

Enrique J. Dede García-Santamaría

Pasado, presente y futuro de la electrónica

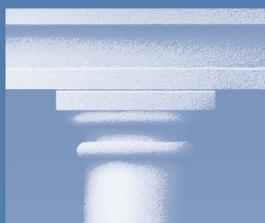
**La influencia de la Universitat
de València en su desarrollo
en la Comunitat Valenciana**

Lección magistral

leída en el solemne acto

de apertura del curso

2022-2023





Pasado, presente y futuro de la electrónica

*La influencia de la Universitat de València
en su desarrollo en la Comunitat Valenciana*

Pasado, presente y futuro de la electrónica

La influencia de la Universitat de València en su desarrollo en la Comunitat Valenciana

Lección magistral leída en la solemne acto
de apertura del curso 2022-2023

Enrique J. Dede García-Santamaría

VNIVERSITAT
E VALÈNCIA



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Reconocimiento-
NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional.

© *Del texto*: J. Dede García-Santamaría, 2023
© *De esta edición*: Universitat de València, 2023
Maquetación: Publicacions de la Universitat de València

ISBN: 978-84-1118-116-7 (papel)
ISBN: 978-84-1118-117-4 (PDF)

DOI: <http://dx.doi.org/10.7203/PUV-OA-117-4>

Edición digital



Índice

- 9 INTRODUCCIÓN
- 10 PASADO Y PRESENTE DE LA ELECTRÓNICA
- 38 LA EVOLUCIÓN DE LA ELECTRÓNICA
EN LA COMUNITAT VALENCIANA
Y LA INFLUENCIA DE LA UNIVERSITAT
DE VALÈNCIA EN SU DESARROLLO
- 42 EL FUTURO DE LA INGENIERÍA ELECTRÓNICA
- 53 BIBLIOGRAFÍA
- 53 RECURSOS ELECTRÓNICOS

Excelentísima y Magnífica Sra. Rectora de la Universitat de València,
Honorable Sra. Consellera d'Innovació, Universitats, Ciència i Societat
Digital de la Generalitat Valenciana,
Excelentísimas e Ilustrísimas autoridades,
Compañeras y compañeros, amigas y amigos, señoras y señores

INTRODUCCIÓN

Esta lección magistral versa sobre la electrónica, su pasado, su presente y su futuro, así como sobre la influencia que ha tenido la Universitat de València en su desarrollo en la Comunitat Valenciana.

La electrónica es una rama del conocimiento que comprende la física, la ingeniería, la tecnología y las aplicaciones que estudian la emisión, el flujo y el control de los electrones u otras partículas cargadas eléctricamente en el vacío y en la materia.

Más concretamente, la electrónica es aquella rama de la ciencia que se ocupa del estudio de los materiales, dispositivos, circuitos, sistemas y conceptos asociados empleados para el procesamiento, control y generación de señales eléctricas, es decir, para el tratamiento de la información, así como los empleados para el procesamiento y para el control de la potencia eléctrica.

El avance de la electrónica ha sido sorprendente en los últimos ochenta años. Baste considerar que la primera calculadora electrónica, denominada ENIAC-1 y construida a base de válvulas electrónicas, fue presentada en junio de 1945 en la Universidad de Pensilvania por los profesores Eckert y Mauchly. Ocupaba una superficie de 140 m², consumía 150 kW y su peso era de 30 toneladas. Hoy en día tenemos ordenadores portátiles con una potencia de cálculo muy superior a la de ENIAC-1 que prácticamente caben en el bolsillo.

PASADO Y PRESENTE DE LA ELECTRÓNICA

Los orígenes de la electrónica

Cabe cifrar los orígenes de la electrónica a principios del siglo XVII. Las experiencias que se desarrollaron a partir de esa fecha y en los siguientes siglos sentaron las bases, tanto teóricas como experimentales, de esa disciplina.

A principios del año 1600 apareció en Londres un libro titulado *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure* (Sobre los imanes, los cuerpos magnéticos y el gran imán terrestre), más conocido como *De magnete*. Tras un gran número de experimentos, su autor, William Gilbert, dedujo que todo el globo terráqueo debía ser un gran imán.

Hubo que esperar más de un siglo para que se produjeran resultados importantes en los experimentos desarrollados durante ese periodo. En Inglaterra, sobre 1840, Desaguliers experimentaba con la electricidad. Realizando experimentos eléctricos en el vacío y en el aire, demostró que la humedad influía notablemente en estos. A este científico le debemos la introducción del concepto *conductor* en la electrotecnia.

Sin embargo, tal vez las experiencias sobre la electricidad más renombradas de esa época provengan de América, concretamente de Franklin. El 28 de julio de 1747 enviaba a la Real Sociedad de las Ciencias de Londres un comunicado sobre la conducción eléctrica en el aire. Franklin no había sido el primero en pensar que un rayo no era sino una gran descarga eléctrica, pero sí fue el primero que lo demostró experimentalmente.

Durante esos años, el único descubrimiento notable no fue la demostración de que en la electricidad había escondida una gran energía, sino que, además, se halló cómo podía almacenarse la energía eléctrica, ya que se descubrió la botella de Leyden como elemento almacenador de esta. Fue Volta quien, en la segunda mitad del siglo XVIII, introdujo el concepto de condensador, que es, en consecuencia, el primer elemento pasivo de los circuitos electrónicos. De esta manera, dos siglos más tarde de la difusión de las experiencias de Gilbert sobre magnetismo, se publicaba en la revista *Philosophical Transactions* de Londres un

texto trascendente en la historia de la electricidad, en el que Volta describía un invento que «generaba» energía eléctrica: la pila eléctrica, que fue denominada en su tiempo un *perpetuum mobile*.

En relación con el magnetismo, durante los dos siglos siguientes a que viera la luz el mencionado trabajo de Gilbert *De magnete* no se había producido ningún resultado notable. El texto *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*, publicado el 21 de julio de 1820 por J. C. Oersted, describe un experimento que liga electricidad y magnetismo. Dicho trabajo produjo una conmoción en la comunidad científica, que inmediatamente comenzó a proponer nuevas experiencias y teorías sobre la conexión entre la electricidad y el magnetismo.

Gray ya había descrito en 1729 que unos materiales conducían la electricidad y otros no. Volta fue un poco más allá e introdujo un nuevo concepto: los semiconductores, que estaban a medio camino entre conductores y aislantes. Franklin, por su parte, había descrito la electricidad positiva y la negativa. Sería, sin embargo, en el año 1826 cuando todos los conceptos anteriores fueron totalmente comprendidos. En ese año Ohm publicó su trabajo sobre la conexión entre la resistencia eléctrica del material, la tensión y la corriente.

Las primeras aplicaciones de la electrónica

El otoño del año 1820 fue uno de los momentos más productivos en la historia de la electrodinámica. Fue entonces cuando se empezaron a sentar las bases del electromagnetismo. Tal vez el resultado más importante de esa época nos viene de la mano de Ampere. En septiembre de 1820 demostraba que la corriente eléctrica no solo ejerce fuerza mecánica sobre un imán, sino también sobre otro conductor por el que circule la corriente eléctrica. Generadores, motores y transformadores existen gracias a la inducción electromagnética.

Las primeras ideas sobre la telegrafía surgen inmediatamente después de que Oersted presentara su descubrimiento el 21 de julio de 1820. Sin embargo, el impulso definitivo a la comunicación telegráfica lo dará S. Morse. El 7 de abril

de 1838 patentó su telégrafo en Washington y dos años más tarde propuso el alfabeto punto- raya, que lleva su nombre. La primera línea telegráfica con tecnología Morse enlazó las ciudades de Washington y Baltimore, y fue inaugurada el 27 de mayo de 1844. El desarrollo de la telegrafía fue tan vertiginoso que ya en 1851 Reuter inauguró en Londres la agencia de noticias que lleva su nombre.

La ley de inducción de Faraday tuvo repercusiones prácticas muy importantes para la transformación de la energía eléctrica en mecánica, es decir, para el desarrollo de los motores eléctricos. El italiano Paccinotti, el belga Gramme, el inglés Wheatstone y el alemán Siemens fueron los inventores más acreditados en los años sesenta y setenta del siglo XIX en la concepción de motores eléctricos.

Así pues, el ecuador de ese siglo marca un punto de inflexión importante en la historia de la electrónica. Todos los esfuerzos científicos anteriores condujeron a resultados prácticos. Además, cada vez era más patente el hecho de que la electricidad debería jugar un papel muy importante en el desarrollo industrial. W. Siemens fundó, en el año 1847, la primera empresa electrónica alemana y, en Suiza, Hipp fundó el primer taller electrónico en 1850. La electricidad teórica y científica daba paso a la técnica eléctrica que hoy en día recibe el nombre de electrotecnia.

De manera análoga a lo que había ocurrido con el desarrollo de la telegrafía, también en la telefonía, tras largos años de ensayos físicos en Europa, ganó la batalla práctica Estados Unidos. El profesor A. G. Bell, escocés de 29 años, y Gray, de Chicago, iniciaron, mediante su patente del 14 de febrero de 1876, un nuevo hito en las comunicaciones.

La primera transmisión telefónica inteligible fue hecha por Bell en la Universidad de Boston el 10 de marzo de 1876; el 12 de febrero de 1877 presentó, en el Instituto Essex de Salem, su teléfono ante seiscientos asistentes, y la primera línea telefónica del mundo se puso en funcionamiento en Boston el 4 de abril de 1877.

El desarrollo de las líneas de distribución eléctrica siguió un camino paralelo, en los años ochenta del siglo XIX, al de las líneas telefónicas. Ya en 1879 W. Siemens introduce el concepto *electrotécnica* para la electricidad aplicada.

Esos años pueden ser considerados como los del nacimiento de la electricidad aplicada, que más adelante recibiría el nombre general de *electrónica*.

Así mismo, en los años ochenta del siglo XIX se desarrolló plenamente la segunda revolución industrial a través del uso de la energía eléctrica como fuente de energía en el sector industrial. Paralelamente, la telefonía, el transporte eléctrico y la iluminación eléctrica marcaron los hitos básicos que más influyeron en el ulterior desarrollo de la historia de la electrónica y de la industria electrónica en esa primera fase.

Las primeras centrales eléctricas estaban proyectadas para la generación de corriente continua. El sistema actual de alimentación industrial, la red trifásica, fue desarrollado a principios de la década de 1890 gracias, fundamentalmente, al invento del motor de electricidad alterna trifásico por parte de Dolivo-Dobrowolsky y C. Brown en 1889. Dolivo-Dobrowolsky trabajaba en aquel entonces en la empresa AEG (Frankfurt) y C. Brown sería años más tarde, concretamente el 2 de octubre de 1891, el fundador, junto con W. Boveri, de una empresa multinacional suiza del sector electrónico conocida entonces por Brown-Boveri (BBC) y actualmente por ABB.

La segunda década del siglo XIX no solamente fue sumamente importante en el aspecto del desarrollo práctico de la electricidad, sino que también lo fue en el aspecto teórico. Thomson desarrolló, en 1853, las ecuaciones básicas de los circuitos oscilantes. J. C. Maxwell publicó en 1865 su trabajo «A dynamical theory of the electromagnetic field» en la revista *Physical Transactions*. J. H. Poynting demostró en «On the transfer of energy in the electromagnetic field», que apareció en *Philosophical Transactions*, un resultado sorprendente deducido a partir de las ecuaciones de Maxwell: la energía eléctrica no solo se propaga por cable, sino que también puede propagarse en el aire o en el vacío.

H. Hertz, profesor de Karlsruhe, consiguió demostrar experimentalmente en 1886 la existencia de tales ondas electromagnéticas. Hertz trabajaba con osciladores de 100 MHz que ya tenían capacidad de emisión de energía electromagnética en el espacio. Tales ondas fueron bautizadas por este como «ondas de propagación de la fuerza eléctrica».

