

Índice

11-13	AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS
15-23	INTRODUCCIÓN: LA VIDA COTIDIANA EN LA ERA DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES
25-48	1. LOS ACTORES PRINCIPALES: LOS SEMICONDUCTORES
26-43	1.1. ¿Qué es un semiconductor?
28-29	1.1.1. Átomos
29-31	1.1.2. Sólidos
31-32	1.1.3. Metales, Aislantes y Semiconductores
32-33	1.1.4. Enlace químico en los semiconductores: enlace covalente
34-36	1.1.5. Conducción de la corriente eléctrica en los semiconductores
37-41	1.1.6. Dopado de semiconductores: semiconduc- tores extrínsecos
41-42	1.1.7. ¿Cuántos semiconductores hay?
42-43	1.1.8. Resumiendo las características esenciales de los semiconductores
43-46	1.2*. Purificación del silicio
44-45	1.2.1. Primer paso: obtención de silicio de pureza metalúrgica
45-46	1.2.2. Segundo paso: obtención de silicio de pureza electrónica
46-48	1.3. Fabricación de cristales semiconductores: método Czochalski

- 49-70 2. LA ELECTRÓNICA ANTES DEL TRANSISTOR:
EL VACÍO SE VUELVE ÚTIL
- 50-56 2.1. La era pre-electrónica
- 50-53 2.1.1. Los primeros trabajos sobre materiales
semiconductores
- 54-56 2.1.2. La invención del teléfono
- 57-65 2.2. Los primeros dispositivos electrónicos: las
válvulas de vacío y los comienzos incipientes de
la tecnología de los semiconductores
- 57-60 2.2.1. Desde comienzos del siglo XX hasta la
Segunda Guerra Mundial
- 60-65 2.2.2. La Segunda Guerra Mundial
- 65-67 2.3. Los inicios de la computación: las monstruosas
calculadoras de válvulas
- 67-70 2.4*. ¿Cómo funcionan una válvula de vacío y un
triodo?
- 67-68 2.4.1. Explicando la válvula de vacío
- 68-70 2.4.2. Explicando el triodo
- 71-100 3. EL TRANSISTOR BIPOLAR: COMIENZA
LA REVOLUCIÓN
- 72-89 3.1. Los orígenes del transistor bipolar
- 72-75 3.1.1. La actividad de los Bell Labs desde los
años 1930 hasta el final de la II GM
- 75-85 3.1.2. La invención del transistor en los Bell
Labs en las Navidades de 1947
- 85-89 3.1.3. El Premio Nobel de Física de 1956 y los
años posteriores
- 89-97 3.2. Los primeros éxitos comerciales y la evolución
posterior de la tecnología del transistor
- 92-97 3.2.1. Del transistor de puntas de contacto al
transistor planar
- 97-100 3.3*. ¿Cómo funciona un transistor bipolar?
- 101-130 4. LA CIENCIA FICCIÓN SE VUELVE REAL: EL
CIRCUITO INTEGRADO
- 102-106 4.1. Los años finales de la década de 1950
- 103-106 4.1.1. El cuello de botella del transistor

106-111	4.2.	El año en que nació el Circuito Integrado: 1958
111-114	4.3.	Desarrollo del CI: la ley de Moore
114-119	4.4.	Los CI en la actualidad
117-119	4.4.1.	Los límites de la tecnología electrónica: ¿el final de la Ley de Moore?
119-130	4.5*.	Proceso de fabricación de un CI
120-122	4.5.1.	El entorno: la <i>sala limpia</i>
122-130	4.5.2.	Dentro de la sala limpia: los procesos
131-154	5.	UN NUEVO INVITADO ENTRA EN ESCENA: EL TRANSISTOR DE EFECTO CAMPO (MOSFET)
132-134	5.1.	¿Cómo funciona un transistor MOSFET?
135-139	5.2.	Un nacimiento prematuro y frustrado
139-141	5.3.	El MOSFET en la actualidad
142-143	5.4.	El futuro inmediato de la tecnología MOSFET
144-153	5.5.	Memorias basadas en MOSFET: RAM, Flash
146-147	5.5.1.	Clasificación de las memorias
147-151	5.5.2.	Memoria volátil RAM
151-153	5.5.3.	Memoria permanente <i>Flash</i>
153-154	5.6.	Evolución y futuro de las memorias
155-163	6.	LA INDUSTRIA MICROELECTRÓNICA EN LA ACTUALIDAD
155-160	6.1.	Las cifras de la industria de los semiconductores
160-161	6.2.	¿Tiene sustituto(s) el silicio?
161-163	6.3.	Conclusión
165-171		GLOSARIO
173-174		BIBLIOGRAFÍA

