momento por el análisis físico y matemático razonado.

Y quizá uno de los ejemplos más reveladores de esta situación se produce dentro del campo de las comunicaciones, donde surgen las teorías matemáticas sobre el proceso de modulación de señales, con el



Receptor de radio,
fabricado por Telefunken en 1929



Receptor de televisión,
fabricado por PredictaTV (EEUU) en 1958

fin de obtener modelos que permitan su caracterización y mejora. El primer estudio teórico de la modulación en amplitud fue realizado por C. Englund en 1914, descubriendo las bandas laterales. Posteriormente, C. Carson proporcionó un gran impulso a las comunicaciones al proponer la modulación de banda lateral única, patentando en 1923 un circuito para este tipo de emisión. A él se debe también la modulación en frecuencia.

Quizá el invento más sobresaliente por el impacto social que ha causado hasta nuestros días fue el de la televisión, cuyo origen debe ser buscado en la emisión fotoeléctrica, y se atribuye a V. Zworykin en 1928. Él encontró el dispositivo capaz de transformar una imagen óptica en una corriente eléctrica: el iconoscopio.

En esta época, 1927, una idea muy importante se debe a H. S. Black, al introducir el concepto de realimentación como medio de reducir la elevada distorsión (ruido) presente en el proceso de

amplificación de señales de comunicaciones. Los trabajos posteriores de H. Nyquist y H. W. Bode sobre la estabilidad de los sistemas realimentados completan esta idea y dotan a la Electrónica de una de sus herramientas más potente y usada en el diseño de circuitos.

Constituyen estos años, 1930-1940, la época dorada de la radio, que técnica y comercialmente adquiere una enorme expansión, y como consecuencia una rápida proliferación de emisoras radiofónicas. La gran demanda de receptores y sistemas emisores que lleva asociada hace posible situar precisamente en esta época el comienzo de la Electrónica de consumo, un concepto nuevo que se prolonga hasta la actualidad.

Es también esta una época en la que se vislumbran otras posibilidades y aplicaciones para los dispositivos electrónicos: desarrollado de modo independiente por G. A. Philbrick y C. A. Lovel aparece el Amplificador Operacional para la realización de

las operaciones de integración y derivación en calculadoras analógicas. Con la finalidad de medir la distancia a la que se encontraban las distintas capas de la ionosfera, en esta época también E. V. Appleton en Inglaterra y G. Breit y M. Tuve en Estados Unidos comienzan a sentar las bases de lo que luego sería el radar (acrónimo de Radio Detection And Ranging).

La Segunda Guerra Mundial resulta ser un factor determinante para el impulso definitivo de la Electrónica y de la industria a ella asociada. Así, Inglaterra se ve seriamente amenazada en su propia supervivencia como nación, y una de sus mejores armas para impedirlo es utilizar su ingenio, aplicado especialmente a la tecnología electrónica. Este esfuerzo colectivo y la necesidad imperiosa del radar hizo posible la creación de un gran equipo de investigadores ingleses y americanos que lo desarrollaron casi hasta el estado de perfección actual.

Otra importante consecuencia de esta crisis mundial fue el notable impulso que experimentó la aplicación de la Electrónica a procesos de control. Lógicamente sus primeras aplicaciones fueron militares, pero constituyó un paso decisivo en el desarrollo futuro de la Electrónica, pues suponía una clara ampliación de sus fronteras, limitadas hasta entonces al campo de las comunicaciones. Por su propia naturaleza, los sistemas requeridos para procesos de control debían presentar elevada fiabilidad, rapidez de operación y miniaturización, características todas de los sistemas electrónicos. A partir de estas aplicaciones se creó una nueva rama interdisciplinar de la Ciencia: la Cibernética (ciencia del control y la comunicación en el animal y en la máquina).

Precisamente, N. Wiener, a quien se considera uno de los fundadores de la Cibernética, fue uno de los responsables del gran impulso que experimentó la aplicación de la Electrónica. Sus trabajos sobre

control en servomecanismos aplicados a la lucha antiaérea, realizados en el MIT (Massachusetts Institute of Technology), llevaron a muchos escépticos a manifestar su temor por la supremacía de la máquina sobre el hombre. Ante esta pregunta, N. Wiener contestó: «... *solamente la pereza intelectual humana podría permitir que los equipos de procesamiento electrónico de datos lleguen a ser algún día más inteligentes que el hombre ...*».

La Electrónica como disciplina científica está en esta época en todos los departamentos de las Fuerzas Armadas de Estados Unidos. Y para ponerlo de manifiesto demos unas cifras. En 1941, 45 fabricantes de equipos de radio alcanzaron una cifra de ventas de 240 millones de dólares. En 1944, la industria de la radio y el radar llegaba a los 4500 millones. En la posguerra siguió creciendo a un ritmo cuatro o cinco veces más rápido que el resto de la industria. Al examinar pormenorizadamente las ventas de la industria

electrónica entre 1950 y 1960 se ve que las de productos destinados al público apenas aumentan, mientras que las de los servicios militares crecieron un 650 por ciento. En un informe preparado para el Departamento de Defensa se demostraba que el 70 por ciento de todo el tiempo de investigación de los físicos de 750 universidades y colegios estaba dedicado a investigación militar.

Y si hablamos de I+D, tenemos que hacia 1960 el 70 por ciento de la investigación y desarrollo de la industria electrónica se pagaba con fondos federales. Es decir, que al menos en Estados Unidos, la nación hegemónica durante ese periodo, el primer factor de desarrollo de la industria electrónica no es la aportación de la sociedad de consumo.

ELECTRÓNICA E INFORMÁTICA

Los primeros trabajos teóricos sobre sistemas digitales y ordenadores se remontan

a mediados de los años 30, mereciendo citarse las contribuciones de A. M Turing y C. Shannon. Las necesidades bélicas de Inglaterra constituyeron un considerable estímulo para la construcción del primer ordenador electrónico. Bajo la dirección y patrocinio del gobierno británico se formó un equipo de investigación cuyo propósito era el diseño de una máquina electrónica para criptoanálisis, obteniendo como resultado el «Colossus», el cual comenzó a funcionar en 1943 y puede considerarse como el primer ordenador electrónico de propósito especial. Constituyó además una de las armas decisivas de los aliados durante la contienda, ya que se usó con éxito para descifrar los mensajes secretos de las comunicaciones alemanas.

De estos breves comentarios se puede concluir que la Segunda Guerra Mundial condicionó en gran medida el desarrollo de la Electrónica, acelerando la aplicación de los dispositivos electrónicos a nuevos sistemas. Finalizado el conflicto se inició

también un amplio desarrollo de aplicaciones dedicadas a la industria, tecnología y electrónica de consumo, significando el comienzo de una nueva era para la Electrónica.