En 1899 Guglielmo Marconi realizó experiencias de radiotransmisión entre Chamonix y el Montblanc. En 1900 se instaló en Bruselas la primera emisora y en 1901 se enviaban telegramas entre Bruselas y Antwerpen. En 1902 ya era posible enviar noticias de Inglaterra a EE. UU. y a partir de 1907 la comunicación radioeléctrica entre Europa y América era algo habitual. Muchos consideran a Nikola Tesla el verdadero inventor de la radio, aunque fue Marconi quien presentó la patente en 1904. Como consecuencia, Marconi recibió en 1909 el Premio Nobel de Física junto con K. F. Braun.

La radio y la televisión

Como aplicación del efecto Edison, patentaba A. Fleming en el año 1904 el diodo termoiónico como detector de señales eléctricas. Fleming se apoyó para su invención en el hecho conocido de que, en un tubo de vacío con un ánodo frío y un cátodo caliente, la corriente solo circula en un sentido.

Un año más tarde, un ingeniero de la Western Electric Company, el americano Lee de Forest, patentaba en América un dispositivo semejante al de Fleming y que fue denominado *audion*.

En 1906, Von Lieben, en Viena, incorporó al diodo termoiónico un tercer electrodo denominado rejilla. El triodo, que lograba controlar el flujo de electrones a través de la rejilla, había nacido, y un año más tarde De Forest lo incluyó como amplificador de señales de radiofrecuencia.

El triodo fue la base de los sistemas de radio para la amplificación y modulación de las señales que se querían transmitir. Ello permitía realizar una amplificación de la señal mediante amplificadores sintonizados a una frecuencia única de salida, lo que se denominó *frecuencia intermedia*. Este sistema de transmisión y recepción ha perdurado hasta nuestros días con el nombre de *superheterodino* y es el único empleado en la técnica de modulación en amplitud.

La radioemisión necesitó del conocimiento de la modulación, que ya había sido estudiada teóricamente en 1914 por C. Englund, quien descubrió las bandas laterales típicas de la modulación en amplitud. Asimismo, empezó a

usarse el triodo como modulador en la segunda década del siglo XX, alcanzando niveles altos de perfección gracias a los trabajos de H. J. van der Bijl, Colpitts y C. White, entre otros.

Otro gran protagonista de la aplicación del descubrimiento de Hertz, y que en estos años empezó a cobrar una importancia creciente, fue la televisión. El disco de Nipkow, patentado en 1884, fue el más empleado hasta cerca de 1930, hasta el punto de que el primer sistema comercial de televisión desarrollado por la Bell System en 1927 utilizaba dicho disco.

A. C. Swinton propuso, en 1908, un sistema completamente electrónico en el que la parte electromecánica del transmisor era sustituida por un tubo de rayos catódicos cuyo chorro de electrones era dirigido sobre una placa de células de selenio, desarrollando el sistema de televisión tal y como hoy la conocemos. En Londres se inauguró, el 2 de noviembre de 1936, la transmisión regular de imágenes. Se puede considerar esta fecha como el nacimiento de la televisión actual.

La transmisión inalámbrica de la energía eléctrica condujo al desarrollo de dos productos electrónicos comerciales tremendamente populares: la radio y la televisión; sin embargo, no fueron estos productos los únicos derivados del descubrimiento de las ondas hertzianas. Así, en 1922, Taylor y Young demostraron experimentalmente la detección de barcos mediante el empleo de ondas de radio y ocho años más tarde descubrieron que la detección de aviones también era posible mediante las ondas hertzianas. En 1939 se comienza a emplear el radar en Inglaterra y EE. UU. para la detección de aviones.

Al comienzo de la Segunda Guerra Mundial, Hedwig Eva Maria Kiesler, conocida actriz de nombre artístico Hedy Lammar, y el compositor George Antheil desarrollaron la patente de un sistema guiado de los torpedos que utilizaba el espectro ensanchado y la tecnología de salto de frecuencia. Aunque la Armada de Estados Unidos no adoptó la tecnología hasta la década de 1960, sus trabajos fueron el fundamento de todas las tecnologías inalámbricas de las que disponemos en la actualidad, como el WiFi, el GPS y el bluetooth.

En 1904, gracias a la iniciativa de J. Stark, vio la luz el primer número de la revista *Radiactividad y Electrónica*. Por primera vez aparecía la palabra *electrónica*

en el título de una revista. Este concepto comprendía aquellos aparatos y métodos asociados que funcionaban gracias al libre movimiento de los electrones. Se distinguieron desde un principio dos ramas importantes dentro del campo de la electrónica: la electrónica de señal y la electrónica de potencia. La primera manejaba señales eléctricas y la segunda, potencia eléctrica.

Los inicios de la electrónica de potencia

Paralelamente al desarrollo de la radio y televisión, aunque con un eco popular mucho menor, se producía el desarrollo de ciertas experiencias de aplicación de la energía eléctrica que darían como resultado la electrónica de potencia. Cabe datar el inicio de dichas experiencias en 1901, cuando P. Cooper Hewitt demostró experimentalmente el funcionamiento de la lámpara de vapor de mercurio en la Universidad de Columbia, en Nueva York.

Un año más tarde, el mismo Cooper Hewitt patentaba, en concreto el 19 de diciembre de 1902, el «rectificador para corriente alterna», del cual el descubridor comentó: «es una invención de gran utilidad en aquellos casos en que se requiere corriente continua y solo se dispone de un suministro de alterna». Las centrales eléctricas generaban, casi todas ellas, energía alterna, y los ferrocarriles, los tranvías y la industria electroquímica, los más importantes consumidores de energía eléctrica por aquel entonces, requerían corriente continua.

En 1912 B. Schaefer presentó en Darmstadt su tesis doctoral, *Sobre rectificadores de vapor de mercurio para altas potencias*, en la que exponía la resolución del problema técnico del mantenimiento del vacío en un gran volumen. Poco después, en 1913, se puso en el hospital infantil de Zúrich la primera gran instalación rectificadora en funcionamiento. Había nacido la era de la electrónica de alta potencia. La conversión electrónica de la energía eléctrica había abandonado los reducidos espacios de los laboratorios para penetrar en el amplio mundo de la industria. El desarrollo de la electrónica de altas corrientes fue, en sus comienzos, paralelo al de bajas corrientes. Así, Fleming había patentado su diodo de vacío tres años después de que Hewitt hubiera patentado el rectificador

de vapor de mercurio. El modo operativo de ambos descubrimientos era el mismo; sin embargo, el principio físico de los dispositivos era totalmente distinto.

Y aunque Thomas, colaborador de Cooper Hewitt, ya en 1903 había propuesto el control del rectificador de mercurio y Langmuir patentaba en 1914 la rejilla para dicha lámpara de mercurio, no sería hasta los años treinta cuando se inició el desarrollo práctico de rectificadores controlados con lámparas de mercurio. A partir de ahí se desarrolló una gran variedad de circuitos especiales. No solamente se podía transformar la corriente alterna en continua, sino que, gracias a los rectificadores controlados, se podía obtener la conversión inversa, es decir, de continua a alterna. Se construyeron sistemas de potencia que transformaban la frecuencia de la acometida en otra frecuencia. Estos dispositivos no solo podían transformar alterna en continua, sino también todas las demás posibilidades, es decir, continua-alterna y alterna-alterna. A este tipo de circuitos se los bautizó como «convertidores de potencia».

En contraposición a la popularidad de la electrónica de la información, gracias a la radio y la televisión, el gran desarrollo experimentado por la electrónica de potencia apenas fue percibido por la población. El hecho de que, en 1915, en Zúrich, por primera vez en la historia del transporte, se pusieran en circulación los tranvías eléctricos gracias a la existencia de la conversión electrónica de la energía apenas llegó al gran público. Tampoco, el hecho de que por primera vez en la historia europea Inglaterra y Europa estuvieran conectadas mediante la misma línea de distribución de energía eléctrica, gracias a las lámparas de vapor de mercurio. Que la electrónica de potencia estaba detrás de todos los desarrollos de principios de siglo no era un hecho de dominio público. Metros, tranvías y trenes de larga distancia requerían convertidores de potencia.

Así mismo, los oyentes de radio jamás supieron que para la alimentación de las emisoras se requería la existencia de rectificadores de mercurio. También el aluminio se producía con grandes instalaciones rectificadoras. Aplicaciones como las mencionadas y otras muchas requerían la electrónica de potencia para su funcionamiento.

Aun cuando la técnica de rectificación mediante lámparas de mercurio había nacido en EE. UU., esta progresaría más rápidamente en Europa debido

fundamentalmente a que en este continente el transporte ferroviario era eléctrico, a diferencia de lo que ocurría en EE. UU., donde estaba basado en el carbón como fuente de energía. Esta es la razón por la que las grandes instalaciones de conversión energética tuvieron un gran desarrollo en Europa, mientras que EE. UU. quedó rezagado en este campo.

El análisis matemático de los circuitos rectificadores de corriente alterna a corriente continua fue iniciado en 1905 por K. P. Steimetz. Él fue el fundador de la electrotecnia teórica e introdujo el concepto de reactancia en la electrónica, así como el cálculo con números complejos para el análisis de circuitos y sistemas.

El tránsito de la electrónica de vacío a la electrónica de estado sólido

La introducción de los elementos semiconductores en la electrónica data de los primeros años del siglo XX. En esta época se emplearon los llamados *detectores de cristal* para la detección de ondas de radio y se probaron gran cantidad de materiales para su fabricación.

H. H. C. Dunwoody patentó en 1906 un detector de ondas de radio de carbón y silicio puro, y para tal fin fue empleado en esos años por Pickard. Debido al desarrollo de la electrónica de vacío, estos componentes de estado sólido cayeron en el olvido en su aplicación práctica hasta medio siglo más tarde. Sin embargo, los trabajos teóricos, y más tarde los experimentales, fueron intensos. Así, a partir de principios del siglo XX se iniciaron una serie de trabajos cuya importancia se hace patente casi medio siglo después.

En el aspecto teórico Drude elaboró a principios de 1900 la teoría, que podríamos llamar «clásica», de la conducción eléctrica, que H. A. Lorentz reelaboró utilizando la estadística de Maxwell-Boltzmann y la ecuación de transporte de este último, consiguiendo la justificación teórica de la ley de Ohm y una expresión cuantitativa para la conductividad eléctrica.

El modelo de Lorentz y Drude no proporcionaba datos acordes con los resultados experimentales acerca del calor específico de los metales, que resultaba ser menor que el previsto a partir de los electrones de conducción. En este

sentido, A. Einstein elaboró en 1911 un modelo bastante simple, consistente en suponer que el calor específico de los sólidos se debe a las vibraciones de la red y que estas vibraciones tienen la misma frecuencia para todos los puntos. La primera parte demostró ser correcta, pero no así la segunda, que solo ofrecía resultados concordantes con la experiencia a temperaturas no muy bajas, a las que dejaba de cumplirse la ley de Dulong y Petit.

En 1912 Debye modificó el modelo de Einstein considerando los átomos de los cristales como osciladores acoplados que pueden propagar ondas elásticas cuya frecuencia varía sobre un amplio rango de valores. Aunque así todavía se obtenían algunos resultados aproximados, las predicciones sobre el calor específico en la región de bajas temperaturas fueron superiores a las del modelo de Einstein. Quizá su mérito más destacado fue el proporcionar una base para varias investigaciones posteriores más detalladas.

En 1933 M. Blackman estudió con cierto detalle algunas modificaciones de la teoría de Debye y llegó a la conclusión de que, en ciertos casos específicos, el procedimiento de Debye puede llevar a errores notables y que, en esos casos, es mejor usar el procedimiento de Born-von Karman.

