

XXXIV UNIVERSITAT D'ESTIU D'ANDORRA  
DEL 4 AL 7 DE SETEMBRE DEL 2017

*Sessió del 4 de setembre del 2017*

**TECNOLOGÍA Y CIENCIA,  
MOTORES DE LA HISTORIA DE LA HUMANIDAD**

**José Manuel Sánchez Ron**

Doctor en física i catedràtic d'història de la ciència,  
Universitat Autònoma de Madrid

Doctor en física y catedrático de historia de la ciencia,  
Universidad Autónoma de Madrid

Docteur en physique et professeur des universités en histoire de la science,  
Université Autonome de Madrid

**Per citar aquest article / Para citar este artículo / Pour citer cet article :**

SÁNCHEZ RON, José Manuel. «Tecnologia i ciència, motors de la història de la humanitat» [en línia], a: Universitat d'Estiu d'Andorra (34a : 4 - 7 set., 2017 : Andorra la Vella). *Tecnologia i humanitat, llums i ombres = Tecnología y humanidad, luces y sombras = Technologie et humanité, lumières et ombres*. Andorra: Govern d'Andorra. Ministeri d'Educació i Ensenyament Superior. Universitat d'Estiu d'Andorra, 2018, p. 14-31 (978-99920-0-857-7) <<http://www.universitates-tiu.ad/UEA2017>>

## Ciencia *versus* tecnología

La ciencia es considerada, con más que buenas razones, una de las grandes conquistas de la humanidad; «conquistas» o, tal vez mejor, «atributos» de nuestra especie, *Homo sapiens*. La capacidad de identificar patrones (leyes) en el comportamiento de los fenómenos naturales, así como de descubrir facetas de la naturaleza que no se encuentran al alcance directo de nuestros sentidos, constituye una habilidad que nos distingue claramente de cualquier otra especie existente y, dado que no tuvieron tiempo suficiente para desarrollar semejante habilidad, de los homínidos que nos precedieron o con los que durante algún tiempo compartimos nicho terrestre, es el caso de los neandertales. Consecuentemente, la historia de la ciencia posee un, digamos, *glamour* del que carece la historia de la tecnología. Más aún, para muchos es correcta la siguiente ecuación: «Primero es la ciencia, que, cuando se aplica, se convierte en tecnología». Una ecuación que significa: «Es la investigación “básica” la que debe tener preeminencia, a la que debemos dedicar la mayor parte de nuestros recursos, que luego ya vendrá su aplicación, la tecnología, que es la que proporciona riqueza y poder». No niego que, desde hace aproximadamente un siglo y medio, haya mucho de razón en tal ecuación, aunque desde luego no toda la razón. Pensemos en un único ejemplo: los túneles de viento, instrumentos imprescindibles a la hora de estudiar el comportamiento frente a corrientes de aire de aviones, vehículos de todo tipo, puentes y un sinnúmero de objetos. La razón por la que son necesarios es porque el análisis teórico es insuficiente debido, principalmente, a la aparición de fenómenos no lineales, como las turbulencias, para los que no se pueden encontrar soluciones exactas de las ecuaciones que describen sus comportamientos.

De hecho, no siempre es posible distinguir de forma clara entre ciencia y técnica. Podemos encontrar numerosos ejemplos de inventores que produjeron artilugios tecnológicos sin necesitar o sin disponer de conocimientos científicos avanzados, teorías que los orientasen y diesen algún tipo de seguridad. La guía para estos fue más la imaginación, la habilidad manual así como el método de prueba y error. Poco podía saber, por ejemplo, Thomas Savery, el constructor de la primera máquina de vapor utilizable (patentada en 1699), de la ciencia que estudia, que explica, los intercambios de calor —la termodinámica—, por la sencilla razón que esta disciplina no existía; muy al contrario, uno de los gérmenes de los que surgió la termodinámica fue la observación

del funcionamiento de las máquinas de calor existentes. En este caso, se puede decir que la ciencia «aplicada» precedió a la «teórica». Buena prueba de lo que estoy diciendo se encuentra en el que se puede considerar el texto fundacional de la termodinámica, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (*Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia*; 1824), debido a un joven francés, estudiante de la prestigiosa École Polytechnique, Sadi Carnot. Prácticamente en las primeras líneas de este escrito, Carnot explicaba que para saber «si la potencia motriz es limitada, o si no tiene límites; si los perfeccionamientos posibles de las máquinas de fuego tienen un término prefijado, que la misma naturaleza de las cosas impide sobrepasar por cualquier medio que sea, o si, por el contrario, esos perfeccionamientos son susceptibles de una extensión indefinida», había que entender las raíces de su funcionamiento; esto es, la física subyacente.