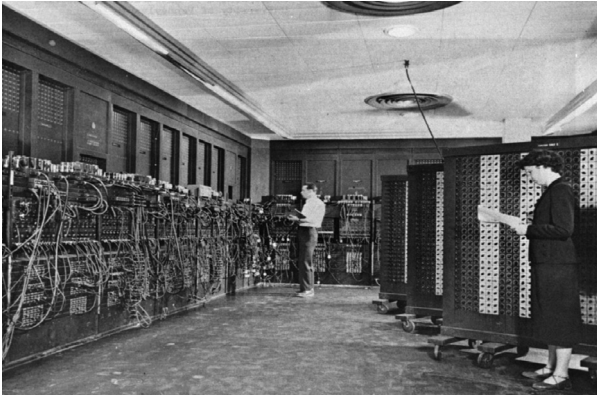


Imagen del ENIAC

Debemos señalar aquí como evento importante para la Electrónica que en 1945 se fabricó el ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer), utilizado por el Laboratorio de Investigación Balística del Ejército de Estados Unidos. Se suele considerar el primer ordenador electrónico digital

de propósito general. Se construyó en la Universidad de Pennsylvania, ocupaba una superficie de unos 160 m² y operaba con un total de unas 19000 válvulas de vacío. Conseguía realizar unas 3000 sumas y 500 multiplicaciones en 1 segundo. Ya ejecutaba sus procesos y operaciones mediante instrucciones en lenguaje máquina, a diferencia de otras computadoras de aquella época basadas en procesos analógicos. Sin embargo, cuando su programa (software) requería modificaciones, la demora de utilización era de unas semanas ya que requería la operación manual de unos 6000 interruptores. Uno de los mitos que rodea este aparato es que la ciudad de Filadelfia, donde estaba instalado, sufría apagones cuando el ENIAC entraba en funcionamiento; su consumo de energía era muy elevado, unos 150 kW.

ELECTRÓNICA DE SEMICONDUCTORES

Desde el año 1833 se había observado la existencia de una serie de materiales cristalinos, denominados semiconductores,

que llamaban poderosamente la atención de los investigadores, pues presentaban una conductividad que aumentaba con la temperatura, mientras que en los metales disminuía.

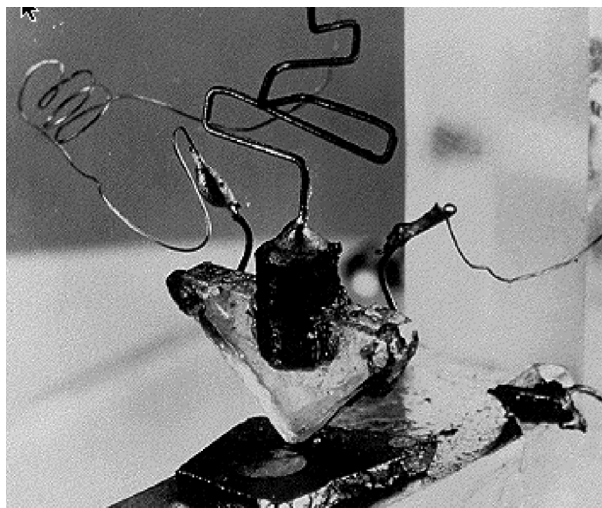
Aunque se utilizaron para la construcción de rectificadores, con una primera patente en 1906, las propiedades y características de los semiconductores no habían podido ser explicadas adecuadamente, y así no puede resultar extraño que los primeros dispositivos electrónicos construidos con estos materiales estuviesen basados en el comportamiento de los electrones en el vacío y en metales. A partir de 1925 se produce un avance significativo en el estudio teórico de los mecanismos de conducción en sólidos, y apoyándose en ellos, en 1938, W. H. Schottky establece el primer modelo para el contacto metal-semiconductor.

La mejora continuada del funcionamiento de las válvulas de vacío y su amplia difusión no estimulaban demasiado la búsqueda

de nuevos dispositivos. No obstante, poco a poco se iba poniendo de manifiesto que estos dispositivos no eran los ideales: demasiado voluminosos, consumo de potencia elevado, generando excesivo calor, caros y de vida corta. Estos inconvenientes no podían reducirse drásticamente ya que son características inherentes a su principio de funcionamiento.

Teniendo en cuenta estos factores negativos y con vistas al futuro, después de finalizar la segunda guerra mundial la Bell Telephone crea un Departamento de Física del Estado Sólido, bajo la dirección de W. Shockley y S. Morgan, con el fin de abordar el desarrollo de dispositivos electrónicos a partir de semiconductores. Como primer resultado del trabajo de este grupo, en 1939, R. S. Ohl descubre la barrera p-n (unión p-n).

Las primeras investigaciones de W. Shockley le llevan a proponer en 1940 un dispositivo prácticamente igual al actual transistor de efecto de campo, en el que la



Primer transistor de puntas de contacto

conductividad de una barra semiconductor (Germanio) debía ser controlada mediante un campo eléctrico creado por una placa muy próxima. Se esperaba además que utilizando el terminal de la placa como entrada el dispositivo amplificase. Cuando se hicieron las correspondientes experiencias, los resultados fueron negativos. La explicación fue propuesta por

J. Bardeen en 1947: sugirió que los electrones extra eran atrapados en los estados superficiales del cristal y que su comportamiento era diferente del de los electrones interiores. Al poco tiempo, en 1948, J. Bardeen y W. Brattain anuncian el descubrimiento del amplificador de estado sólido que primero funcionó: el transistor de puntas de contacto. El término «transistor» es la contracción en inglés de *transfer resistor*.

Este dispositivo presentaba bastantes limitaciones, por lo que W. Shockley siguió investigando y buscando un nuevo transistor. En 1948 publica la teoría de lo que denominó transistor de unión, siendo construido el primer dispositivo en 1951. En esencia, este nuevo transistor tenía el mismo principio de funcionamiento, y la modificación con respecto al anterior consistía en sustituir las uniones de punta de contacto por uniones p-n. El transistor bipolar (las corrientes en él están formadas por dos tipos de portadores) había nacido.

El transistor bipolar actual es descendiente directo de éste, sin otras modificaciones que las impuestas por el desarrollo de las tecnologías y la aparición de nuevos semiconductores.