Introducción: la vida cotidiana en la era de la información y las comunicaciones

Si a alguien le preguntan ¿qué necesita para vivir?, seguramente responderá que necesita comer; aunque al darle una vuelta a la pregunta, es posible que se le ocurra que también necesita trabajo, dinero, afecto, cariño, etc. Pero, salvo alguna que otra excepción, es raro que repare en otra necesidad que impone nuestro actual modo de vida: comunicación. El mundo en el que vivimos sería inconcebible sin las potentísimas herramientas de las que disponemos para mantenernos conectados y en comunicación casi instantánea. Hoy en día, casi todos los habitantes del planeta disponen de teléfono móvil y una buen número de ellos tienen acceso a un ordenador, manejan con soltura razonable herramientas tales como el correo electrónico o el omnipresente *WhatsApp*, etc.

Para satisfacer en la práctica totalidad esa necesidad de comunicación, necesitamos de una ciencia: la electrónica. Entonces, ¿cuál es el papel de la electrónica en la vida cotidiana? Para responder a esa nueva pregunta, lo mejor es hacer un ejercicio de imaginación, que la figura 1 ilustra, suponiendo un día cualquiera en la vida cotidiana de un ciudadano:

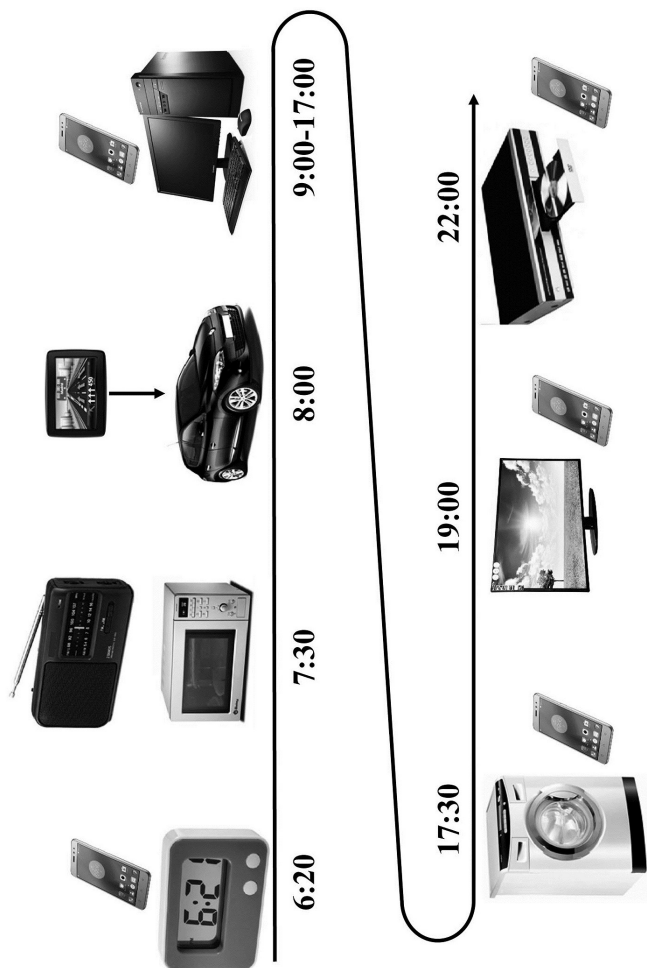


Figura 1. Una jornada laboral de un día cualquiera: despertador, teléfono móvil, receptor de radio, automóvil con GPS, ordenador de torre, electrodomésticos, televisor, reproductor de DVD. Y más teléfono móvil

Imaginemos por un instante cómo sería un mundo sin los instrumentos y aparatos de la figura anterior, sobre todo, sin teléfonos móviles, sin ordenadores y sin internet...imposible de imaginar ¿verdad?