Otro ejemplo que muestra la compleja relación entre ciencia y tecnología es el de las comunicaciones electromagnéticas. El primer tipo de esta clase de sistema de comunicaciones fue la telegrafía, primero terrestre y luego submarina. La pregunta es: ¿Hubo que esperar a disponer de un sistema teórico acabado que explicase los fenómenos electromagnéticos, es decir, a disponer de la electrodinámica desarrollada por el físico escocés James Clerk Maxwell en la década de 1860? La respuesta es que no. Las aplicaciones de la electricidad y el magnetismo ya se abrían camino, con fuerza creciente, en la década de 1840, cuando Maxwell ni siquiera se había graduado en Cambridge (lo hizo en 1854). En este sentido, tampoco se puede decir en este caso que el conocimiento científico guiase al práctico, que la ciencia *pura* precediese a la *aplicada*. El punto de partida real del desarrollo de la telegrafía fue más bien el descubrimiento importante, pero limitado y que no se basaba en ningún conocimiento teórico: el realizado en 1820 por el danés Hans Christian Oersted de que la electricidad producía efectos magnéticos (la variación de la corriente eléctrica que circulaba por un hilo conductor desviaba la aguja imantada de una brújula), deudor a su vez de un aparentemente humilde invento, pero de importancia descomunal, la pila que producía corriente continua que el físico italiano Alessandro Volta construyó en 1800.

Con frecuencia se exagera la importancia de la ciencia, argumentando que los avances científicos se encuentran detrás de los grandes cambios tecnológicos,

cuando lo único seguro es que la ciencia dicta los límites de las posibilidades físicas de un artefacto, pero no determina su forma final ni provoca necesariamente su creación y desarrollo. Más aún, cuando se estudia la historia de la humanidad, lo que nos encontramos es que durante la mayor parte de ella el motor de cambio de esa historia fue la tecnología, no la ciencia. Para sustanciar esta afirmación, les ofreceré una —sin duda incompleta y desde luego muy sucinta— reconstrucción de algunos momentos «tecnológicos» fundamentales en la historia de la humanidad.

## Tecnología lítica y homínidos

¿Cuál es el objeto tecnológico más antiguo del que tenemos noticia? La respuesta es «algunos tipos de piedras». En la garganta de Olduvai, al este de la llanura del Serengeti, en el norte de Tanzania, se han encontrado utensilios de piedra de 3,3 millones de años de antigüedad, «herramientas» fabricadas con, especialmente, sílex ( $\text{SiO}_2$ , también llamado pedernal), cuarzo u obsidiana (o vidrio volcánico). Sería posible pensar que antes de la piedra se habían utilizado instrumentos de madera, que no nos habrían llegado al haber eliminado sus restos el paso del tiempo. Sin embargo, la mayor parte de los arqueólogos y antropólogos piensan que la piedra debió preceder a la madera, por la sencilla razón de que se necesitan herramientas tan cortantes y duras como las de piedra para preparar, por ejemplo, las puntas de varas de madera, una de las producciones más elementales en las que cabe pensar como pioneras de la tecnología en madera.

Por supuesto, la datación de esos instrumentos líticos implica que se utilizaron cuando no había aparecido la especie *Homo sapiens*, por lo que debemos concluir que la tecnología es anterior incluso a nuestra especie. Fue un logro de alguna de las variedades de homínidos, la familia *Hominidae*, que agrupa, además de a los primates bípedos, a los grandes simios: gorilas, chimpancés y orangutanes. Se han encontrado fósiles de homínidos en diversos lugares de Europa, África y Asia que pertenecen al Mioceno, era geológica que abarca desde hace unos 23 millones de años hasta 5, durante la cual el clima de África se hizo más frío y seco, con la consecuencia de que aparecieron extensas sabanas entre los bosques antes dominantes. Semejante entorno favoreció a las especies que desarrollaron el bipedalismo, que les permitía desplazarse en

esas llanuras, donde, además, podían encontrar alimentos que no se daban en los bosques. Y manos libres, que no se necesitaban para andar, permitieron transportar herramientas como las que se encontraron en la garganta de Olduvai y que continuaron siendo utilizadas durante unos dos millones de años.