Quizá sea adecuado mencionar aquí que en la aparición del transistor bipolar se observa un aspecto claro que da carácter científico a la Electrónica: el fracaso en la primera idea de fabricar un transistor (el de efecto de campo) lleva a varios investigadores a concentrar sus esfuerzos en la naturaleza científica del problema más que en los aspectos prácticos. El fallo inicial conduce a un replanteamiento científico cuya trascendencia se encargaría de demostrar el tiempo.

En 1956 , W. Shockley, J. Bardeen y W. Brattain reciben el Premio Nobel de Física por sus trabajos en semiconductores y por la invención del transistor bipolar. En 1972, J. Bardeen fue otra vez galardonado con el Premio Nobel de Física, junto a

L. Cooper y J. Schrieffer, por el desarrollo de la teoría de la superconductividad.

Bell Telephone adopta en 1952 una decisión importante para la difusión y mejora de este nuevo dispositivo. Organiza un Symposium con asistencia de científicos y las principales compañías electrónicas de aquella época, dando a conocer en dicha reunión los procesos de construcción del transistor y concediendo licencias para su fabricación. A partir de ese momento toda la industria electrónica concentra sus esfuerzos en el desarrollo y perfeccionamiento del transistor bipolar.

Durante los siguientes años, las técnicas de obtención de semiconductores de calidad electrónica (de pureza elevada) experimentan grandes mejoras, a las que se unen también avances en los procesos de fabricación de los dispositivos. Todo ello da lugar a mejores transistores: Fairchild Semiconductor introduce los transistores de difusión; R. L. Wallace, L. G. Schimpf y E. Dickten (Bell Telephone Lab.) el transistor

de doble base y H. Krömer propone el transistor de deriva, con lo que se consigue ampliar el rango de frecuencias de trabajo.

Es importante señalar que las continuas mejoras en los procesos de fabricación permiten un mayor control de los parámetros de los transistores y una mayor uniformidad entre dispositivos. En esta línea, Fairchild introdujo el proceso planar de fabricación y los laboratorios Bell el método epitaxial. Las nuevas versiones de transistores bipolares superaban, al menos en parte, los dos inconvenientes que presentaban los primeros dispositivos: limitación en frecuencia y potencia disipada.

La primera línea de producción en serie de transistores de IBM funcionó en Poughkeepsie, New York. Cuando estuvo en funcionamiento total en 1960, producía 1800 transistores individuales en una hora.

Estos avances en la tecnología de fabricación permitieron que en los años 60 se pudiesen fabricar con éxito transistores de efecto de campo, cuyos principios

básicos de funcionamiento fueron ya enunciados en 1930. Debemos mencionar aquí a D. Kahng y M. M. Attala, que en 1960 (Bell Telephone Laboratories) proponen como nuevo dispositivo electrónico el transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET). Como se indicará más adelante, las especiales características de estos transistores permitirán a partir de la década de los 70 un desarrollo espectacular de los sistemas electrónicos digitales.

La aplicación de los semiconductores al control de potencia eléctrica comienza a realizarse a mediados de la década de los 50, coincidiendo con el auge en el empleo del Silicio en lugar del Germanio, de modo que la invención y posterior desarrollo de los transistores de potencia y tiristores añaden una nueva dimensión a la tecnología de control y conversión de potencia eléctrica.

En 1958 L. Esaki descubre junto a otros investigadores el efecto túnel (típicamente

cuántico) cuya aplicación da lugar al diodo túnel. Su utilización inicial fue para la generación de señales (oscilador) de muy alta frecuencia. Posteriormente se le intentó dar, sin mucho éxito, otras aplicaciones que comentaremos más adelante. Por estos descubrimientos Esaki recibe en 1973 el Premio Nobel de Física.

En 1963 J. B. Gunn descubre que en algunos semiconductores compuestos (GaAs, InP, etc.) aparece una zona de resistencia incremental negativa (disminución de la corriente al aumentar el campo eléctrico). Este fenómeno también se aprovecha para generar señales de alta frecuencia (señales de microondas). En 1966, C. A. Mead, con base en estos semiconductores compuestos, presenta el MESFET (transistor de efecto de campo metal-semiconductor), el cual es un transistor de altas prestaciones (bajo ruido y capaz de trabajar con señales de altas frecuencias, microondas), que será la base de otros transistores modernos, basados

en heterouniones, los HEMT (transistores de electrones de alta movilidad), de los cuales hablaremos posteriormente.

Sin ninguna duda, los transistores constituyen uno de los mayores descubrimientos de nuestra época, ilustrando su aparición una de las características más relevantes de la investigación tecnológica: interacción continua entre experimentación en laboratorio y análisis teórico exhaustivo de los correspondientes fenómenos. Este tipo de equipos de trabajo interdisciplinarios constituye el modelo típico de progreso tecnológico en la era de la Electrónica.

Si hasta ahora he mencionado dispositivos que tratan o generan señales eléctricas, existe otro campo apasionante en Electrónica y es aquel que forman los dispositivos optoelectrónicos; aquellos que son capaces de convertir energía eléctrica en radiación óptica o viceversa. H. Kroemer por un lado y Z. Alferov por otro propusieron en los años 50-60 la heterounión de semiconductores para mejorar las prestaciones de los

transistores existentes hasta entonces. También para obtener nuevos dispositivos electrónicos muy importantes en nuestros días: los diodos emisores de luz (LEDs) y el láser semiconductor de doble heterounión; dispositivo, este último, clave para, por ejemplo, las comunicaciones. Por estos trabajos recibieron en el año 2000 el Premio Nobel de Física.

CIRCUITOS ELECTRÓNICOS DISCRETOS

Inicialmente, la introducción del transistor en los circuitos electrónicos se realiza como una mera sustitución de las válvulas de vacío, por lo que los primeros circuitos con transistores son simples adaptaciones con ligeras modificaciones de los correspondientes a tubos de vacío. Esta forma de actuar condiciona la calidad de los sistemas resultantes, aunque en un corto espacio de tiempo se establecen nuevos criterios y nuevos diseños que aprovechan al máximo las características especiales de los transistores.

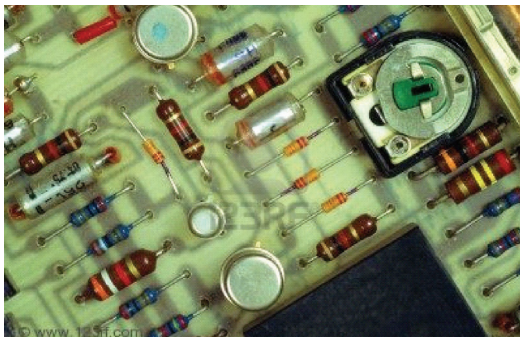
Todas las ventajas del transistor, especialmente su bajo consumo y su pequeño tamaño, lo configuran como elemento ideal para el campo de las comunicaciones, donde se impuso rápidamente y produjo a su vez una mejora en la calidad de las mismas. La aplicación de estos nuevos dispositivos electrónicos al control e instrumentación también resultó muy rápida. Las características de amplificación y conmutación de los transistores son muy adecuadas para controlar todo tipo de máquinas y procesos industriales, lo mismo que para efectuar mediciones de cualquier magnitud física, siempre que se disponga del sensor adecuado.