Por otro lado, aparecieron otros puntos conflictivos: el coeficiente de Hall variaba de signo en ciertos cristales y el recorrido libre medio deducido del efecto Hall resultaba mucho mayor que los espacios interatómicos y aumentaba al disminuir la temperatura, contrariamente a lo previsto.

Estos inconvenientes quedaron resueltos al aplicar la estadística de Fermi-Dirac a los electrones de conducción, en principio considerados como electrones libres en un potencial de red nulo (Sommerfeld, 1927), quedando resuelta, en primer lugar, su contribución al calor específico de los sólidos; en segundo, la conductividad (que resultó coincidir con la de Drude), y, en tercer lugar, el paramagnetismo de Pauli.

Más tarde, debido a la necesidad de explicar el comportamiento diverso de los sólidos (metales, semimetales, semiconductores y aislantes) desde el punto de vista eléctrico, se desarrolló la teoría de electrones cuasi libres y electrones sometidos a fuerte ligadura. Con estos dos métodos aparecen las bandas de energía prohibida, que explican la conducta dispar de los diferentes

tipos de materiales y el tiempo de relajación halla su sentido físico, aunque para el caso de los metales las conclusiones son las mismas que haciendo uso de la teoría de Sommerfeld.

El primer trabajo sobre la posibilidad de controlar la corriente en semiconductores surge en el año 1938 en la revista *Zeitschrift für Physik*. Hilsch y Pohl, en su artículo «Control de la corriente en cristales con tres electrodos», presentaban un modelo de un diodo de unión al que se le incorporaba un electrodo de control consistente en un hilo de platino. En 1939 el físico alemán Walter Schottky explicó teóricamente el proceso de conducción en uniones p-n, sentando así las bases teóricas del comportamiento de los semiconductores.

Los años cuarenta del siglo XX fueron fundamentales para el ulterior descubrimiento del transistor. En esa década se sentaron las bases teóricas del comportamiento de los rectificadores semiconductores. Las aportaciones más importantes fueron debidas al físico nacido en China W. A. Brattain, al americano A. H. Wilson, al inglés N. F. Mott, al alemán W. Schottky y al ruso B. Davydow.

En 1946, tras la Segunda Guerra Mundial, se formó en la empresa Bell Laboratories un pequeño equipo de físicos dirigido por W. Shockley para desarrollar un programa de investigación sobre semiconductores. El trabajo finalizó dos años más tarde con el descubrimiento, no planeado, del transistor (acrónimo del inglés *transfer-resistor*, ‘resistor de transferencia’) y el 23 de diciembre de 1947 el primer elemento amplificador semiconductor vio la luz.

Este transistor descubierto en 1947 era del tipo de puntas de contacto. Este primer gran éxito de la nueva electrónica tuvo efímera vida, pues un año más tarde se dio un paso de gigante en el avance de esta disciplina con la invención del transistor bipolar por parte de investigadores de la Bell Laboratories también dirigidos por el físico Shockley, que recibió por ello el Premio Nobel de Física en 1956. Las uniones realizadas eran de tipo metalúrgico y las tres zonas recibían, respectivamente, los nombres de colector, emisor y base (aunque su disposición física era colector-base-emisor).

La revista *Electronics* publicó el descubrimiento del transistor en septiembre de 1948 y lo denominó *triodo cristalino*. «El transistor sustituye a los triodos de vacío en muchas aplicaciones y abre un nuevo campo en la electrónica», así

concluía de forma profética el artículo. Como aplicación de los transistores se citaba su implantación en los radiorreceptores. Así pues, el primer trabajo de investigación sobre el comportamiento de diodos y transistores de unión se debe a Schockley y se recoge en su ya clásico libro *Electrones y huecos en semiconductores*, publicado en 1950. La teoría descrita fue ampliada más tarde por Sah (1957) y Moll (1958).

También la tecnología de fabricación de transistores de unión ha sufrido constantes innovaciones. Con la aparición de los primeros transistores de aleación a principios de la década de los años cincuenta del siglo XX, se inició una larga singladura que ni las mentes más imaginativas habían podido concebir en un principio. En 1956 los transistores de aleación base difusa mejoraban las frecuencias de transición, manteniendo un compromiso razonable con las tensiones de ruptura. En torno a esos años, y siempre sobre tecnología semiconductor de germanio, comienzan a producirse los primeros transistores que hacen pensar en la utilización industrial de estos dispositivos.

A partir de los transistores de tecnología mesa se empieza a sentir la necesidad de un proceso que tuviese baja dispersión en los parámetros clave y que al mismo tiempo redujera el proceso de su fabricación. La utilización de máscaras para controlar la difusión de la base y del emisor sobre el cristal, crecido epitaxialmente, y que constituye el colector, representó el advenimiento de la tecnología planar-epitaxial (1960), que une a su perfecta repetitividad en los parámetros el hecho de poder fabricar entre 1.000 y 10.000 transistores por oblea. Con esta tecnología se fabrican hoy en día la mayor parte de los transistores de propósito general.

Otra etapa importante en la historia del transistor fue el desarrollo del transistor de efecto de campo (FET). En 1928 el físico alemán J. Lilienfeld describió teóricamente un elemento semiconductor de tres electrodos para el control de la corriente eléctrica, con un comportamiento análogo al triodo de vacío. Era el antecesor del transistor de efecto de campo. Es en el año 1934 cuando O. Heil presenta su patente, «un amplificador o controlador eléctrico con una o más capas semiconductoras», y propone una estructura metal-aislante-semiconductor como elemento amplificador. El transistor de efecto de campo de Heil estaba

construido sobre la base de un cristal en el cual se controlaba la conductividad del canal mediante un tercer terminal denominado puerta.

En 1945, Schockley imaginó un dispositivo semejante al FET y demostró teóricamente que podía controlar el paso de corriente eléctrica. Gracias a sus trabajos de 1952, el primer transistor de efecto de campo de unión que funcionó correctamente fue el JFET. En este tipo de transistor, la corriente eléctrica se producía por un único tipo de portadores, lo que dio lugar a que el propio Schockley lo bautizara con el nombre de transistor unipolar, a diferencia del transistor bipolar de 1948.

Basándose en la idea original de Lilienfeld y Heil de alterar la conductividad de un semiconductor a través de la aplicación de un campo eléctrico, D. Kaugh y J. Atalla propusieron, en 1960, el primer transistor de efecto de campo metal-aislante-semiconductor (MOSFET). El primer dispositivo práctico que funcionó bajo estos principios fue construido en 1962 por Hofstein y Heiman en la empresa RCA.

Los inicios de la electrónica de potencia mediante semiconductores

La electrónica de potencia con semiconductores se desarrolló fundamentalmente a partir del nacimiento del tiristor en 1950; sin embargo, el tiristor, elemento de control de potencia por excelencia hasta mediados de la década de los ochenta, no fue introducido hasta cinco años más tarde. En ese año, 1956, Moll propuso una estructura de cuatro capas de cristal semiconductor tipos P y N alternadas. Esta estructura funcionaba como un conmutador dependiendo de la tensión aplicada en sus extremos. El control de conducción del dispositivo se llevaba a cabo mediante la inyección de corrientes en un electrodo auxiliar que recibe el nombre de puerta.

El primer intento de introducir en el mundo industrial la tecnología semiconductor de control de potencia fue en 1957. En ese año la firma Siemens construyó la primera electro-locomotora con rectificadores de silicio en sustitución de los antiguos de lámpara de mercurio y los de selenio.

A partir de esas fechas los conceptos electrotécnicos se convirtieron en electrónicos. Se desarrollaron, entre los años 1965 y 1980, gran cantidad de convertidores para el procesamiento de la potencia eléctrica basados en este dispositivo. Cabe agrupar los sistemas desarrollados en convertidores AC/DC (rectificadores controlados), convertidores DC/AC y AC/AC (inversores) y convertidores DC/DC (*choppers* de potencia).

Años más tarde se presentó el TRIAC, un elemento bidireccional en corriente en el que, a diferencia del tiristor, la corriente solo circula en un sentido. Sin embargo, su capacidad de control de potencia es bastante reducida frente al tiristor, por lo que es un elemento empleado en aplicaciones «domésticas» o menores, manteniéndose en consecuencia el liderazgo del tiristor en las aplicaciones industriales.

El tiristor era el elemento de control de potencia por excelencia hasta finales de los años ochenta; sin embargo, en torno a esos años se produce un fuerte incremento de la penetración en el mercado de equipos de potencia, debido fundamentalmente a la incorporación de otros nuevos elementos de potencia como el transistor bipolar de potencia (BJT), el transistor MOSFET de potencia o el transistor IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), que permiten mayores frecuencias de conmutación y consecuentemente la reducción del tamaño de los equipos. El tiristor sigue ocupando hoy en día, a pesar de todo, un lugar preferente para las potencias muy altas (mayores de los MW) y bajas frecuencias.

En relación con los transistores bipolares de potencia, hacia 1978 se produce una importante evolución motivada fundamentalmente por los desarrollos del equipo de semiconductores de la empresa Thomson en Aix-en-Provence. Asimismo, las empresas japonesas Fuji y Toshiba introdujeron en el mercado Darlingtons triples, relativamente lentos, pero con niveles de tensión de hasta 1.200 V y de corriente de hasta 600 A (año 1984).

En lo concerniente a la tecnología de transistores MOSFET de potencia, la evolución en aquellos años no fue menos espectacular gracias al desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación de estos dispositivos. Siemens, con la tecnología SIPMOS (Siemens Power MOS) y el encapsulado de la empresa Semikron, puso en el mercado transistores MOSFET de alta tensión (900 V) y alta capa-

cidad de corriente (36 A). Otros componentes de potencia con un gran auge fueron los IGBT, que nacieron en su versión de gran potencia sobre el año 1987. Consisten en una estructura de capas, de modo que por la puerta se asemejan a un MOSFET (alta impedancia de entrada) y por el canal de conducción a un BJT. Son menos rápidos que los MOSFET, pero más rápidos que los BJT, y consumen una potencia menor que los MOSFET y algo mayor que los BJT.

Actualmente se dispone en el mercado de dispositivos de 1.200 V y 600 A para el sector industrial, y dispositivos con tensiones de hasta 3,3 kV para aplicaciones de tracción en los sectores ferroviario, eólico, etc. A partir de 2015 nuevos materiales semiconductores, como el carburo de silicio y el arseniuro de galio, han abierto fronteras desconocidas en el terreno de la electrónica de potencia, lográndose eficiencias superiores al 99 %, inimaginables hace un par de décadas con el silicio.

El tránsito hacia la microelectrónica

Tras describir el proceso histórico de desarrollo de los componentes discretos, explicaré a continuación la evolución en los últimos años de un concepto que nació en 1959 por obra de Kilby, la integración de componentes sobre una pastilla semiconductor, y que ha conducido a la miniaturización y mayor potencia de procesamiento de señales de los sistemas electrónicos.

Aunque se suele datar el nacimiento de la integración de componentes en un chip en 1959, la idea provenía de muchos años antes. En 1919, los físicos W. H. Eccles y F. W. Jordan desarrollaban mediante dos válvulas el «flip-flop». Para que este circuito funcionara de manera óptima, era aconsejable que ambas válvulas tuvieran parámetros semejantes, por lo que se diseñaron triodos dobles en una misma lámpara de vacío. En 1930 la firma Loewe presentó un aparato de radio en el que triodos, pentodos y elementos pasivos estaban integrados en una misma lámpara de vacío, y en 1952 G. W. A. Dummer estableció las ideas básicas de un circuito integrado con dispositivos electrónicos semiconductores. Sin embargo, fue J. S. Kilby, de la empresa Texas Instruments, quien en octubre

de 1958 materializó el primer circuito integrado (CI) semiconductor. Sobre un sustrato semiconductor de germanio integró transistores de tipo mesa, resistencias y condensadores. Cuatro meses después, en 1959, Kilby presentaba su invento para ser patentado; sin embargo, la patente tuvo escasa vigencia, puesto que, en prácticamente las mismas fechas, el americano R. Noyce descubrió un procedimiento mucho más sencillo para la integración. Se trataba de la difusión planar, que daría lugar más adelante a la producción en masa de chips. En aquel entonces, 1960, se logró integrar en un chip unos 500-800 transistores. En la actualidad y en una investigación conjunta de IBM, Global Foundries y Samsung se han logrado integrar 30.000 millones de transistores en un chip del tamaño de una uña gracias a la tecnología de 5 nanómetros.