Es más, si hacemos un recorrido un poco más detallado por los diferentes equipos de uso personal o colectivo, que la electrónica ha situado al alcance de la gran mayoría de los ciudadanos, en especial de los países desarrollados, nos encontramos con muchos más de los reflejados en la figura anterior. Seguro que me dejo unos cuantos en el tintero:

Ocio: Televisión (en sus variantes modernas de pantalla plana de tamaño gigante), reproductores de audio y vídeo, como los CD, DVD, BD, los cada vez menos utilizados MP3 y MP4, receptores de emisoras de radio, cámaras digitales de fotografía....

Medicina: equipos de diagnóstico por imagen como RMN, TAC, monitores de control de constantes vitales...

Tráfico aéreo y marítimo: Radar, Sonar, electrónica de los aviones de pasajeros....

Tráfico terrestre: mandos de apertura/cierre de puertas, ayudas a la conducción, trenes de tracción eléctrica (AVE) y sus sistemas de control...

Satélites artificiales: satélites de posicionamiento (GPS), meteorológicos, de comunicaciones...

Energía: bombillas LED –de uso doméstico, en semáforos de control del tráfico en ciudades, en las pantallas de presentación de datos de infinidad de equipos de señalización o medida–; células solares, protagonistas de una nueva revolución, la de las energías renovables...

Aplicaciones militares: no es preciso recordarlo, pues fueron algunos de los primeros dispositivos fabricados por la incipiente industria de la electrónica de estado sólido de finales de los años 50 del siglo XX: armas guiadas, sistemas de visión nocturna, satélites espía, Radar, sistemas de puntería, etc. En la actualidad, la importancia relativa de la inversión

en gastos militares puede ser significativamente menor de lo que fue durante la segunda mitad del siglo XX, pero hay pocas dudas de que todavía representa un factor importante para estimular nuevos desarrollos.

La importancia de la industria electrónica en la actualidad se puede medir de muchas formas, pero basta un dato para darse cuenta de su relevancia: de acuerdo con la lista que cada año publica la revista *Forbes*¹, en 2017, entre las diez empresas más valiosas del mundo por capitalización bursátil, hay cinco que pertenecen al sector de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, y las cuatro primeras son Apple, Google, Microsoft y Facebook. La quinta es Samsung, que es la décima de la lista.

Todo eso se lo debemos, en buena medida, al transistor bipolar, el dispositivo que, como veremos en este libro, fue concebido y llevado a la práctica por Wiliam Shockley, John Bardeen y Walter Brattain a finales de 1947 en los Bell Labs, los laboratorios de investigación de una empresa privada, AT&T. La invención del transistor debe clasificarse como una de las innovaciones tecnológicas más determinantes en la historia de la humanidad, sin duda equiparable al descubrimiento de la rueda por su efecto a largo plazo en nuestra forma de vida y comparable, en un período histórico más reciente, al descubrimiento de la máquina de vapor en el siglo XIX, que fue el artífice de la Primera Revolución Industrial.

El transistor y su descendiente directo, el circuito integrado, son responsables del primer microprocesador, aparecido en 1971 y del primer ordenador de uso personal en 1975. No parece necesario destacar la relevancia de los ordenadores personales en el mundo actual; de hecho, fue el pistoletazo de salida de lo que hoy denominamos la “Era de la Información” y desde entonces, ha habido cambios sin precedentes en campos tales como las telecomunicaciones, el almacenamiento de datos, la

1 “The World’s Most Valuable Brands”. Información obtenida de: <https://www.forbes.com/powerful-brands/list/>

capacidad de realizar cálculos aritméticos, la reproducción de sonido e imagen, las nuevas fuentes de energía renovable y, por supuesto, una gran cantidad de aplicaciones militares como las que he detallado anteriormente.

Esta verdadera revolución, que la electrónica ha propiciado en nuestra vida cotidiana, también la he experimentado en primera persona: en la primavera de 1982 comencé la ardua tarea de escribir mi Tesis Doctoral, un poco más de 200 páginas escritas a mano en mi indescifrable letra –en ocasiones incluso para mí–, posteriormente entregadas a la abnegada secretaria de mi Departamento, que realizó la casi imposible tarea de mecanografiarlas. ¡Cómo han cambiado las cosas! Hoy escribo en mi propio ordenador, realizo todos mis textos y documentos en formato electrónico, archivo y recopilo grandes cantidades de información de forma más o menos automática, ya que no necesito hacer nada más que tener la precaución de guardar una copia de seguridad en el disco duro de mi ordenador. Para escribir este libro, he podido recabar una cantidad ingente de información con solo hacer click con el ratón del teclado; el texto y las imágenes que lo componen están guardados en un *pen drive* que no ocupa más espacio que una goma de borrar. Entre la escritura de mi Tesis y la de este libro han transcurrido 36 años, sin duda unos cuantos desde mi perspectiva personal, pero prácticamente un instante desde el punto de vista de la historia común de nuestra civilización y sin embargo, el mundo en 1982 y en 2018 es radicalmente diferente y yo, como todos, he notado esos enormes cambios.