Este campo de medida se amplía considerablemente con el desarrollo de sensores que permiten utilizar métodos electrónicos en la determinación de magnitudes físicas no eléctricas. Se incrementa de este modo la capacidad de medir multitud de fenómenos que el hombre no podía determinar con precisión con los

medios utilizados hasta entonces, y en algunos casos ni siquiera detectar. De esta forma, la Electrónica contribuye al desarrollo y avance de otras muchas ramas de la Ciencia, de ahí la gran repercusión que la Electrónica posee hoy en todo el desarrollo científico y tecnológico.

Una de las aplicaciones del transistor que más rápidamente generalizó su uso fue la conmutación de señales, impulsando grandemente el estudio de las teorías de diseño lógico. La aparición del ordenador digital de programa almacenado le abrió al transistor un campo mucho más fecundo que el que podría haber encontrado en las aplicaciones tradicionales de la Electrónica.

Los proyectos militares y aeroespaciales son los grandes impulsores de la miniaturización y el aumento de la fiabilidad de los sistemas electrónicos, propiciando un gran esfuerzo investigador en estas direcciones, cuyo resultado final fue la aparición de los circuitos integrados.



Circuito electrónico con elementos discretos



Computador IBM 7030, de 1961,
con 17.000 transistores

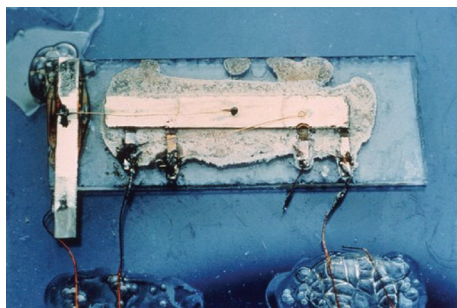
Antes de aparecer los circuitos integrados, los elementos que constituían un circuito se soldaban en unas placas y se establecía un cableado para unir los diferentes elementos. Alrededor de 1950 los cableados «desordenados» se sustituyeron por placas con «circuitos impresos». Estos presentaban dos ventajas fundamentales: mayor fiabilidad al eliminar parte de las soldaduras, y la posibilidad de encarar producciones automatizadas a gran escala.

Estos circuitos impresos fueron equipados, en sus comienzos, con componentes individuales. Si se pretendiera construir la parte electrónica de un computador moderno con este tipo de circuitos y componentes, no solo se llenaría una gran sala sino que, además, sería necesario realizar reparaciones de forma constante en intervalos de pocas horas. El paso de la electrónica a la microelectrónica puede definirse como la transición de los componentes individuales al circuito

integrado, también llamado «chip», o sea un pequeño cristal de Silicio que contiene gran cantidad de elementos individuales en forma miniaturizada interconectados entre sí (inicialmente con dimensiones de micras).

ELECTRÓNICA INTEGRADA: DE LA MICROELECTRÓNICA A LA NANOELECTRÓNICA

Me parece adecuado indicar que, al igual que ocurrió en otros grandes descubrimientos, el primer circuito integrado apareció después de que otros investigadores no



Circuito integrado original de J. Kilby

lograsen totalmente lo que durante varios años estaban buscando. Así, debe citarse a G. W. A. Dummer, quien trabajaba para el Royal Radar Establishment del Ministerio de Defensa Británico, y que en la Conferencia Anual sobre Componentes Electrónicos de 1952 proponía la posibilidad de utilizar una oblea semiconductor para la formación de resistencias, condensadores, diodos y transistores, que además podían tener interconexiones.

Para que estas ideas se puedan hacer realidad deben transcurrir algunos años hasta que se lleven a cabo algunos avances tecnológicos asociados a la fabricación de componentes discretos. El primer circuito integrado se debe a J. Kilby en 1959, estando trabajando para la empresa Texas Instruments. Se trataba de una placa de Germanio que integraba seis transistores para formar un oscilador. En el año 2000, J. Kilby recibe el Premio Nobel de Física por la contribución de su invento al desarrollo de la tecnología de la información.

Con el desarrollo y puesta a punto por Fairchild Semiconductors en 1960 de la tecnología planar, la cual permite realizar fácilmente las conexiones entre los diversos componentes de un circuito, los circuitos integrados se desarrollan de forma vertiginosa. A ello contribuyen decisivamente algunos gobiernos, interesados por su directa aplicación en proyectos militares y espaciales. Podemos decir que el impacto del circuito integrado fue muy superior al que produjo el transistor, cuya implantación fue mucho más gradual.

La utilización de circuitos integrados en el diseño de aplicaciones electrónicas ha permitido la fabricación de sistemas extraordinariamente complejos, inconcebibles sin ellos, y no solamente por la reducción de volumen y costo, que ya es importante, sino especialmente por el considerable aumento de la fiabilidad de operación y su mayor eficiencia energética. Con la incorporación de los circuitos integrados, la Electrónica comienza a estar

presente de un modo real y evidente en prácticamente todos los aspectos de la actividad humana.

La eficacia característica de la microelectrónica no se agota con los adjetivos «pequeño», «eficaz» y «económico». En la transición de la Electrónica a la Microelectrónica (de los componentes discretos a los circuitos integrados) es muy importante el cambio en el modo de operación de la propia Electrónica, el cambio del procesamiento analógico al procesamiento digital.

El mundo en el que vivimos nos proporciona señales analógicas. Y el procesamiento de señales se realizaba de forma analógica. Por ejemplo, las ondas sonoras generadas por alguien que habla son transformadas por el micrófono en señales eléctricas analógicas, esto es, en señales eléctricas de tensión y frecuencia correspondientes a las ondas sonoras, y de esta forma se transmitían a través del cable. En el auricular del que escucha, las oscilaciones eléctricas que llegan vuelven a transformarse en

ondas sonoras. En los sistemas telefónicos digitales, cuya utilización hoy en día es total, se reemplaza la transmisión de información analógica por métodos de transmisión digital. Ya no se transmite una señal que corresponde al nivel sonoro momentáneo, se envía una secuencia de impulsos (señal digital) que indican los valores numéricos de la correspondiente presión acústica.