La microelectrónica propiamente dicha nació cuando fue factible la técnica de difusión monolítica de transistores de diferentes polaridades en un mismo sustrato. Esto ocurriría en la primera mitad de la década de los sesenta. Los primeros amplificadores operacionales (AO), sin compensación de frecuencia, como el MA709, hicieron su aparición en esas fechas. La distancia recorrida entre aquellos pioneros y los actuales AO ha sido enorme, lográndose mejoras de mil veces en los valores de las tensiones de *offset* y corriente de entrada.

Realmente, todo el desarrollo de los CI es un caminar en el sentido de especialización de funciones. También fue un logro, en la década de los setenta del siglo XX, el hecho de reforzar la similitud entre los parámetros de AO ideal y real. Los BIFET son un ejemplo claro de ello. Las impedancias de entrada han aumentado entre 10^4 y 10^6 veces con respecto a los AO convencionales, manteniéndose la impedancia de salida mejorada ligeramente y permaneciendo la variación de la tensión de *offset* prácticamente constante al variar la temperatura.

La década de 1960 conoció el nacimiento y desuso de varias formas tecnológicas de CI digitales. El progreso ha estado enmarcado por tres ejes coordinados, dos de los cuales parecían, y aún lo parecen en buena medida, incompatibles. Nos estamos refiriendo al consumo energético y a la velocidad de proceso. La tercera dirección de progreso ha sido la inmunidad al ruido eléctrico.

A principios de los años setenta del siglo pasado, para cubrir todas las necesidades de diseño industriales, se contaba con las siguientes familias lógicas: la Emitter Coupled Logic (ECL), muy rápida (tiempo de propagación medio 2-3 ns) y con un consumo elevado, 20-30 mW por puerta; la Diode Transistor Logic (DTL), como familia estándares de aplicaciones generales, diez veces más lenta y con un consumo cinco veces menor que la ECL, y la familia High Threshold Family (HTL), que permitía cubrir aplicaciones en ambientes ruidosos.

Asimismo, en esa época aparece y se consolida rápidamente la que habría de ser la familia lógica de mayor uso en circuitos electrónicos de la época: la familia lógica Transistor-Transistor-Logic (TTL), con un tiempo de acceso de 10-12 ns y un consumo de 15 mW por puerta a 5 V. Más adelante (años 1973 y 1974), con la maduración industrial de la producción de uniones Schottky, llegan las dos tecnologías que mejoran el compromiso velocidad-consumo de su predecesora. La TTL Low Speed (TTL LS) alcanza 8 ns con 3 mW, mientras que la familia TTL High Speed (TTL HS) alcanza los 3 ns con solo 25 mW.

Entre los años 1974 y 1975 aparece una nueva tecnología, la MOS, y en especial la familia lógica CMOS (Complementary MOS). Esta familia es más lenta que la TTL, con tiempos de propagación del orden de 60 ns, pero con un consumo extremadamente bajo (a bajas frecuencias del orden de 50 nW). Las tecnologías CMOS dominan en la actualidad las aplicaciones industriales.

Otra familia lógica, gracias a las nuevas técnicas de producción del sustrato de zafiro, es la Silicon on Sapphire CMOS (SOS/CMOS). En concreto, RCA, paladín del SOS/CMOS, presentó en 1982 un microprocesador de 32 bits con 375.000 transistores integrados. Indicativo de la densidad de integración en esta tecnología es la familia ASIC (Application Specific Integrated Circuit), presentada en 1989 por la empresa National, capaz de integrar 100.000 puertas y ofrecer un retardo de propagación de 120 ps.

El camino hacia los microprocesadores

Una vez que la tecnología de circuitos integrados digitales había alcanzado una significativa madurez, dando lugar a las diferentes familias lógicas digitales descritas anteriormente, se prosiguió el camino de la miniaturización mediante el desarrollo de componentes microelectrónicos, especialmente los digitales. El progreso en el ámbito de los microprocesadores y de las memorias ha sido espectacular desde entonces.

El año 1971 fue verdaderamente importante. Gracias al desarrollo realizado por el ingeniero M. E. Hoff en 1969, la empresa Texas Instruments presentó el primer microprocesador comercial. Este producto tendría más adelante un protagonismo fundamental en la evolución de sistemas electrónicos tales como relojes, cámaras de fotos, electrodomésticos, aparatos médicos, maquinaria industrial, robots, industria automovilística, tráfico, etc. La primera aplicación de este nuevo dispositivo fue debida también a Texas Instruments, con la introducción en el mercado de la primera calculadora de bolsillo.

A finales de 1971 la compañía Intel comercializó el primer conjunto de microprocesadores y memorias aplicable al diseño de sistemas integrados. El producto se denominó 4004 y tuvo una enorme aceptación en el mundo. A comienzos del año siguiente, Intel introduce el microprocesador 8008, padre de la posterior serie de microprocesadores de las empresas Intel, Zilog, etc. En 1973, Intel comercializó el 8080, hermano mayor del 8008, con tecnología NMOS, con un cambio de concepción física y más instrucciones. Este microprocesador fue sin duda el más famoso y del que se fabricaron más unidades. Entre 1974 y 1975, Motorola presenta su serie 6800 y, al año siguiente, Zilog da a conocer el primer microprocesador «enhaced» de 8 bits: el Z80. En los años siguientes y en el campo de los 8 bits, las empresas mejoraron la potencia de sus diseños originales. Surgieron, así, el microprocesador 6809 de Motorola, el 8085 de Intel, etc. Gracias al desarrollo de la lógica ECL, en 1976 la firma Motorola introdujo en el mercado el microprocesador más rápido del mundo, el modelo 10800.

En 1972 el consumo de microprocesadores se cifraba en 50.000 unidades; en 1977, en 6 millones; en 1979, en 60 millones, y en 1980, en 160 millones

de unidades. Así mismo, hay otros componentes que, sin tener el enorme desarrollo de los microprocesadores y las memorias, también presentan una atención creciente, como los captadores integrados, los módulos para la síntesis y tratamiento de la palabra, las redes lógicas y los periféricos inteligentes para los microprocesadores.

A partir de 1979 surge un creciente interés hacia los microprocesadores de 16 bits. En concreto, las expectativas de mercado indicaban un crecimiento relativo muy superior para los microprocesadores de 16 bits que para los de 8 bits. Entre los microprocesadores de 16 bits que se podían encontrar en el mercado en aquella época, destacamos la familia 9900 de Texas Instruments, la 9440 de Fairchild y la 8086 de Motorola.

La tendencia en el mundo de los microprocesadores se enfocó hacia la creación de periféricos inteligentes capaces de realizar su propio proceso de datos. Así, Intel presentó su coprocesador 8087, dotado de su propio juego de instrucciones, aritmética en coma flotante, 64 bits y doble precisión, el cual se utilizaba para intensificar la potencia aritmética del micro 8086. También fue Intel quien presentó el controlador de E/S 8089, también para el micro 8086, que era otro chip periférico con su propio juego de instrucciones y programa. Disponía de los canales de E/S (entrada/salida), lógica y aritmética de 20 bits, y era susceptible a transferir datos a una velocidad de 5 MHz. El microprocesador 8289, también de Intel, controlaba el bus del sistema tanto para el periférico E/S 8089 como para el procesador 8086.

En el campo de las memorias el desarrollo no fue menos espectacular que el sufrido por los microprocesadores. Hasta aproximadamente 1968, todos los ordenadores utilizaban exclusivamente memorias de ferrita, cuyas ventajas eran evidentes (no volatilidad y densidad bastante apreciable), pero cuyas desventajas eran también notables (fabricación difícilmente automatizable, márgenes de temperatura reducidos, que requerían ambientes protegidos y acondicionados, etc.). La primera memoria de semiconductores, que por cierto nunca se comercializó, se denominó 1101 y se trataba de una memoria estática de 256 bits en PMOS con puerta de Si. El segundo producto fabricado (Intel) y comercializado fue una memoria dinámica de 1.024 bits con la misma tecnología.

El camino recorrido en materia de memorias desde entonces hasta nuestros días ha sido enorme. Las memorias actuales son ultradensas. Existió en aquella época una pluralidad de tecnologías de fabricación: desde las memorias MOS hasta las CCD y de burbuja magnética. En 1989 NEC inicia una línea piloto de producción para RAM dinámicas CMOS de 16 Mbits y a finales de ese año Toshiba produce 100.000 unidades/mes de 4 Mbits y pone a punto un dispositivo experimental de 16 Mbits con litografía de 0,7 micras.

La evolución de los ordenadores

El desarrollo de la microelectrónica, y en especial el de los microprocesadores y las memorias, ha llevado a conseguir circuitos y sistemas cada vez más potentes y complejos, que han dado como resultado la implantación de la electrónica en gran cantidad de aparatos y equipos. El desarrollo de estos ha sido enorme en los últimos sesenta años. Tal vez el más espectacular y conocido sean los ordenadores, que se han desarrollado gracias a la miniaturización de los circuitos electrónicos y que nacieron mucho antes del invento del transistor.

Las primeras máquinas de cálculo ya fueron construidas por B. Pascal, Leibniz y otros científicos en el siglo XVII. Una descripción de la máquina de Pascal, de la cual se construyeron cincuenta unidades, se encuentra en *Máquinas e invenciones probadas por la Academia de las Ciencias*, París, 1735. La producción en serie de máquinas de calcular fue iniciada en 1820 por C. X. Thomas en París. Su fábrica construyó entre los años 1820 y 1880 más de 1.500 máquinas.

Sin embargo, el avance conceptual de aquel tiempo que tuvo más adelante gran repercusión en la concepción de los ordenadores fue el dado por C. Babbage en 1833 con su «máquina analítica». La máquina de Babbage disponía ya de «memoria» y estaba controlada por un programa en tarjetas perforadas. El concepto de programa mediante tarjetas perforadas ya había sido introducido previamente, en 1807, por J. M. Jacquard en la industria textil de la seda.

En 1886, el ingeniero alemán afincado en Estados Unidos H. Hollerith dio un paso más en la concepción de los ordenadores. Las tarjetas perforadas,

aparte de contener el programa de ejecución, también fueron empleadas como almacén de datos. El sistema de perforación de tarjetas fue, en la máquina de Hollerith, el primero que se realizó por medios electromecánicos. En 1890 la máquina de Hollerith fue empleada para realizar el censo de población en Estados Unidos y en 1910 en Alemania. Su introducción en la industria fue en 1911, en la fábrica Bayer de Leverkusen (Alemania).

En 1920 se construyó la primera máquina electromecánica de cálculo con terminal, de modo que varios operadores podían trabajar simultáneamente con una única unidad central de cálculo. En el año 1936 se da otro paso importante para el posterior desarrollo de los ordenadores. El francés R. Valtat presenta la patente de una máquina de cálculo que trabajaba en el sistema binario de numeración, descrito por el matemático inglés G. Boole en 1854. Un modelo mecánico bajo los principios indicados fue construido por la firma Philips de Holanda en 1936. En 1937, el ingeniero alemán K. Zuse presenta el primer prototipo electromecánico concebido como un «calculador universal». Tal dispositivo recibió el nombre de Z1.