Una pregunta interesante es la de las ventajas que aportaba aquella tecnología rudimentaria y primitiva. El primer elemento para poder sobrevivir es, obviamente, alimentarse, y la tecnología lítica lo facilitó a los homínidos bípedos. Pudo hacerlo de dos maneras: para cazar o para actuar como carroñeros. En lo que a los grandes animales se refiere, no está nada claro que se utilizasen pronto instrumentos de piedra del tipo de los encontrados en Olduvai para cazarlos, al fin y al cabo los homínidos eran demasiado pequeños, aun teniendo en cuenta que actuasen en grupos. Únicamente se dispone de evidencias firmes de lanzas con puntas de piedras de hace unos 300 000 años, algo que, desde luego, constituye un importante avance tecnológico. Pero aunque no las utilizasen para cazar, sí pudieron —sin duda lo hicieron— utilizarlas para mejorar sus posibilidades como carroñeros en los despojos de los cadáveres de animales que otros animales habían matado. Las piedras afiladas les permitirían hacer lo que su constitución física les impedía: no tenían dientes lo suficientemente fuertes para romper los huesos y extraer su medula, o para separar la escasa carne que habrían dejado los grandes animales que habían cazado al animal muerto. Si contemplamos todo esto bajo el prisma de la evolución darwiniana, de la supervivencia de los más aptos, podemos pensar que, si no se hubiese dispuesto de la tecnología lítica, tarde o temprano podría haber surgido una especie de homínidos con la dentadura adecuada para hacer lo mismo que hicieron aquellos primitivos homínidos existentes hicieron con sus toscas herramientas de piedra; al fin y al cabo, ¿no es esto, en otra dimensión, lo que sucedió con los pájaros pinzones que se encontró Darwin en el archipiélago de las Galápagos? En unas islas habían evolucionado de una especie ancestral desarrollando picos gordos para poder romper la dura cáscara de los frutos de los que se alimentaban, y en otras, por el contrario, picos delgados y afilados porque los frutos eran diferentes, de cáscara más débil. Podemos decir, en consecuencia, que la tecnología lítica permitió dar un salto en la evolución o, en un sentido metafórico, que la tecnología lítica contribuyó a la evolución y supervivencia de los homínidos; que permitió que sobreviviera una especie que carecía de algunas características físicas básicas en la lucha por la supervivencia. Por otra parte, no olvidemos las ventajas que

tiene poder acceder a fuentes de alimentación tan nutritivas como la carne. El cerebro, y su tamaño, capacidad craneal, constituye una de las diferencias entre los *Homo sapiens* y otros homínidos. Los primeros *Homo* tenían un cerebro un 30 por ciento mayor que el de los australopitecus, y el de los últimos *Homo*, nosotros, surgidos hace unos 160 000 años, un 20 por ciento mayor que el de los primeros. Y en cuanto a consumo energético, recordemos que, aunque ocupa el 2,5 por ciento del peso de un cuerpo, el cerebro consume el 20 por ciento de la energía con la que funciona ese cuerpo. Si unimos este hecho a lo dicho antes, la conclusión es que las herramientas líticas favorecieron especialmente a los *Homo sapiens*, los que poseían un cerebro que necesitaba mayor consumo energético.

## **Agricultura, ganadería y civilización**

Los útiles líticos utilizados por los *Homo sapiens* les sirvieron sobre todo para cazar, pero sabemos muy bien que un momento trascendental en la historia de la humanidad fue cuando se inventó la agricultura, un descubrimiento que reúne las condiciones necesarias para considerarlo una tecnología: no implicó conocimientos científicos —entonces la propia idea de ciencia todavía no existía— y surgió, como muchos otros inventos, mediante un proceso de prueba y error y observación de la naturaleza.