Por supuesto existen unos circuitos electrónicos que convierten la señal analógica en digital y viceversa. Antes del auricular del que escucha, un circuito convierte la información digital en analógica.

A pesar de que el primer circuito integrado fuese analógico, existieron innumerables razones para que los circuitos integrados digitales evolucionasen mucho más rápidamente que los analógicos, razones tanto económicas como tecnológicas. En particular debemos mencionar la diversidad de circuitos diferentes que se

necesitarían para procesar señales de forma analógica, cada uno con aplicaciones específicas, con límites de funcionamiento bastante estrictos y dándose incluso el caso de tener que elegir las características de cada transistor de acuerdo con su misión específica dentro del circuito. Estas características no resultaban demasiado atractivas para su integración.

Por el contrario, para transmitir, procesar y almacenar digitalmente magnitudes (con representación binaria: pasa corriente – no pasa corriente) solamente se necesitan tres tipos de circuitos básicos: puertas AND, OR y NOT. De estos sencillos circuitos básicos se pueden obtener, mediante secuencias y combinaciones, circuitos con funciones más complejas. Estos circuitos se componen, fundamentalmente, de una cierta cantidad de transistores, contactos y el conexionado. Debido a lo pequeño y a la regularidad geométrica de las estructuras de conexionado, estos circuitos estaban predestinados a su integración en un módulo microelectrónico.

El gran desarrollo tecnológico alcanzado en la década de los 70 permite la integración de circuitos de muy elevada complejidad, pero los grandes costes de diseño y fabricación solo eran compatibles con un elevado volumen de producción, requisito que solamente cumplían las unidades de memoria y algunos productos de consumo general. Era necesario adoptar una nueva

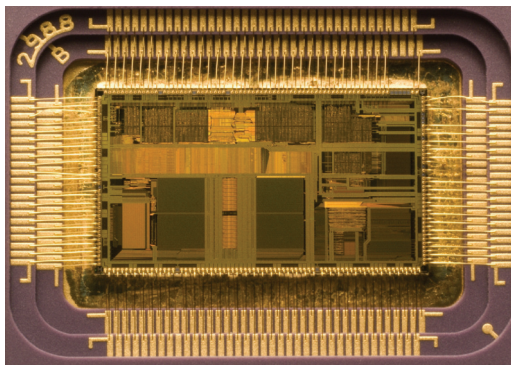


Imagen de un microprocesador de la familia 80486 de Intel, en producción desde 1989 a 2007, con una señal de reloj de 25 a 100 MHz y con tecnología de fabricación de $0.8 \mu\text{m}$ (longitud del canal del MOSFET)

alternativa en el diseño digital que permitiese compatibilizar el uso de una gran densidad de integración en la fabricación de circuitos integrados digitales con la menor limitación de sus posibilidades funcionales.

EL MICROPROCESADOR

La perspectiva de disponer de un sistema cuya estructura fuese independiente de la función concreta a realizar constituía una solución muy atractiva. Si además dicho sistema podía adaptarse a realizar varias funciones sin introducir modificaciones en su estructura, se convertía en la solución casi ideal, siendo el resultado de este proceso la aparición de los sistemas digitales programables. Uno de estos circuitos programables, quizá el más conocido, es el microprocesador. Puede ser considerado como un componente universal. Junto con otras unidades funcionales como memorias, circuitos de entrada-salida y generador de cadencias (oscilador), da lugar a la microcomputadora.

El funcionamiento del microprocesador está basado en el modelo de arquitectura propuesta por J. Von Neumann en 1949. Por ello algunas veces suele decirse que J. Von Neumann es el verdadero inventor del microprocesador. En realidad, en el microprocesador, mediante órdenes de un programa (software) se establece la forma de operación del objeto físico (hardware), y por tanto las dos cosas son necesarias: no puede establecerse superioridad de una sobre la otra.

Con el fin de poner de manifiesto la rápida evolución de los microprocesadores, voy a señalar algunas características de los modelos más significativos:

- El primer microprocesador fue el Intel 4004, producido en 1971 con tecnología de 10 μm (longitud del canal del transistor), con una transmisión de datos de 4 bits (bus), formado con unos 2300 transistores y un generador de cadencias (reloj) de 108 KHz. Originalmente se desarrolló para una calculadora.

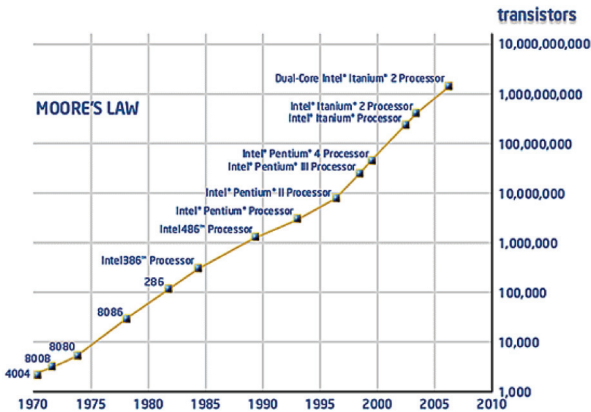
- En 1978 se desarrolló el primer microprocesador de uso general, con tecnología de $3\ \mu\text{m}$, el Intel 8086 de 16 bits, el cual contenía 29000 transistores y una señal de reloj de 5 MHz. Fue la base del primer ordenador personal de IBM.
- En 1989 aparece el microprocesador Intel 486, con tecnología de $1\ \mu\text{m}$, con una transmisión de datos de 32 bits, formado por aproximadamente 1.2 millones de transistores y una señal de reloj de 25 MHz.
- En 1993 se desarrolla el microprocesador Pentium, con tecnología de $0.8\ \mu\text{m}$, con una transmisión de datos de 32 bits, formado con unos 3.1 millones de transistores y una señal de reloj de 66 MHz.
- En 1999 se desarrolla el microprocesador AMD Athlon, con tecnología de $0.25\ \mu\text{m}$, el primero con una transmisión de datos de 64 bits, formado con unos 5 millones de transistores y una señal de reloj de 500 MHz.

- En 2001 se desarrolla el microprocesador Itanium, con tecnología de 0.18 μm , con una transmisión de datos de 64 bits, formado con unos 25 millones de transistores y una señal de reloj de 800 MHz.

En este simplificado planteamiento puede verse la evolución de los microprocesadores y como aumenta la velocidad de procesamiento al elevarse la frecuencia de la señal de reloj con la que operan. En el año 2002 se comienza a fabricar con tecnología de 90 nm y con ello se suele considerar el paso de la microelectrónica a la nanoelectrónica.