El 12 de mayo de 1941 Zuse presenta al Instituto Experimental de Aviación Alemán su prototipo Z3. Fue el primer ordenador programable que trabajaba en sistema binario. Contenía 2.000 relés capaces de procesar cualquier problema aritmético. La máquina era también capaz de almacenar 1.400 bits de información. El programa era almacenado en una cinta de película de cine perforada. La máquina realizaba las cuatro operaciones básicas y extracción de raíces cuadradas, pero no poseía la capacidad de bifurcación en el programa.

El americano J. V. Atanasoff introdujo, en 1942, la primera máquina de cálculo con técnica de tubos de vacío. Este hecho pasó desapercibido en su época. El 11 de junio de 1943, el ingeniero alemán H. Schreyer, junto con K. Zuse, presentaba la patente de un ordenador totalmente electrónico con válvulas. Dada la época de la patente (Segunda Guerra Mundial), no pudo fabricarse un prototipo de acuerdo con las ideas de Schreyer.

El 7 de agosto de 1944, H. Aiken desarrollaba la primera máquina de calcular programable en América, el MARK-I, y el americano J. von Neumann iniciaba el desarrollo (1944-1952) de su autómatas programable, denominado EDVAC.

El primer ordenador totalmente electrónico fue presentado en 1945 en la Universidad de Pennsylvania. Fue desarrollado durante tres años por J. P. Eckert y J. W. Mauchly, se le llamó ENIAC-1 (*Electronic Numerical Integrator and Calculator*) y trabajó hasta el 2 de octubre de 1955. Ocupaba una superficie de 140 m², tenía más de 18.000 válvulas y 1.500 relés y consumía 150 kW. Su peso era de 30 toneladas. Zuse presentó en ese mismo año su Z4. En 1947, con técnica de relés, se presentaba en EE. UU. una versión mejorada del MARK- I, concretamente el MARK-II. En 1948, el matemático J. W. Turkey introducía el concepto de bit como unidad básica de la información digital.

En 1949, en la Universidad de Mánchester, bajo la dirección de M. V. Wilkes, se desarrolló el EDSAC (*Electronic Delay Storage Automatic Computer*), un ordenador totalmente electrónico, y en IBM, en Nueva York, bajo la dirección de J. P. Eckert, se presentó el SSEC (*Selective Secuence Electronic Calculator*). Los primeros circuitos con ferrita para almacenamiento de la información aparecerían en el mercado en 1950.

Un nuevo avance en la técnica de los ordenadores se produjo en 1957, en la Universidad de Cambridge, debido al matemático H. A. Aiken. En ese año presentó el MARK-III, que contenía 2.000 relés, 5.000 válvulas y 1.300 diodos. Los datos y programas eran almacenados en una cinta magnética.

En mayo de 1955 J. W. Backus desarrolló el lenguaje FORTRAN y en los laboratorios Bell es presentada la primera calculadora totalmente transistorizada, TRADICAC, de J. H. Felker. Poco después aparecen en el mercado los primeros ordenadores totalmente transistorizados, la serie 7090 de IBM y la gama 60 de Bull, y en 1956 IBM construye el primer ordenador con almacenamiento magnético.

Lo novedoso en estos ordenadores era 1) que el programa y los datos podían ser codificados en la máquina, 2) que el programa permitía bifurcaciones y 3) que cada orden del programa podía ser alterada durante el proceso de ejecución de este de acuerdo con los resultados obtenidos.

A partir de esas fechas el desarrollo de los ordenadores ha sido espectacular, por lo que citaremos solamente aquellos hechos que consideramos que son más significativos en la evolución de esta tecnología. La introducción, en 1962, de

transistores de tamaño extraordinariamente reducido en los ordenadores permitió que estos poseyeran una mayor compacidad y más velocidad de cálculo (ordenadores de tercera generación). Las burbujas magnéticas como elemento de almacenamiento fueron descubiertas en 1966. En muestras de laboratorio se alcanzaron densidades de almacenamiento de 10^5 bits/mm².

En 1958 y 1960 se desarrollaron los lenguajes de alto nivel, como ALGOL y COBOL respectivamente, y en 1961 IBM-Alemania creaba un nuevo concepto en el diálogo hombre-máquina: el teleproceso.

En 1965 se introdujeron los ordenadores para el control del tráfico. Zuse y sus colaboradores desarrollan la primera mesa de dibujo asistido por ordenador (CAD), a la que denominaron GRAPHOMAT Z64, y la firma Siemens AG presentó la instalación de cálculo 2002 como la primera serie de ordenadores totalmente transistorizados del mundo.

Asimismo, en 1965, la empresa Digital Equipment Corporation introdujo el primer miniordenador en el mercado, al que denominó PDP. El inglés N. Kitz introdujo en 1967 el primer ordenador electrónico de sobremesa, bautizado con el nombre de Anita Mark 8, y que gracias a la técnica monolítica en integración y a los LED, poseía unas dimensiones reducidas. La potencia de cálculo era muy reducida. En 1968 aparecen los primeros ordenadores de la cuarta generación, es decir, con circuitos integrados. Un ejemplo significativo de estos lo constituyó la serie 360 de IBM.

Para aplicaciones en el terreno de la geofísica, el americano Cragon desarrolló el primer ordenador con técnica LSI en 1969. Alrededor de 1972 los ordenadores se volvieron multiusuario. El sistema 370 de IBM es un claro exponente de este nuevo concepto. Con el modelo HP 65, la firma americana Hewlett-Packard fabricó el primer ordenador programable de bolsillo en 1974.

En 1980 diferentes compañías japonesas y americanas introdujeron los primeros ordenadores de mesa en el mercado. Por lo general, la visualización se hacía mediante diodos de cristal líquido, descubiertos en 1889 por O. Lehmann e introducidos por primera vez en el mercado por las empresas suizas La Roche y Brown-Bovery.

Hacia 1983 los ordenadores personales se introducen de forma masiva en empresas, despachos profesionales e incluso en las casas particulares. Como elemento de almacenamiento masivo de información se impuso también, alrededor de 1983, el disco flexible (*floppy disc*).

Alrededor de 1987 nace un nuevo concepto en el procesamiento de la información: el procesamiento óptico. De hecho, en los últimos años, en laboratorio, ya se han desarrollado prototipos de ordenadores ópticos que tal vez en el futuro sustituyan a los actuales de procesamiento eléctrico de los datos.

La tercera revolución industrial y la automatización de los procesos productivos

Hacia 1970 la automatización de los procesos productivos era una preocupación constante de las grandes empresas, especialmente en el sector automovilístico. Así, en esos años Ford y General Motors plantearon las especificaciones que debería cumplir un controlador electrónico programable para ser realmente útil en la industria. Se desarrollaron los primeros autómatas programables, basados en microcontroladores que, a finales de los años setenta, irían aumentando sus prestaciones y serían incorporados para la automatización de los procesos productivos mediante soporte de robots industriales y otra maquinaria. Constituye la tercera revolución industrial o etapa de automatización de los procesos productivos y de desarrollo de las tecnologías de la información.

Los principios teóricos de funcionamiento de estos sistemas habían sido desarrollados bastantes años antes. El concepto básico de realimentación fue introducido, en el año 1927, por H. Black para mejorar la calidad y estabilidad de los amplificadores en radiorreceptores. Se demostraba experimentalmente que, realimentando el amplificador, las características eléctricas de este eran prácticamente independientes de la temperatura y los parámetros de dispersión de las distintas series de las válvulas utilizadas. Este concepto dio paso a la producción en serie de radiorreceptores sin selección previa de componentes

ni ajustes críticos. La base matemática de la teoría de la realimentación fue establecida en 1932 por el sueco H. Nyquist.

Tal vez, la reciente historia de los sistemas productivos nace en 1949, cuando la fuerza aérea americana encarga al MIT (Massachusetts Institute of Technology) el desarrollo de un control numérico para máquinas-herramienta. Tres años después, en 1952, el MIT presenta la primera máquina-herramienta con control numérico (NC). En este caso se trataba de controlar numéricamente, a partir de los datos de medida de la pieza, la maquinaria para su producción. Bajo los principios desarrollados en el MIT se presentó, en 1954, la primera máquina-herramienta industrial con control numérico, cuyo control contenía cerca de 300 válvulas. En 1958, y también como resultado de las investigaciones en el MIT, se desarrolló el primer lenguaje para controles numéricos, al que se denominó APT (*Automatically Programmed Tools*).

En 1970 los controles numéricos estaban tan desarrollados que eran capaces de cambiar selectivamente de pieza y, en 1972, la tecnología de microcomputador fue introducida en estos sistemas, que a partir de esa fecha recibieron el nombre actual de CNC (*Computerized Numerical Control*) y que permitieron una mayor versatilidad en comparación con los NC, de forma que, en 1975, eran capaces de variar y corregir automáticamente las dimensiones de la pieza que se debía fabricar.

En Japón y EE. UU. se introdujo, en 1978, un nuevo concepto en la automatización de la producción, la producción centralizada. Mediante este sistema un ordenador central controla los controles numéricos (CNC), los sistemas de transporte de pieza y las instalaciones de potencia (convertidores de potencia).

En 1981 fue introducido un nuevo concepto en los sistemas productivos. Los sistemas de control numérico CNC comenzaron a admitir programas sin bifurcaciones condicionales. Mediante la introducción de los PLC (*Programmable Logic Controller*) se había ampliado la operatividad de los controles numéricos, lo que permitió dicho tipo de bifurcaciones en el programa.

En la VII Feria de la Máquina-Herramienta de Milán (EMO) se presentó, en 1987, un controlador de procesos totalmente novedoso. Se trataba de un PLC con inteligencia artificial, con capacidad de alterar el programa de acuerdo con los resultados obtenidos en el proceso.

Paralelamente al desarrollo de los controles numéricos se desarrollaron procedimientos mecánicos que, controlados mediante CNC o PLC, pudieran desplazar la pieza a voluntad (robots industriales). Un primer desarrollo preliminar fue realizado en la empresa americana Unimation (1963), que introdujo un nuevo concepto en la automatización de procesos. Se trataba de un robot (brazo articulado) industrial que fue denominado Unimat. Estos dispositivos encontraron rápidamente aplicación industrial, aunque en un principio su capacidad de movimiento era reducida. Se empleaban fundamentalmente en trabajos sucios o peligrosos, como soldadura eléctrica, pintura, etc. En 1983 había 14.250 robots instalados en Japón, lo que representaba un 62,7 % del parque mundial de estos dispositivos. En EE. UU. había 4.100 unidades (18,1 %), en la República Federal de Alemania 1.420 (6,2 %), en Suecia 940 (4,1 %), en Francia 600 (2,6 %), en Inglaterra 371 (1,6 %), en Italia 353 (1,5 %) y en Canadá 250 (1,1 %). Actualmente los robots son uno de los elementos básicos en la automatización de la producción y son la base de la llamada tercera revolución industrial.

Mientras que la primera revolución industrial, que nació en Inglaterra hacia 1700, estaba basada en la producción mecánica mediante el uso de la energía generada por el vapor de agua, y la segunda revolución industrial (sobre 1850) se asentaba en la producción en serie de tareas repetitivas con ayuda de la electricidad, la tercera revolución industrial, iniciada en EE. UU. (hacia 1970), fue consecuencia del uso de los controladores numéricos, que permitieron la automatización de los procesos productivos, la reconfiguración de tareas mediante el programa apropiado en los controladores de lógica programable (PLC) y el uso los robots industriales.

De la microelectrónica a la nanoelectrónica

La nanotecnología tiene como punto de partida la célebre conferencia del físico Richard Feynman de 1959, en Caltech, titulada «There is plenty of room at the bottom», en la que afirmó que en el futuro sería posible medir y controlar

la materia en la escala atómica. Si bien es cierto que todavía existe un reducido margen para una mayor integración con la tecnología de silicio actual, el margen de miniaturización es cada día más reducido. More Moore, More than Moore y Beyond-CMOS son actualmente las principales tendencias tecnológicas para una mayor miniaturización de los componentes electrónicos.