Una prueba de la importancia de la electrónica en nuestro mundo, es que ha recibido nueve Premios Nobel de Física desde la invención del transistor bipolar, en diversas categorías (*Electronics Technology, Instrumentation, Semiconductor Technology Semiconductors*), habiendo recibido el galardón 19 científicos. La lista de los descubrimientos y de los premiados, en orden cronológico, es la siguiente: **1956**: Transistor bipolar (W. Shockley, J. Bardeen, W. Brattain); **1973**: Efecto túnel en semiconductores (L. Esaki); **1977**: Semiconductores amorfos (Sir N. F.

Mott, P. W. Anderson, J. H. van Vleck); **1986**: Efecto Hall cuántico (K. Von Klitzing), **1998**: Efecto Hall cuántico fraccionario (R. Laughlin, H. Stormer, D. Tsui); **2000**: Heteroestructuras de semiconductores (Z. I. Alferov, H. Kramer); **2000**: Circuito Integrado (J.S. Kilby); **2009**: Dispositivos acoplados por carga, CCD (W.S. Boyle, G. E. Smith); **2014**: Diodos emisores de luz azul (I. Akasaki, H. Amano, S. Nakamura)²

En este libro describiré la historia de ese desarrollo sin precedentes. El título incluye el sustantivo *revolución* y el adjetivo *silenciosa* lo que puede sonar a reclamo publicitario, pero no lo es en absoluto; ambas hacen honor a lo que ha sido y es la electrónica en la actualidad: de manera imperceptible, nuestro quehacer diario se ha modificado sustancialmente gracias a la omnipresencia de la electrónica en ella. Trataré de contagiar al lector la fascinación que yo siento al repasar la historia de esa revolución científica y tecnológica que voy a relatar en estas páginas. Para ello, describiré qué son los semiconductores, qué propiedades tienen y cómo se fabrican, cuáles son los dispositivos que han permitido la revolución —el transistor bipolar y el de efecto campo, conocido por sus siglas en inglés MOSFET— y su integración en miles de millones de unidades en un circuito integrado, verdadera maravilla de la tecnología.

El libro está escrito en un estilo didáctico para que, sin perder el rigor imprescindible, pueda ser leído sin dificultad por un número amplio de personas interesadas, aunque no tengan formación específica en electrónica. A lo largo de los diversos capítulos que lo integran, hay apartados que están señalados con un asterisco; esos apartados pueden omitirse sin que se pierda la esencia del hilo conductor del relato, aunque si se leen se obtendrá una información más completa y detallada.

Es un argumento clásico de algunos divulgadores presumir de que sus textos los puede leer cualquiera porque no incluyen fórmulas. Creo que para que un libro de divulgación científica

2 Información obtenida de: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/fields.html

lo pueda leer un amplio abanico de personas, el texto no se debe limitar a excluir las fórmulas, que en ocasiones pueden aclarar ideas más de lo que se pueda imaginar; sino que hay que ir más allá y ese viaje tiene que ver con el estilo, con la forma de traducir determinados conceptos a un lenguaje más universal. Eso es lo que pretendo con este libro, en el que efectivamente el lector no solo no encontrará fórmulas, sino que sobre todo, sí encontrará un lenguaje que he intentado que sea todo lo asequible que soy capaz de escribir. Además, para facilitar en la medida de lo posible la comprensión de las numerosas ideas que se describen, el texto está ilustrado con 38 figuras y 4 tablas.