Desde el año 2005 se están desarrollando los microprocesadores multinúcleo, que son aquellos que tienen dos o más procesadores independientes en el mismo circuito integrado. En general, permiten que el conjunto exhiba una cierta forma de paralelismo sin tener que recurrir para ello a múltiples procesadores en circuitos integrados separados.

Esta filosofía de diseño permite que el conjunto de microprocesadores trabaje con mayores velocidades de procesamiento (mayor número de operaciones por unidad de tiempo), pero con menor consumo de potencia por cada núcleo. Además, con esta forma de diseño continúa cumpliéndose la ley de G. E. Moore.



Número de transistores en diversos microprocesadores

En 1965, G. E. Moore, trabajando en Fairchild Semiconductor y más tarde, en 1968,

cofundador de Intel junto con R. Noyce, enunció una ley empírica que establecía que aproximadamente cada 18 meses se duplicaría el número de transistores en un circuito integrado. Como puede comprobarse en la Figura adjunta esta ley se va cumpliendo con creces hasta nuestros días cuando se consideran los ordenadores personales. La consecuencia directa de esta ley es que los precios bajan al mismo tiempo que suben las prestaciones.

La tecnología que Intel está preparando para su puesta en producción a finales de este año es de 22 nm por nodo (para el transistor), con una previsión de más de 10000 millones de transistores por microprocesador. Este constante avance en la tecnología de los procesos de fabricación permitirá también la integración de prestaciones y funciones adicionales, proporcionando un mayor rendimiento, unas baterías de alimentación de mayor duración (por menor consumo de los dispositivos) y menor coste para los usuarios.

Si tomamos la eficiencia energética como parámetro para observar la evolución de la Electrónica, podemos señalar que en 1945 (Eniac) para realizar unas 600 operaciones se consumía 1 kWh. En 1976 (supercomputador Cray), con el mismo consumo de energía, se realizaban unos 2000 millones de operaciones, mientras que en el año 2009, con el mismo consumo, se alcanzan los 2000 billones de operaciones. Si la industria automovilística hubiese tenido la misma evolución, ¿Podemos imaginar el consumo de un coche en la actualidad?

Por lo presentado hasta ahora, parece que la evolución rápida de la Electrónica se basa en los productos informáticos y de comunicaciones (en realidad informática – comunicaciones es una, ya que hoy en día no se concibe informática sin comunicaciones ni comunicaciones sin informática), lo que no quiere decir que sea el único campo de aplicación de la Electrónica. El resto de campos de aplicación (medicina,

automóviles, industria, finanzas, energía y medio ambiente, seguridad, ocio y tiempo libre, etc.) se benefician de las necesidades de mejora en informática – comunicaciones, aunque no sean ellos los que provocan directamente la evolución.

Aunque los orígenes de Internet (conjunto descentralizado de redes de comunicación interconectadas) se remonta a 1969, cuando se estableció la primera conexión de computadoras entre tres Universidades de California y una de Utah (Estados Unidos), hasta 1990 no apareció uno de los servicios que más éxito han tenido en Internet: la World Wide Web (la www). Desde esta fecha, la aparición de computadores con velocidades de procesamiento cada vez mayores y redes de comunicación con mejores prestaciones permiten que Internet se vaya desarrollando y se generalice su utilización. En estos momentos Internet tiene impacto tanto en el mundo laboral como en el ocio y el conocimiento a nivel mundial,

ayudando a poner fin al aislamiento de culturas.

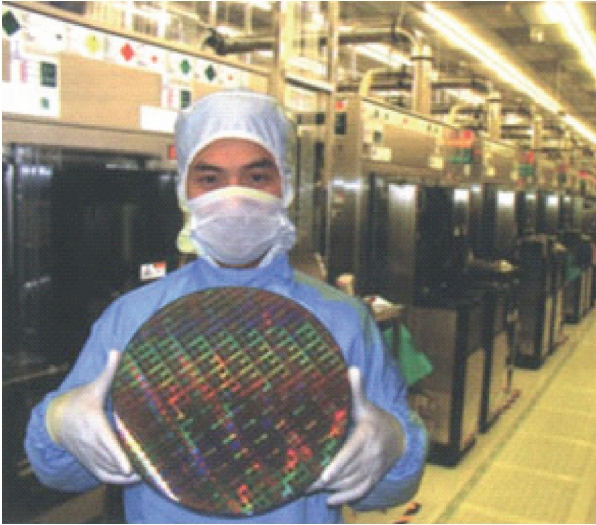
Algunos autores asocian el inicio de la Globalización a la creación de Internet. Desde luego, los extraordinarios avances en la Electrónica son los que han permitido esta generalización de las comunicaciones, provocando un cambio social y cultural. En estos momentos se suele dividir al mundo por tecnología y se suele hablar de tres mundos: un primer mundo, formado por el 15% de la población mundial y que dispone del 100% de la tecnología; un segundo mundo, formado por el 50% de la población, y que son capaces de adoptar la tecnología; y un tercer mundo, con el 35% de la población, tecnológicamente desconectado.

ALREDEDOR DE LA LEY DE MOORE

Para poder pasar del primer microprocesador hasta los fabricados en nuestros días, los cambios en la tecnología, y

en sus resultados, han sido suficientemente profundos como para que merezcan algunos comentarios. Sobre todo, comentarios referentes a posibles limitaciones en una mayor miniaturización de los transistores que forman los circuitos integrados.

◆ En primer lugar, como ya hemos indicado, el circuito integrado (chip) de un computador moderno contiene una cantidad muy grande de transistores. Estos circuitos se obtienen de obleas circulares de Silicio, de unos 30 centímetros de diámetro, que al final de la fabricación se dividen en cientos de chips. El proceso de fabricación consta de una larga serie de etapas tales como ataque con reactivos químicos, oxidaciones, impurificaciones, con ciclos de calentamiento y enfriamiento, etc. Es inevitable entonces que las condiciones de fabricación sufran variaciones de una oblea a otra, así como entre los dispositivos situados en distintos puntos de una misma oblea. Por tanto, los transistores



Oblea de Silicio con chips

que se fabrican dentro de un mismo chip no son iguales y no son perfectamente reproducibles.

Estos transistores así fabricados, aunque no sean iguales y por tanto no tengan las mismas características (ganancia), son capaces de trabajar bien con señales digitales, ya que la ganancia y el carácter

digital de las señales preserva sus valores a medida que pasan por un número elevado de transistores. No ocurriría lo mismo con señales analógicas. La proporción de transistores defectuosos por oblea marca un límite práctico en el tamaño de un circuito integrado. No obstante, en las pruebas finales que se realizan al chip, se desechan los que no funcionan adecuadamente por defectos en la fabricación.