Es bien conocido, por la llamada ley de Moore, el hecho de que el número de transistores en un chip se duplica aproximadamente cada dos años. Pero la ley de Moore tiene un límite: la dimensión física del átomo. El enfoque de More Moore (MM), descrito en la Hoja de Ruta Tecnológica Internacional para Semiconductores (ITRS), es el desarrollo de tecnologías avanzadas CMOS para proporcionar los requisitos físicos, eléctricos y de confiabilidad para las tecnologías de memoria y lógica para sostener el escalamiento de More Moore (potencia, rendimiento, área, costo) en aplicaciones de *big data*, movilidad, procesado en la nube, internet de las cosas (IoT), etc.

More Moore se encuentra ya cerca de la limitación que supone la aproximación a las distancias atómicas, aunque todavía queda un recorrido, de unos pocos años, para llegar a una barrera que se perfila en el entorno de los nanómetros. De hecho, el transistor de un solo electrón (*single-electrón transistor*: SET) ha ganado interés con la irrupción del internet de las cosas y las aplicaciones enfocadas a la salud, donde un consumo energético ultrabajo es muy importante.

El concepto More than Moore (MtM) se introdujo en la edición de 2005 de la ITRS con el propósito de describir características tecnológicas que no se ajustan a las tendencias de miniaturización implícitas en la ley de Moore. Estas características normalmente permiten funcionalidades no digitales, como comunicación inalámbrica, administración de energía, detección y actuación. A medida que estas nuevas funcionalidades se incorporen progresivamente a los formatos *system-in-package* (SiP) y *system-on-chip* (SoC), la complejidad de los microsistemas resultantes aumentará rápidamente. Estos nanosistemas incorporan sensores y actuadoras para facilitar una interacción amplia con medios no electrónicos: fluidos, presión, temperatura, óptica y concentraciones químicas y bioquímicas, entre otros.

Este conjunto de tecnologías permite incorporar también funciones no digitales, esto es, componentes analógicos. Los dispositivos MtM proporcionan conversión no digital, así como información no electrónica, como mecánica, térmica, acústica, química, óptica y funciones biomédicas.

Los actuales transistores de semiconductores de óxido de metal complementarios (CMOS) han representado la base esencial de las tecnologías electrónicas digitales durante décadas. La reducción continua del tamaño del transistor y la mejora de sus características han conducido a mejoras significativas, pero su grado de integración tiende gradualmente a su límite.

Las tecnologías Beyond-CMOS son las tecnologías futuras de lógica digital más allá de los límites de la escala actual CMOS, que limitan la densidad y la velocidad de los dispositivos debido a los efectos del calentamiento. Se basan en un principio de funcionamiento que no se sustenta en el movimiento de carga eléctrica, ya que en ese caso se requeriría corriente y, en consecuencia, disipación de potencia, y deben proporcionar tecnologías con iguales o mejores figuras de mérito que las celdas CMOS de silicio, tales como capacidad de fabricación en masa, bajo precio y pérdidas muy reducidas.

Hacia la cuarta revolución industrial

Si bien la tercera revolución industrial tuvo su base en el desarrollo de la microelectrónica y su aplicación en controladores industriales numéricos y robots industriales, que permitían programar los procesos productivos y cambiar el programa de estos de acuerdo con los planes de producción. Los robots no tomaban decisiones, simplemente actuaban en función de un programa con el que los había programado el técnico correspondiente. Se iniciaba la era de la automatización.

En la actualidad, cincuenta años más tarde de la tercera revolución industrial, estamos ya inmersos en la cuarta revolución industrial o la revolución del conocimiento, en la que fundamentalmente las máquinas o los robots toman decisiones por sí mismos.

Si bien la tercera revolución industrial fue factible gracias al desarrollo de la microelectrónica, la cuarta revolución industrial es posible y solamente será posible gracias al desarrollo de la nanoelectrónica, con procesadores mucho más potentes; mayores capacidades de cálculo; sensores avanzados, tales como los llamados *Machine Learning Sensors*, y algoritmos inteligentes que emulan el pensamiento humano.

De esta manera, existen hoy en día múltiples ejemplos, desde los más simples a los más complejos, en los que la inteligencia humana es trasladada a una máquina que ejecuta las órdenes recibidas y puede reconfigurarlas de acuerdo con ciertos parámetros. Ejemplos como el limpiaparabrisas de un coche que se pone en marcha cuando llueve, sin intervención del conductor, es un ejemplo de un sistema ciberfísico muy simple, y la conducción autónoma es otro ejemplo, en este caso de HW y algoritmia mucho más compleja.

En resumen, si la tercera revolución industrial se basaba en la electrónica digital, fundamento de los autómatas programables con capacidad de ejecutar instrucciones programadas, la cuarta revolución se fundamenta en los sistemas ciberfísicos, que integran sensores, unidades de proceso avanzadas y algoritmos inteligentes que dotan a los sistemas de capacidad de ejecutar instrucciones programadas, así como de tomar decisiones propias en función de las características del proceso.

LA EVOLUCIÓN DE LA ELECTRÓNICA EN LA COMUNITAT VALENCIANA Y LA INFLUENCIA DE LA UNIVERSITAT DE VALÈNCIA EN SU DESARROLLO

En los años sesenta la electrónica era una gran desconocida en la Comunitat Valenciana, tanto en el ámbito académico como en el industrial. Prácticamente, la única electrónica que se hacía en aquella época era la que hacían los radioaficionados y los aficionados a los sistemas de audio.

Si comparamos ese escenario con el actual, hoy en día hay grandes empresas nacionales y multinacionales que han elegido Valencia para ubicar centros de I+D para diversificar sus negocios o sus centros de producción. Así, una

empresa alemana con más de 80.000 empleados ha implantado un centro de I+D para desarrollar sistemas de potencia para el sector de la electromovilidad; una empresa americana con más de 100.000 clientes a nivel mundial y dedicada a la microelectrónica tiene en el Parc Científic de la Universitat un centro de desarrollo de sus productos; otra empresa alemana tiene, también en el Parc Científic, un centro de I+D para el estudio de filtros para la compatibilidad electromagnética (EMC); una empresa valenciana dedicada a la electrónica de potencia y con presencia global, con sede en Lliria, ofrece soluciones innovadoras en convertidores para aplicaciones en electromovilidad, energías renovables, y una muy conocida empresa automovilística alemana va a instalar en Sagunto una megafábrica de baterías para el sector de la electromovilidad.

Y así, un largo número de empresas nacionales e internacionales que o bien tienen la electrónica como objeto de su negocio o bien necesitan la electrónica para sus productos, y que han elegido la Comunitat Valenciana como sede de sus actividades o una parte de estas.

Según algunas fuentes consultadas, una de las causas, no la única, por las que nuestra comunidad se está convirtiendo en un lugar preferencial para la industria electrónica se debe a que ofrece ingenieros electrónicos muy bien formados, especialmente para tareas de I+D, y en mi opinión la Universitat de València ha tenido un protagonismo muy importante en este aspecto, ya que ha sido cuna y pionera de muchas áreas de conocimiento. No obstante, solo me referiré a aquellas que conozco por experiencia personal. Así, la Universitat de València fue pionera en el campo de la física de partículas por iniciativa del profesor Joaquín Catalá de Alemany, de quien el autor del presente escrito tuvo el privilegio de ser alumno.

Sobre 1965, en la Facultad de Ciencias se creó la Cátedra de Electricidad y Magnetismo, y sobre 1970 la Agregaduría de Automática y Electrónica, estableciéndose, en el segundo ciclo de la carrera de Ciencias Físicas, la especialidad de Electricidad y Electrónica, con asignaturas tales como Electrónica, Automática, Teoría de Circuitos, etc., lo que situó a la Universitat de València como el germen de los estudios de electrónica, tal como se los conoce en la actualidad en la Comunitat Valenciana.

En 1976, y con la inclusión de estudios de informática, se transformó la especialidad inicial en la de Electricidad, Electrónica e Informática, y una parte del alumnado, y también del profesorado, pasó a formar parte de los cuadros docentes e investigadores de otras universidades, con lo que se extendió el germen inicial de la electrónica de 1965 a otros ámbitos.

Con la reforma de los planes de estudio motivada por la LRU de 1993, la especialidad de Electricidad, Electrónica e Informática devino en carreras completas de ingeniería, concretamente en Ingeniería Electrónica, Ingeniería Informática e Ingeniería Técnica de Telecomunicación (Sistemas Electrónicos). Con dicha reforma se remodelaron los estudios de Electrónica, incluyéndose materias referentes a la electrónica de potencia, siendo nuestra Universitat pionera, en la Comunitat Valenciana, en la impartición de este tipo de materias, que tan en boga están actualmente en empresas del sector.

En 2003 se crea la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria (ETSE-UV) para organizar mejor, aunar y proyectar los estudios y las investigaciones en las áreas de electrónica, informática e ingeniería química. En el curso 2010/11 se implantaron, en la ETSE-UV, los grados, adaptados al Espacio Europeo de Educación Superior, de Ingeniería Química, Ingeniería Electrónica Industrial, Ingeniería Electrónica de Telecomunicación, Ingeniería Telemática, Ingeniería Informática, Ingeniería Multimedia y Ciencias de Datos, todos ellos muy apreciados por el sector productivo de la Comunitat Valenciana y con índices de paro prácticamente nulos.

En 2016 vería la luz el primer Máster Oficial en Ciencia de Datos de la Comunitat Valenciana, siendo nuevamente la Universitat de València pionera en nuestro territorio en estos estudios, que junto con el Máster Oficial de Ingeniería Electrónica ofrece al alumnado un cuadro de asignaturas muy apreciadas por la industria valenciana.

Cabe indicar que el Departamento de Electrónica e Informática fue el germen del actual Instituto de Robótica y Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, fundado en 1991, y que cuenta con aproximadamente cincuenta investigadores que realizan actividades de investigación en los campos de la telemática para tráfico y transporte, gráficos por computador y realidad virtual, servicios de red y seguridad informática, entre otros.

Otro aspecto que deseo destacar es la adaptación de los estudios del grado de Ingeniería Electrónica a las necesidades de formación de la sociedad valenciana. Dicha transformación ha sido una constante desde las asignaturas iniciales en 1965 hasta nuestros días, con asignaturas en la actualidad tales como Automatización Industrial, Ciencias de Materiales, Medio Ambiente y Sostenibilidad, Máquinas Eléctricas, Termodinámica y Transmisión del Calor, Energías Renovables, Aplicaciones Industriales, Sensores e Instrumentación Virtual, Sistemas Integrados en Telecomunicaciones, Sistemas Electrónicos Multimedia, etc.

La investigación es otro de los aspectos fundamentales en la ETSE-UV. Sistemas inteligentes aplicados al tráfico, reconocimiento de patrones y de procesado de señales de imágenes –incluyendo dispositivos y arquitecturas HW–, investigación en sistemas y entornos virtuales distribuidos, procesado de señales e imágenes –incluyendo el desarrollo de algoritmos de aprendizaje automático–, *big data*, inteligencia artificial, sistemas expertos, caracterización de componentes electrónicos de potencia, sistemas de instrumentación, etc., son algunas de las áreas de investigación referidas a la ingeniería electrónica y la ingeniería informática que se realizan en la ETSE-UV.

Por otra parte, la Universitat de València es muy activa en actividades de investigación en electrónica, habiendo participado en un número considerable de proyectos de I+D con financiación regional, nacional o europea, y habiendo formalizado, desde 1990, un buen número de contratos de I+D con empresas del sector electrónico, fortaleciéndose así la relación entre la universidad y la empresa.

Es importante mencionar también que el Departamento de Ingeniería Electrónica de la ETSE-UV mantiene, desde los años noventa, relaciones con grandes organismos de investigación, tales como la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN), y que asimismo forma parte de consorcio VAL-SPACE, con un laboratorio para la investigación de materiales de alta potencia para el espacio.