La revolución que produjeron la agricultura y la ganadería, otro invento fundamental, aunque seguramente algo posterior a la agricultura (se benefició de la existencia de productos y restos agrícolas), comenzó en torno a los 9 000 años a. C. Gracias a estos avances aumentó la producción de alimentos y se multiplicó la población. Disponer de recursos agrícolas y ganaderos terminó conduciendo a asentamientos humanos de tamaño y posibilidades cada vez mayores, un proceso que, a su vez, introdujo la división del trabajo, conduciendo finalmente a la «ciudad-Estado», uno de los descubrimientos determinantes para la historia de la humanidad. Jericó, la ciudad más antigua de las conocidas, se levantó unos 7 000 años a. C., y a partir del 5500 a. C. se generalizó el nuevo estilo de vida, en el que la agricultura y la ganadería desempeñaban papeles centrales. La ciudad-Estado, un centro de poder con complejas estructuras administrativas, permitió que se almacenasen excedentes que se podían conservar, y esto indujo a la aparición de grupos dispensados

de las tareas en las que en el pasado se centraba la actividad de prácticamente todos sus habitantes, la producción de alimentos; grupos diferentes de otros necesarios como los artesanos o los sanadores. Surgió así un pequeño número de colectivos, pequeño en cuanto a número, pero cuya importancia a partir de entonces fue inmensa: los dedicados a la guerra, a la administración (los funcionarios) y los sacerdotes.

## La búsqueda de energía

Al ir haciéndose más complejas las agrupaciones sociales, se necesitaron nuevos instrumentos para satisfacer las subsiguientes necesidades. Especial pero no únicamente, las grandes ciudades, en las que ya habita una parte sustancial de la humanidad, necesitan de un amplísimo conjunto de tecnologías; pensemos, sin ir más lejos, en las que mantienen servicios de alcantarillado e iluminación. Y si pensamos en tecnologías y en servicios a los ciudadanos, hay que considerar fuentes de energía que permiten que funcionen. La búsqueda de tales fuentes ha sido una constante de la humanidad, que se materializó inicialmente en el uso de la fuerza animal para pasar luego a las denominadas *máquinas simples*, artefactos destinados a multiplicar la fuerza aplicada cuyo funcionamiento, por supuesto, únicamente se puede comprender a partir de la mecánica, una rama de la física que entonces no existía. Eran seis: la palanca para desplazar los cuerpos, el plano inclinado para facilitar la carga y descarga, la cuña para dividir los troncos, la polea para levantar y bajar cargas, el tornillo para mantener unidas dos piezas, y la asociación del eje y la rueda para transportar cargas. Se sabe que la primera de las máquinas mencionadas, la palanca, se empleó ya en Mesopotamia hacia el tercer milenio a. C.

No es casualidad, naturalmente, que muchas poblaciones estén al lado de un río; los primeros asentamientos humanos siempre buscaban, por razones obvias, la proximidad de cauces de agua. Además de los usos más inmediatos (agua para beber, para lavarse, para cocinar, etcétera), los ríos podían cumplir otras funciones. Una de esas funciones fue la de aprovechar la energía del movimiento del agua utilizando ruedas con paletas sobre las que caía el agua haciéndolas girar. Parece que estas *ruedas hidráulicas* eran conocidas hace, al menos, 5 000 años. Un uso obvio era como forma para elevar agua, pero pronto se desarrollaron los mecanismos necesarios para emplearlas como molinos

de agua. Y también están los molinos de agua, utilizados —por ejemplo, por los romanos en el siglo x— inicialmente para triturar y moler grano o elevar agua, y más tarde para hacer pasta de papel con trapos, hacer funcionar los martillos y las máquinas de cortar de herrerías o serrar madera. La dirección y velocidad de la fuerza rotativa proporcionada por la rueda de palas vertical se modificaba por los engranajes y se utilizaba para girar el molino horizontal situado encima de la plataforma de madera. Aquellas poblaciones que no disponían de ríos recurrieron a otro tipo de molinos, los de viento, que parece que ya se utilizaban —los de eje vertical con palas horizontales— en Persia en el siglo vii (los de eje horizontal, los más corrientes en Europa, datan del siglo xii).