El factor predominante, hoy día, en el coste de fabricación de estos circuitos es el número de obleas procesadas; influye muy poco el contenido de cada oblea y no debemos preocuparnos porque los dispositivos no sean del todo iguales. Por tanto, el aumento del número de transistores por unidad de superficie de Silicio se traduce en una rápida disminución del coste por dispositivo. El precio actual de un transistor no llega a la décima parte de lo que cuesta una grapa. Para aumentar el número de transistores por chip se aumenta, dentro de lo posible, el tamaño del chip, se

disminuye el tamaño de los dispositivos y se piensa en apilar los dispositivos además de yuxtaponerlos.

◆ Un problema ajeno a la fabricación de los circuitos, pero muy importante a la hora de su utilización, es la disipación de potencia. La miniaturización de los dispositivos aumenta el calor desprendido por centímetro cuadrado de Silicio para la misma frecuencia de funcionamiento, ya que aunque cada dispositivo emite menos calor por sus menores dimensiones, el aumento del número de dispositivos en cada chip en proporción es mayor y por tanto mayor el calentamiento por unidad de superficie del chip. Este no es un problema menor, y para ponerlo de manifiesto, vamos a dar unos datos.

La potencia disipada por los chips de última generación puede ser de unos 100 W en algunos centímetros cuadrados, mayor que la que por ejemplo disipa una placa vitrocerámica en la misma superficie. El enfriamiento de los chips está obligando a

utilizar nuevas técnicas de disipación de calor, ya que la temperatura máxima de los circuitos integrados no puede superar ciertos valores sin que se quemem.

◆ La fotolitografía es uno de los procesos fundamentales en la fabricación de los dispositivos electrónicos y circuitos integrados. Es una operación mediante la cual se transfiere un patrón (denominado máscara, con áreas opacas y transparentes) a la superficie de la oblea semiconductor. Este patrón contiene la geometría de los dispositivos electrónicos que se requieren en el circuito integrado. La luz que se utiliza para transferir esta imagen al semiconductor se difracta al pasar por las zonas transparentes de la máscara. Cuanto menor sea la longitud de onda de la luz que se emplee, menor será este efecto y más nítida será la imagen que se transfiere. En los años setenta, con dispositivos electrónicos con dimensiones de micras, se utilizaba luz blanca. Se recurrió luego a luz monocromática, con frecuencias cada

vez mayores, llegando a tener que utilizar láser en el rango del ultravioleta profundo, de 193 nm de longitud de onda. Para forzar los límites actuales de las dimensiones de dispositivos se están empleando rayos X y se piensa en utilizar haces de electrones en vez de haces luminosos. Vemos entonces que el equipamiento empleado para fabricar circuitos integrados es cada vez más costoso y necesita de más investigación.

◆ Si tenemos en cuenta las dimensiones con las que, por ejemplo, Intel piensa fabricar los transistores en los circuitos integrados de los próximos microprocesadores, 22 nm, y consideramos que la separación entre átomos del Silicio son 5.43 Å, nos encontramos con que para formar un transistor solamente se necesitan 40 átomos. El diseño de estos dispositivos con un número de átomos de Silicio tan pequeño no puede llevarse a cabo con las teorías utilizadas para material macroscópico. El transporte de los electrones en estos

transistores tiene lugar sin que apenas sufran colisiones y el transporte de carga asociado al movimiento de los electrones ya no estará regido por la ley de Ohm. Este transporte es llamado balístico y, por dispositivos balísticos denominamos a aquellos dispositivos en los que el comportamiento de sus regiones activas es consecuencia del transporte balístico de los electrones.

◆ La obtención teórica de las características de estos transistores con dimensiones tan reducidas necesita de unos planteamientos totalmente diferentes a los puramente analíticos, recurriéndose a modelos de simulación por ordenador que reproduzcan el movimiento de los electrones en el interior del transistor. Para simular adecuadamente este movimiento se necesita establecer modelos físicos muy precisos del material y de los procesos que puedan influir en la dinámica de los electrones. Y en particular debe

tenerse en cuenta la posibilidad de que existan corrientes por efecto túnel y debe reconsiderarse la suposición de distribución homogénea de impurezas que puede realizarse en dispositivos de dimensiones grandes. Téngase en cuenta que con una impurificación de 10^{15} átomos de impurezas por cm^3 , solamente se tiene, en promedio, 1 átomo de impureza cada 100 nm. Luego puede ocurrir que en la región activa de un transistor solo se tenga 1 átomo de impureza, y su posición en el canal influirá en la corriente.

Estos modelos de simulación de las características de los dispositivos suelen ser aleatorios y basados en el método de Monte Carlo, necesitando estaciones de trabajo de última generación y largos tiempos de cálculo. Asimismo, la concepción, diseño y simulación de los circuitos integrados, formados por miles de millones de transistores, necesitan de la ayuda de software complejo y altamente especializado (diseño asistido por ordenador, CAD)

y gran cantidad de potencia de cálculo. Otra vez nos encontramos ante la necesidad de más investigación teórica para poder predecir, antes de fabricar, el comportamiento de los circuitos integrados.

INTENTOS DE SUSTITUCIÓN DEL TRANSISTOR

Pese al aumento de las dificultades por conseguir que los circuitos integrados con transistores continúen evolucionando hacia un incremento de la velocidad de computación y a una disminución del coste, el transistor sigue siendo el componente casi único de los circuitos integrados. Sin embargo, a lo largo de los años transcurridos desde 1960, en que se desarrolla el transistor de efecto de campo, han sido varios los intentos de su sustitución por otros dispositivos.

◆ Así, en los años 70 se pensó que el diodo túnel, con una zona de resistencia incremental negativa en sus características

y unos tiempos de conmutación entre estados muy pequeños, podía sustituir a los transistores para formar los circuitos bistables que constituirían los sistemas de computación. A pesar del gran apoyo económico que recibieron estos proyectos de gobiernos y empresas, no se consiguió la precisión exigida en los circuitos para no tener errores en la computación y los proyectos fueron abandonados.

◆ La misma suerte corrieron, en los años 80, los intentos de sustituir los transistores por circuitos bistables construidos con uniones Josephson (superconductores); no se podía lograr un control suficientemente preciso sobre las características del dispositivo que eran necesarias para producir una señal normalizada.