Todo ello ha llevado a que la edición del año 2022 del ranking de Shanghái otorgue a la Universitat de València la primera posición de la Comunitat Valenciana en las materias de ingeniería eléctrica y electrónica.

Como resumen se ha de indicar que, desde aproximadamente 1970, la Universitat de València ha sabido responder, en el terreno de la electrónica, a las demandas de formación e investigación requeridas por los avances tecnológicos y las necesidades de la industria valenciana, formando a físicos e ingenieros, en el área de la electrónica, que han contribuido a las actividades de las empresas del sector, en especial en tareas de I+D. Todo ello, junto con las capacidades de investigación del Departamento de Ingeniería Electrónica de la ETSE-UV, ha favorecido, a mi criterio, el desarrollo de la electrónica y el establecimiento de empresas del sector en la Comunitat Valenciana.

EL FUTURO DE LA INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Ofreceré a continuación una visión personal del futuro de la ingeniería electrónica, su conexión con los actuales retos tecnológicos de la sociedad, su vinculación con la cuarta revolución industrial y las necesidades futuras de formación e investigación.

Cabe decir en este punto que la ingeniería es una disciplina que transforma el conocimiento científico en conocimiento aplicado para dar soluciones a retos económicos, tecnológicos e industriales de la sociedad.

Los retos tecnológicos de la sociedad en la actualidad vinculados con la electrónica

Incremento de la población. En el año 2000 la población mundial era de 6.000 millones de habitantes; la previsión para 2050 es de unos 10.000 millones, concentrados mayoritariamente en megaciudades de más de 30 millones de habitantes. Los sistemas ciberfísicos, la inteligencia artificial y la electrónica de potencia son actores muy importantes para conseguir los objetivos del cambio demográfico en el futuro, a través de las llamadas ciudades inteligentes o *smartcities*.

La *smartcity* va a ser un concepto que revolucionará la forma en la que vemos y vivimos la vida urbana. Las redes 5G y los avances informáticos de vanguardia marcarán el comienzo de una nueva era para las ciudades, con plataformas digitales integradas que combinarán servicios, energía, movilidad, etc., con el fin de mejorar la calidad de vida y reducir los costes de energía y el impacto ambiental.

Iluminación regulada para mejorar la eficiencia energética, tarjetas inteligentes para el ciudadano, sistemas de movilidad sostenible, tráfico inteligente, gestión eficiente de los residuos y suministro inteligente del agua y de la energía son algunas de las aplicaciones que pueden englobarse en una *smartcity*.

Descarbonización del medio ambiente. En el año 2000 las emisiones de CO₂ a la atmósfera eran de 22 Gt, en 2050 se prevé una emisión de 55 Gt. Nuevos sistemas productivos más eficientes y sostenibles, así como nuevos conceptos de transporte de personas y mercancías, contribuirán a dar soluciones al presente reto.

La Unión Europea pretende ser neutra en términos climáticos de cara al año 2050. Es decir, se ha fijado el objetivo de tener una economía con cero emisiones netas de gases de efecto invernadero. Esta meta constituye el núcleo del Acuerdo Verde Europeo y está en línea con el compromiso comunitario de aumentar la acción climática global, en concordancia con los compromisos del Acuerdo de París.

La energía renovable, un transporte más limpio-verde o los edificios energéticamente eficientes están en el centro de las tendencias en tecnología limpia. A medida que caigan los costes asociados a la tecnología limpia, su uso se volverá más generalizado e irrumpirá en un número creciente de industrias.

El uso de la tecnología de motores eléctricos de plasma implementada en los futuros aviones comerciales podría ser clave para descarbonizar la aviación comercial, ya que permitirá que los aviones funcionen únicamente con electricidad, prescindiendo de combustibles contaminantes.

Movilidad sostenible. El número de vehículos en el año 2000 era de 1.000 millones; se prevé que en 2050 sea de 3.000 millones. La movilidad, y en general el transporte basado en los motores de explosión, es una de las causas

fundamentales del calentamiento global debido a la emisión de CO₂, así como de partículas tóxicas NO_x, que repercuten en la salud de las personas. Una movilidad basada en tracción eléctrica será fundamental para el desplazamiento de personas y mercancías, especialmente en megaurbes. Serán imprescindibles nuevos sistemas de almacenamiento de energía y sistemas de potencia más eficientes y de menor tamaño y peso para el desarrollo de este tipo de movilidad, unido a una infraestructura inteligente de recarga eléctrica de vehículos eléctricos.

Suministro eléctrico ininterrumpido y sostenible. En el año 2000 el consumo mundial de electricidad se cifraba en 15.000 TWh; la previsión para 2050 es de 54.000 TWh. Por otra parte, en la actualidad, más del 70 % de los recursos naturales de energía están concentrados en unos pocos países. El sistema eléctrico actual de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica sufrirá cambios muy importantes. Son las llamadas *smartgrid*, *supergrid* o «internet de la energía eléctrica», en la que todos los actores ligados a la generación, transmisión, distribución y almacenamiento de energía eléctrica estarán conectados.

El almacenamiento eficiente de energía va a ser un pilar fundamental porque permitirá flexibilizar la producción de energía renovable, garantizar su integración en el sistema y apoyar la electrificación. En este sentido, los algoritmos, como el V2G (*Vehicle to Grid*), jugarán un papel fundamental para ofrecer una mayor flexibilidad a la red eléctrica, abrir el campo para la creación de nuevos servicios de planificación y operación, establecer esquemas de respuesta a la demanda y promover la integración de sistemas de almacenamiento de energía y renovables.

La cuarta revolución industrial y las tecnologías básicas de la electrónica del futuro

Si la tercera revolución industrial, iniciada hacia 1970, fue debida a la automatización de los procesos productivos, incluyendo el uso de robots programables, la cuarta revolución industrial, ahora en sus albores, es la *revolución del conocimiento*, conducido en una parte importante por la ingeniería electrónica e informática.

Desde el punto de vista puramente electrónico, la cuarta revolución industrial es la etapa de la inteligencia artificial, es decir, la etapa de la transformación del conocimiento humano a SW, a través de los llamados sistemas ciberfísicos, constituidos por sensores que envían información a procesadores dotados de algoritmos inteligentes que controlan los procesos y los procesos en sí afectan a los algoritmos, estando los componentes HW, *firmware* y SW profundamente entrelazados. A continuación describimos algunas de las tecnologías habilitadoras de la electrónica del futuro.

Materiales y semiconductores de última generación

Los avances en la ciencia de los materiales tienen el potencial de transformar múltiples sectores del mercado, incluidos el farmacéutico, el energético, el de transporte, el sanitario, el de los semiconductores y el industrial. Dichos materiales incluyen el grafeno, una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una configuración de red de panal, que es unas doscientas veces más resistente que el acero, a pesar de su increíble delgadez. Es un conductor muy eficiente y promete revolucionar el rendimiento de los semiconductores. Otro material es el disulfuro de molibdeno, cuyas nanopartículas ya se están utilizando en la electrónica flexible. Los chips de tecnología nanométrica y los chips fotónicos sobre silicio serán asimismo el soporte HW de los sistemas ciberfísicos inteligentes.

A título de ejemplo, China está invirtiendo cantidades ingentes de dinero para desarrollar semiconductores avanzados y, en especial, en el desarrollo generalizado de los chips fotónicos de silicio para su uso en la transmisión de datos a gran escala con muy alta velocidad en los centros de datos, así como para la investigación en otros materiales del futuro, como el estaneno, material que tiene un potencial enorme en el campo de la electrónica debido a su superconductividad y a su capacidad para aislar el calor, y las llamadas tierras raras, para la fabricación de coches eléctricos, bicicletas o patinetes, que requieren motores de poco volumen y peso y con un altísimo rendimiento. Las energías renovables también dependen de las tierras raras.

Inteligencia artificial

La inteligencia artificial (IA) es una de las mayores tendencias tecnológicas del futuro. La próxima generación de tecnologías de IA promete comprender las emociones y las intenciones humanas. A medida que la tecnología se vuelva más sofisticada, se aplicará para desarrollar aún más herramientas basadas en tecnología.

Esta tendencia tiene los niveles más altos de aplicabilidad para la industria automotriz. Los algoritmos de IA entrenarán a las máquinas para que reconozcan mejor los patrones y ejecuten una acción en consecuencia. La conducción autónoma es un claro ejemplo del uso de la IA como ayuda en la conducción de vehículos y flotas.

Así, la IA y las comunicaciones ultrarrápidas, como la tecnología 5G, jugarán un papel fundamental en la consecución de objetivos tales como la descarbonización, la movilidad sostenible, la reducción de la dependencia energética, el cambio demográfico, las necesidades de electricidad, un mundo más conectado, etc.

El internet de las cosas

El internet de las cosas (IoT) será otro de los pilares de la nueva sociedad para la mejora sustancial y el aprovechamiento óptimo de recursos. Así, por ejemplo, actualmente los sistemas de tráfico (semáforos) son autómatas que, con independencia de las condiciones de tráfico, de personas, etc., realizan una secuencia programada de acciones. Mediante la interconexión de vehículos, personas, sistema de navegación, semáforos y otros actores del tránsito rodado se optimizará la circulación, con los consiguientes ahorros energéticos y la menor emisión de gases contaminantes.

Computación cuántica

Los ordenadores cuánticos, mucho más rápidos y con mayor capacidad de cálculo y de almacenamiento, serán necesarios para multitud de aplicaciones futuras que conlleven el procesamiento de cantidades ingentes de información. Por ejemplo, se necesitarán en soluciones avanzadas, a nivel molecular, en la industria farmacéutica o en el desarrollo de químicas más eficientes para las baterías de vehículos eléctricos.

A título de ejemplo, hoy en día ya existe un prototipo de ordenador cuántico desarrollado en China bajo la dirección del físico cuántico Jian-Wei Pan, de la Universidad de Pekín. Funciona con fotones y es capaz de calcular en un milisegundo tareas que el ordenador convencional más rápido del mundo tardaría unos treinta mil millones de años en realizar.

Electrónica de potencia avanzada

Los convertidores de potencia de altísima eficiencia y de reducido tamaño y peso serán totalmente necesarios para su aplicación en sistemas de alimentación en grandes centros de cálculo, movilidad eléctrica, sistemas de transporte ferroviario, electrónica espacial, etc.

Los semiconductores de potencia de cuarta generación, como el diamante o el dióxido de vanadio, serán los próximos materiales semiconductores base de los sistemas de potencia, los cuales permitirán altísimas eficiencias, del orden del 99,5 %, y densidades de potencia superiores a 200 kW/litro.

Ciencia de datos y *big data*

La ciencia de datos es la disciplina que reúne todo el trabajo de análisis sobre conjuntos de datos y que precisa de una cantidad considerable de habilidades en programación, en ingeniería y en manejo de *software*, así como de amplios cono-

cimientos en matemáticas, estadística e informática. La resolución de problemas mediante ciencia de datos conlleva una serie de etapas tales como el entendimiento de los datos, la extracción de sus propiedades, el modelado y análisis del problema, la presentación de resultados y el desarrollo de *software* para analizar el conocimiento extraído. La ciencia de datos proporciona las herramientas para tratar con los *big data* y su uso será imprescindible en aplicaciones tales como el marketing digital y la segmentación de clientes, los sectores bancario y gubernamental, la logística, el control de *stocks*, la salud pública, la investigación científica, las ciudades y las redes eléctricas inteligentes, el tráfico, etc.

Una visión de los sectores vinculados con la ingeniería electrónica del futuro

Todas las tecnologías citadas anteriormente son algunas de las tecnologías necesarias para los sectores vinculados con la ingeniería electrónica. Así, en el *sector de la energía*, y de acuerdo con un estudio de la Unión Europea, un incremento en la eficiencia energética del 20 % implicaría no importar 2.600 millones de barriles de petróleo cada año.