Los molinos de viento han tenido unos descendientes que, en lugar de moler grano, producen electricidad. Se trata de los aerogeneradores de producción eléctrica, desarrollados gracias sobre todo al científico danés Poul la Cour, que diseñó el primer prototipo de aerogenerador eléctrico: tenía un rotor de cuatro palas de 25 metros de diámetro cada una y era capaz de generar una potencia de entre 5 y 25 kilovatios. El intenso desarrollo de la aviación durante las primeras décadas del siglo xx, con profundos estudios sobre la aerodinámica de las alas, favoreció el desarrollo de los aerogeneradores: en la década de 1930, la compañía FLSmidth construyó en Dinamarca uno de diseño aerodinámico con una potencia de entre 30 y 70 kV. Los aerogeneradores actuales, instalados en torres de 80 metros de altura y con palas gigantescas, llegan a tener potencias de entre 1,5 y 2 megavatios.

## **La imprenta**

Un desarrollo tecnológico muy diferente a los anteriores, pero de inmensa importancia, uno que influiría decisivamente en la historia de la humanidad, fue el invento de la imprenta de tipo móviles debido a Johann Gutenberg (c. 1400-1468), cuyos detalles técnicos continuaron siendo básicamente los mismos durante 350 años. Las imprentas del tipo de la que inventó Gutenberg permitieron que el conocimiento, histórico, social, religioso, científico se difundiera entre cada vez más personas, con las consecuencias de todo tipo que ello tuvo. Por cierto, si se habla de Gutenberg, es imposible no recordar su libro más famoso, impreso en 1456: la *Biblia de 42 líneas*, denominada así porque son 42

las líneas que contienen cada una de las dos columnas de sus 1 284 páginas, distribuidas en dos volúmenes.

Tal vez debería haberme referido también a la invención de la escritura, un tipo de tecnología aún más diferente que la imprenta, pero al que bien se podría denominar la invención más importante de toda la historia de la humanidad, en la medida que permitió transmitir a generaciones futuras el conocimiento alcanzado. Del origen de la escritura solo diré que todas tienen un origen ideográfico —como los caracteres chinos, los jeroglíficos egipcios, los glifos aztecas o mayas y los primeros signos cuneiformes—, pero a partir de él, utilizando algunos ideogramas como fonogramas, fueron evolucionando hacia una escritura fonética cuyo logro final y más perfecto es el alfabeto. La escritura cuneiforme babilonia presentaba aún ideogramas y fonogramas, pero el antiguo persa emplea ya signos cuneiformes de un silabario. El primer alfabeto de la historia es el alfabeto ugarítico, atestiguado hacia el siglo XIV a. C. en Ugarit, en las costas de Siria.

## **Ciencia y tecnología en el siglo XIX**

Podría referirme a otros muchos desarrollos tecnológicos anteriores al siglo XIX, por ejemplo, en el tratamiento de minerales, que incluyen procesos químicos, o a sistemas de comunicación, como la telegrafía óptica, pero no dispongo de tiempo para ello. Y en cuanto al siglo XIX, que acabo de mencionar, hay tanto sobre lo que se podría decir que trasciende los límites de esta conferencia. Algo mencioné al principio, cuando comenté la relación entre ciencia y tecnología. Añadiré ahora algunos, pocos y breves, apuntes. La máquina de vapor dio origen a una gran revolución social. Uno de sus «padres» fue Thomas Newcomen, un hombre que había recibido una educación muy pobre, y que en 1685 se estableció como herrero en Dartmouth (Inglaterra), ocupándose, entre otras tareas, de vender materiales industriales de ferretería, forjar hierro, latón, estaño y cobre, así como fabricar artículos de diferente naturaleza para sus clientes. Precisamente por este trabajo, estaba en contacto con personas familiarizadas con las necesidades y máquinas que se utilizaban en industrias como las de la minería y la cantería, contactos que le sirvieron para apreciar las posibilidades de las ideas que antes que él habían producido hombres como Denis Papin o Thomas Savery. Una de las grandes aplicaciones