Para que la lectura resulte fluida y proporcione satisfacción, en vez de dolores de cabeza, el lector debería estar algo familiarizado con las siguientes cuestiones:

- i) Lo único que se debe entender de Matemáticas (que tanto asustan siempre en este país, desgraciadamente) es la notación científica, es decir, se debe tener claro que 10^n es un 1 seguido de n ceros y que 10^{-n} representa un cero, seguido de una coma, $n-1$ ceros detrás y un 1.
- i) Por lo que respecta a la Física, es recomendable recordar cuáles son algunas de las unidades usuales con las que se miden ciertas magnitudes eléctricas: voltios (tensión), vatios (potencia), ohmios (resistencia) y hercios (frecuencia) y sus múltiplos: kilo (10^3), mega (10^6) y giga (10^9) y submúltiplos: mili (10^{-3}), micro (10^{-6}) y nano (10^{-9}).
- ii) Finalmente, en relación con la Química, alguna leve idea también sería útil, principalmente entender que si escribo SiO_2 , me estoy refiriendo a un compuesto químico formado por un átomo de silicio y dos de oxígeno.

Entrando en detalles específicos, la estructura del libro es la siguiente:

El capítulo 1 está dedicado a los semiconductores, que son los grandes desconocidos de esta historia y sin embargo, sus protagonistas esenciales. Considero imprescindible que el lec-

tor conozca algunos detalles de sus propiedades principales. Tal vez sea el capítulo más científico del libro, pero está absolutamente descargado de tecnicismos innecesarios.

El capítulo 2 relata la historia de la electrónica anterior a la invención del transistor. Realizaremos un viaje al pasado, desde las primeras experiencias de Faraday en el primer tercio del siglo XIX sobre materiales semiconductores, pasando por la invención del triodo de Lee de Forest a comienzos del siglo XX, para llegar a los desarrollos que la Segunda Guerra Mundial impulsó en el campo de la electrónica. Hay un apartado final en el que se hace una breve descripción del funcionamiento de las válvulas de vacío, en concreto del diodo y el triodo; este apartado puede saltarse sin que se pierda continuidad en la lectura del resto.

El capítulo central del libro es el tercero, dedicado a la historia del transistor bipolar. Alrededor de este capítulo orbitan los dos anteriores y, en menor medida, los tres posteriores. Veremos la apasionante historia de su invención en los Bell Labs y las complicadas relaciones personales que hubo entre sus inventores. También analizaremos los primeros éxitos comerciales del dispositivo, auspiciados por las aplicaciones militares que el transistor ayudó a desarrollar. El punto final del capítulo es una breve descripción del principio de funcionamiento del dispositivo. Como en el caso del capítulo anterior relativo al funcionamiento de las válvulas, este apartado puede omitirse sin comprometer la comprensión de los capítulos siguientes.

El siguiente capítulo, el cuarto, se centra en describir la historia y posterior evolución del Circuito Integrado, el heredero directo de transistor bipolar y consecuencia lógica del desarrollo del primero. Veremos cómo fue la historia de su invención en dos empresas rivales (Fairchild y Texas Instrument) y cómo ha evolucionado hasta el día de hoy, siguiendo lo que se conoce como *Ley de Moore*, para la que se quedan cortos todos los calificativos que se utilicen para describirla. Finalmente, haremos un recorrido detallado por su tecnología de fabricación, verdadera ciencia ficción hecha realidad. También puede evitarse la

lectura de este último apartado, pero no será difícil de entender para cualquier lector interesado en este asunto.

El capítulo 5 está dedicado al transistor de efecto campo, conocido como MOSFET por sus siglas en inglés (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*). Este dispositivo es, sin ningún género de dudas, el dominador absoluto de la tecnología microelectrónica en la actualidad. Como en los capítulos precedentes, veremos la historia de su invención. También analizaremos su principio de funcionamiento, así como el de las memorias semiconductoras basadas en él: las memorias volátiles RAM (*Random Access Memory*) y las no volátiles *Flash* (las que incorporan los *pen drive*); ambas son la punta de lanza de la tecnología microelectrónica en la actualidad.

En el último capítulo, haremos un pequeño repaso de algunos aspectos económicos (facturación de la industria, principales fabricantes de circuitos integrados, etc.), para darnos cuenta de lo que representa la industria microelectrónica en la actualidad.

Finalmente, el lector encontrará un glosario de los términos más importantes empleados en el texto y una breve bibliografía que le permitirá profundizar en los conceptos analizados en este libro, si así lo desea.

A lo largo del texto hay notas a pie de página. No forman parte del núcleo del relato, pero están incluidas para aclarar ciertos conceptos esenciales o citar algunas referencias importantes, por lo que recomiendo vivamente que se lean según vayan apareciendo.