Por poner un ejemplo de nueva fuente de energía, la iniciativa inglesa UK Space Energy Initiative persigue desarrollar, mediante una tecnología disruptiva, una planta de energía solar en el espacio que sea capaz de enviar de forma inalámbrica, mediante microondas, a través de amplificadores de potencia de radiofrecuencia de estado sólido, que transmiten en un haz de microondas coherente, gigavatios de potencia a la Tierra.

Por otra parte, China ha presentado un plan de cinco años, de 2021 a 2025, para el desarrollo de tecnologías de energía que impulsen el crecimiento verde a través de fuentes de energía avanzadas, tales como eólica, solar, hidroeléctrica, nuclear y de biocombustibles.

La *industria manufacturera* del futuro sufrirá cambios muy importantes con el fin de aumentar su competitividad gracias a los sistemas de IA, que permitirán líneas de ensamblaje de «automatización flexible» habilitadas por

sensores inteligentes. El proceso de fabricación no solo estará completamente automatizado, sino que también se ajustará dinámicamente para reconfigurar las máquinas, los requisitos de procesamiento y los materiales, adaptando su producción a los pedidos *online* existentes.

Las cadenas de producción serán autoconfigurables sobre la base de las necesidades de producción, aumentando en consecuencia la productividad y reduciendo los costes. El uso de actuadores reconfigurables e inteligentes constituirá la base de dicha transformación, que será solamente posible con circuitos electrónicos basados en tecnologías nanoelectrónicas, anteriormente descritas, con unas capacidades de cálculo inimaginables en la actualidad.

Así, la finalidad de la iniciativa alemana Industry 4.0 es la mejora de la productividad, de la calidad de los procesos, del ahorro energético y de materias primas y de la seguridad de los trabajadores, por la realización de las tareas peligrosas por «cobots» (robots inteligentes que interactúan con humanos en un entorno colaborativo de trabajo).

Para ello, el objetivo de la iniciativa Industry 4.0 es que todas las empresas manufactureras por encima de un cierto tamaño sean autoconfigurables de acuerdo con las necesidades de producción ajustada a pedidos, y en las que maquinaria y «cobots» tomen decisiones por sí mismos, interactúen con los operarios y estén interconectados mediante procesado en la nube, internet industrial de las cosas y *big data*.

Respecto al *sector transporte*, y con el objetivo de reducir la emisión de gases contaminantes y la dependencia energética del petróleo, será fundamental la movilidad basada en nuevas fuentes de energía y en la conducción autónoma para el desplazamiento terrestre, aéreo y marítimo, tanto de personas como de mercancías.

Materiales como el silicio, el carburo de silicio, el grafito o el litio están llamados a jugar un papel fundamental para conseguir baterías más pequeñas y ligeras y con cada vez mayor capacidad de almacenaje de energía. Por otro lado, la recarga de las baterías de los vehículos eléctricos tendrá un impacto técnico y económico en el sistema eléctrico, y el desarrollo de los centros de recarga será vital para la implantación de la electromovilidad a nivel global.

La integración del vehículo en una *smart grid* será otro de los retos venideros, por lo que la tecnología bidireccional de «vehículo a la red», más conocida como V2G, será otro de los desafíos para hacer posible que los vehículos eléctricos puedan devolver a la red la energía que acumulan en sus baterías.

Taxis, autobuses y transportes de mercancías con tracción eléctrica, nuevas fuentes de energía y vehículos sin conductor ya empiezan a probarse, e investigadores del Instituto de Fotónica y Nanotecnologías del CNR italiano y del Politécnico de Milán han construido un prototipo de batería cuántica para vehículos eléctricos que es capaz de ser cargada en solo unos segundos, en vez de en 30 minutos. En el transporte aéreo, China ha completado con éxito un prototipo de avión de carga no tripulado, propulsado por hidrógeno y que contiene las tecnologías básicas para la aviación comercial del futuro.

En el transporte marítimo el Zhi Fei es un prototipo de barco contenedor autónomo que dispone de conducción tripulada, conducción remota y conducción no tripulada. Esta versatilidad de navegación le permite realizar la percepción inteligente del entorno de navegación, la planificación de rutas independientes, la prevención inteligente de colisiones y la conducción por control remoto.

Otro de los objetivos de China es un sistema de transporte ferroviario ultramoderno. El prototipo ART-1 es un tren que no necesita conductor ni raíles y que promete revolucionar el sistema de transporte ferroviario de mercancías y pasajeros. Se trata de un tren de última generación que utiliza una red de sensores en lugar de raíles tradicionales y posee tecnología de conducción autónoma, monitorizando las dimensiones de la carretera y trazando su propia ruta en lugar de emplear vías físicas.

Con referencia al *sector espacial*, dominar el espacio y los satélites es y será de gran importancia en actividades civiles y militares, como comunicaciones, navegación, transmisión de datos, misiones científicas, etc. Así, los sistemas de propulsión espacial de tecnología iónica, propuesta en 1929 por el físico Hermann Oberth en su obra *Die Rakete zu den Planetenräumen*, con fuente de energía nuclear, son las alternativas a los motores de los satélites actuales, y permitirían llegar a Marte en un tiempo récord: solo 39 días.

La formación e innovación en la electrónica del futuro

Ante el desafío tecnológico venidero, mucho más rápido, competitivo y agresivo que en anteriores revoluciones industriales, el desarrollo del conocimiento científico y del aplicado debería ser una máxima de cualquier economía para no perder el tren de la evolución y la revolución tecnológica de las próximas décadas.

En el ámbito formativo es importante planificar una educación con una fuerte carga teórica, pero a su vez con la visión de su aplicabilidad en tecnologías de futuro tales como los sistemas ciberfísicos, la inteligencia artificial, el *big data*, los sensores inteligentes, los sistemas para la fabricación autoconfigurables, los *cobots*, los sistemas de potencia de altísimo rendimiento, etc.

Así mismo, no habría que olvidar las tecnologías que se encuentran en la frontera de lo ignoto, como la ingeniería biomimética, estudios consistentes en la observación de los sistemas y los elementos de la naturaleza para su comprensión, emulación e implementación mediante sistemas nanoelectrónicos.

Desde el punto de vista de la organización de la innovación, describiré cómo dos economías representativas y de concepción histórica distinta organizan la innovación tecnológica.

Alemania, una economía tradicional, consolidada y basada en el conocimiento, y que cuenta con una vasta red de centros de educación superior, una fuerte investigación industrial y cuatro reconocidas instituciones de investigación extrauniversitaria, organiza la innovación a través de planes estratégicos transversales de I+D a largo plazo impulsados y liderados por la industria, y articulados a través de redes sectoriales específicas de innovación, siendo definidos, de una forma coordinada, por la administración, las universidades, las instituciones de investigación y las empresas.

China, una economía emergente, tremendamente pujante y altamente competitiva, se ha marcado, a través del Plan Made in China, situarse en el año 2049 como primera potencia mundial en conocimiento aplicado, y para ello organiza el desarrollo tecnológico a través de megaáreas de innovación, las llamadas zonas económicas especiales, que concentran el conocimiento y la innovación por áreas específicas, integrando a universidades, investigadores,

institutos de investigación, *start-ups* e industrias clave, para lograr un tejido industrial altamente innovador y competitivo.

Así, y con referencia a la electrónica, la región de Shenzhen concentra la industria electrónica, la región de Shanghai está especializada en diseño de chips y sensores avanzados, la zona de Pekín en baterías e investigación aeroespacial, etc.

Y ante la revolución tecnológica futura, se vuelve más de actualidad la conocida frase, de en torno a 1850, del genio alemán Goethe: «Saber no es suficiente, hay que aplicarlo».

Agradecimientos

Permítaseme acabar esta lección magistral con un comentario personal: en septiembre de 1972 di mi primera lección en esta, mi universidad, y justo cincuenta años más tarde, en septiembre de 2022, acabo de dar mi última lección. Quisiera expresar en este momento mi más sincero agradecimiento a la dirección de la ETSE por haberme propuesto para impartir esta lección magistral y a los órganos de gobierno de la Universitat de València por su aceptación.

Muchas gracias,
Moltes gràcies

BIBLIOGRAFÍA

- GRAEF, Mart: «Positioning More Than Moore Characterization Needs and Methods within the 2011 ITRS», *Frontiers of Characterization and Metrology for Nanoelectronics* 1395 (1). DOI: 10.1063/1.3657913.
- IBÁÑEZ DE ALDECOA, Juan Miguel: «Micro y nanoelectrónica: aspectos básicos de una de las seis tecnologías habilitadoras clave desde un punto de vista técnico y económico», *Economía Industrial* 409.
- KLOSS, Albert (1987): *Von der Elektrizität zur Elektrizität*, Basilea, Birkhäuser Verlag.
- MARTÍNEZ CORTÉS, José Ignacio: «VI Simposio Electrónico Internacional. China 2050: Base 2030», en línea: <www.politica-china.org>.
- PATURI, Felix R. (1988): *Chronik der Technik*, Dortmund, Chronik Verlag.
- VALENCIA GARCÍA, Alejandro (2021): *El plan Made in China 2025: Desarrollo de industrias 4.0 en China y sus impactos en las relaciones políticas y económicas con sus principales socios comerciales*, trabajo fin de grado, Facultad de Ciencias Humanas y Sociales, Universidad Pontificia de Comillas.
- VOLKMANN, Peter (1990): *“Technikpioniere”: Namensgeber von Einheiten physikalischen Grössen*, Berlín / Offenbach, VDE Verlag.
- WORLD ECONOMIC FORUM (2021): «Top 10 tech trends that will shape the coming decade, according to McKinsey», en línea: <<https://www.weforum.org/agenda/2021/10/technology-trends-top-10-mckinsey/>>.

RECURSOS ELECTRÓNICOS

- <https://www.europapress.es/ciencia/laboratorio/noticia-china-presenta-computadora-cuantica-10000-millones-veces-mas-rapida-20211026114927.html>
- https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-05-15/planta-de-energia-solar-espacio-2035_3424467/
- https://www.hosteltur.com/127645_china-prueba-un-avion-con-hidrogeno-y-sin-piloto.html

<https://www.europapress.es/ciencia/laboratorio/noticia-china-presenta-computadora-cuantica-10000-millones-veces-mas-rapida-20211026114927.html>

https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2021-06-04/china-motor-iones-space-x-elon-musk_3115251/

<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/china-muestra-prototipo-motor-electrico-plasma-aviones-comerciales/20220601201841058635.html>

<https://www.infinitiaresearch.com/noticias/materiales-del-futuro-ciencia/>

<https://www.caranddriver.com/es/estilo-de-vida/a30297440/china-tren-autonomo-sin-railes/>

<https://www.xataka.com/otros/china-lanza-primer-buque-teledirigido-autonomo-mundo-para-transportar-drones-zhu-hai-yun>

https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2022-05-26/barco-tecnologia-china-mar-misiones-militares_3431279/

https://www.vozpopuli.com/next/material-revolucionario-futuro-ciencia-ficcion_0_1106590118.html

<https://www.weforum.org/agenda/2021/10/technology-trends-top-10-mckinsey/>

<https://www.mckinsey.com/-/media/mckinsey/Business%20Functions/McKinsey%20Digital/Our%20Insights/The%20top%20trends%20in%20tech%20final/Top-trends-in-tech-executive-summary-6-24-21>

<https://mexicobusiness.news/automotive/news/mckinseys-top-trends-tech-influencing-automotive-part-i>

<https://mexicobusiness.news/automotive/news/mckinseys-top-trends-tech-influencing-automotive-part-ii>

<https://europeansting.com/2021/10/13/these-are-the-top-10-tech-trends-that-will-shape-the-coming-decade-according-to-mckinsey/>

LECCIONES



MAGISTRALES

VNIVERSITAT
® VALÈNCIA