◆ Desde el comienzo de los años 80 se está pensando en la posible aplicación de las leyes cuánticas al tratamiento de la información. Si el progreso técnico de los dispositivos de transmisión y procesamiento de la información prosigue en su

tendencia actual, marcada por la ley de G. Moore, la información se codificará en átomos hacia el año 2030. Por ello los investigadores en sistemas cuánticos intentan explotar las posibilidades del entorno cuántico para diseñar nuevas aplicaciones en el procesamiento de la información. Uno de los ejemplos mejor estudiados de un sistema cuántico de dos niveles lo proporciona algo tan común como un electrón y su espín, propiedad intrínseca de los electrones que puede tener dos «sentidos», asociándose cada uno de ellos a un estado de los sistemas biestables. El problema reside en cómo manipular estos «sentidos» del espín con facilidad, tema tratado por la llamada espintrónica. Pero todavía se necesita mucha investigación y tiempo para que los ordenadores cuánticos sean realidad.

◆ Otra técnica bien fundamentada para conseguir una mayor velocidad de computación que la que tienen los circuitos con transistores se basa en la utiliza-

ción de señales ópticas en lugar de señales eléctricas. Diversos laboratorios lo han abordado con distintos enfoques. Unos se inspiraron en el descubrimiento de la biestabilidad óptica, la cual permite construir dispositivos con materiales susceptibles de adquirir uno de dos estados, diferenciados por un grado de transparencia distinto. Pero debido a que las propiedades ópticas de estos materiales dependen fuertemente de la temperatura y a que debe exigirse muy alta precisión a las dimensiones físicas de dichos dispositivos, su explotación competitiva frente a los circuitos integrados de transistores no es posible. Otros laboratorios intentaron utilizar la interacción entre la luz y un semiconductor para realizar operaciones lógicas, pero la luz solo era el vehículo que transportaba las señales de un lugar a otro. La demostración de ATT en 1990 dependía de un dispositivo electroóptico difícil de realizar e incapaz de competir con los circuitos integrados transistorizados.

NUEVOS MATERIALES Y NUEVOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

Ante la importancia de la industria electrónica para las economías nacionales, los gobiernos e industrias del mundo han establecido el Plan Tecnológico Internacional para Semiconductores (Roadmap), con informe bianual emitido por algunos expertos, en el que se intenta anticipar futuros avances en este tipo de materiales y sus aplicaciones. Estos informes describen las mejoras en materiales y métodos de fabricación que se necesitan para que lo previsto llegue a ser real. Orienta sobre las actividades de investigación y desarrollo y ayuda a los suministradores del equipamiento a que se anticipen a las necesidades del sector de los semiconductores. Para alcanzar tales objetivos, señalan como importante desarrollar nuevos materiales que puedan sustituir al Silicio y diversificar más las tareas que puedan desempeñar los circuitos integrados.

Ante estas sugerencias, en los últimos años las investigaciones en nuevos materiales semiconductores con electrones de alta movilidad y la reducción de dimensiones no cesan. Téngase en cuenta que para aumentar la frecuencia de funcionamiento de los dispositivos electrónicos es fundamental optimizar esos dos parámetros. Y como meta actual en frecuencia se intenta llegar a obtener dispositivos electrónicos con respuesta hasta los Teraherzios, justo para llegar al límite inferior de frecuencia de las señales ópticas, con aplicaciones muy interesantes.

Los semiconductores con electrones de alta movilidad son sobre todo materiales compuestos en los que la masa efectiva del electrón es muy pequeña y el número de colisiones en su desplazamiento por el canal es reducido. Y la reducción de dimensiones afecta no ya solo a la longitud del canal sino también a las dimensiones de los contactos de los terminales del dispositivo.

Siguiendo estas indicaciones, diversos laboratorios están trabajando en investigación sobre: MOSFET de semiconductores compuestos con base en los grupos III-V del sistema periódico (por ejemplo In-GaAs), en transistores de efecto de campo con nanotubos de carbono, en transistores de efecto de campo con nanohilos de Silicio y en otros nanodispositivos con geometrías novedosas.

En el campo de la Electrónica de Potencia algunos semiconductores compuestos tienen ya una gran potencialidad. Por ejemplo, el Carburo de Silicio es un semiconductor que puede trabajar a altas temperaturas y alto campo eléctrico, siendo sus electrones de más velocidad que los del Silicio. En esta dirección está también la obtención del primer circuito integrado operativo, en 2008, que ha sustituido el Silicio por Nitruro de Galio. El Nitruro de Galio soporta condiciones extremas para trabajar a temperaturas más elevadas y además es poco sensible a las radiaciones.

El Nitruro de Galio es también el semiconductor con el que se fabrican los LED de luz azul y blanca.

No me gustaría olvidarme de que el Grafeno promete ser una gran revolución con aplicaciones en nuevas tecnologías, estando caracterizado por ser un material del que pueden obtenerse capas muy delgadas (de un solo átomo de espesor), siendo muy buen conductor eléctrico y térmico. En 2004 se fabricó por primera vez Grafeno (K. Novoselov) y en 2007 se presentó el primer transistor fabricado con Grafeno (A. Geim). Precisamente a estos dos investigadores se les concedió en 2010 el Premio Nobel de Física «por sus novedosos experimentos con el Grafeno en dos dimensiones».

Científicos de IBM han fabricado en 2010 un transistor de Grafeno con respuesta en frecuencia hasta 100 GHz y muy recientemente han construido el primer circuito integrado con este material, un mezclador de radiofrecuencia de banda ancha.

Electrónica: del pasado al presente. Del futuro concreto que vaya a triunfar no tengo nada que decir, pero seguro que se está generando en unos pocos laboratorios.

Gracias por su atención.

REFERENCIAS

- A. SONG; Room-Temperature Ballistic Nanodevices, Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, Edited by H. S. Nalwa, Volume X, pages 1-19, American Scientific Publishers (2004).
- R. CHAU et al; Benchmarking Nanotechnology for high-performance and low-power logic transistor applications, IEEE Trans. on Nanotechnology, **4**, 153, (2005).
- F. SCHWIERZ AND J. LIU; RF transistors: Recent developments and roadmap toward terahertz applications (review), Solid-State Electronics, **51**, 1079, (2007).
- R. W. KEYES; Longevidad del transistor, Investigación y Ciencia, 41-49, Mayo (2009).
- I. THAYNE et al; III-V nMOSFETs: Some issues associated with roadmap worthiness (invited), Microelectronic Engineering, **88**, 1070, (2011).

INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMI-
CONDUCTORS: www.itrs.net

J. M. SÁNCHEZ RON; El poder de la Ciencia, Edt.
Crítica, (2011).

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a los Profesores
LUIS A. BAILÓN, TOMÁS GONZÁLEZ y JAVIER MATEOS
la lectura crítica de esta lección.

Y mi reconocimiento a todos los compañeros
del Área de Electrónica, con los que siempre
he aprendido.



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**
Secretaría General