de la máquina de vapor fue al transporte, al ferrocarril. Un nombre central en la historia del ferrocarril es el del inglés George Stephenson, quien construyó una locomotora —bautizada con el apropiado nombre de *Locomotion*— que alcanzaba una velocidad de casi 20 kilómetros por hora, con la que en 1825 se comenzó a transportar el carbón extraído de la zona minera de Witton a Stockton, en el estuario del río Tees, a lo largo de un ramal con una única vía de 38,7 kilómetros de longitud. Cuatro años después construyó una nueva locomotora, conocida como *The Rocket (El Cohete)*, que llegaba a los 40 km/h; con ella se inauguró el 15 de septiembre de 1830 la primera línea de la historia que transportaba pasajeros: cubría el trayecto Liverpool-Manchester. El impacto social del ferrocarril fue grande, pero exigió una serie de complejas operaciones: en primer lugar, construir extensas líneas de raíles sobre las que pudiesen circular los trenes, tarea que suponía intervenir sobre el terreno, en ocasiones construyendo túneles y puentes y, luego, establecer estaciones y un complejo sistema para controlar el tráfico que evitase los accidentes.

Otro medio de transporte en el que se introdujeron las máquinas de vapor fue en los barcos. Los primeros intentos en este sentido se realizaron con dos pequeños barcos fluviales propulsados por ruedas de paletas: el *Charlotte Dundas* (Inglaterra, 1802) y el *Clermont* (Estados Unidos, 1807). El primer barco movido por una máquina de vapor, también con ruedas de paletas, que cruzó el Atlántico fue el *Royal William*, que cubrió el trayecto Quebec-Londres en 1833. Unos años más tarde, las ruedas de paletas comenzaron a ser sustituidas por hélices, también movidas por máquinas de vapor. Con esta novedad y con mejores máquinas, pronto la era de la navegación a vela perdió su hegemonía y utilidad: en 1850, un barco de vapor cruzaba el Atlántico en menos de diez días, y antes del final del siglo, en seis días, duraciones que no podía soñar alcanzar ningún barco de vela.

En cuanto a las consecuencias sociales de la introducción de la máquina de vapor, tenemos que favoreció los monopolios. La energía del viento y del agua era libre, pero el carbón que movía las máquinas era caro, más aún las propias máquinas. El funcionamiento durante veinticuatro horas, que caracterizaba a las minas y altos hornos, llegó ahora a otras industrias que hasta entonces habían respetado las limitaciones del día y de la noche. Impulsados por el deseo de ganar todo el dinero posible sobre sus inversiones, los fabricantes de textiles alargaron la jornada de trabajo; mientras en Inglaterra en el siglo xv

había sido de catorce o quince horas en pleno verano con dos horas y media a tres horas para el recreo y las comidas, en las nuevas ciudades fabriles fue a menudo de dieciséis horas durante todo el año, con una hora solo para comer. Funcionando con vapor, alumbradas por gas, las nuevas fábricas podían trabajar durante veinticuatro horas. Por otra parte, la energía de vapor era más eficiente en grandes unidades que en pequeñas, lo que impulsó el gigantismo industrial, e implícitamente el capitalismo.

El otro gran desarrollo tecnocientífico del siglo XIX surgió en el mundo de las comunicaciones electromagnéticas. Primero fue la telegrafía con hilos, en la que el gran logro fue la gran línea telegráfica transatlántica, que unió las islas Británicas con Norteamérica. Completada en 1866, la instalación de esta línea telegráfica constituyó un gigantesco logro tecnológico y científico. Fueron necesarios grandes recursos materiales y técnicos: la línea se depositó utilizando un barco enorme, el *Great Easter*, pero también se precisó de la mejor ciencia del momento, ejemplificada en ese caso por el gran Kelvin. Rápidamente fue surgiendo una malla de redes telegráficas que inundaron el globo terrestre, que hizo el mundo más pequeño. Y más tarde llegaron el teléfono, la radio y la televisión. Una nueva civilización, en suma.

En este punto tengo que hacer una precisión. Dije antes que la telegrafía eléctrica con hilos comenzó en gran medida independientemente de los avances que se realizaron a lo largo del siglo XIX en la física del electromagnetismo. No se puede decir lo mismo, sin embargo, de la telegrafía sin hilos, de la radio y de la televisión. El punto de partida de estas tecnologías se encuentra en la predicción que James Clerk Maxwell realizó en la década de 1860 de la existencia de ondas electromagnéticas, y en la comprobación que Heinrich Hertz efectuó en 1888 de que cargas aceleradas emitían ondas electromagnéticas. El desarrollo tecnológico no fue aquí independiente del conocimiento científico.

## **El siglo XX: ciencia y tecnología**

El caso de la telegrafía sin hilos, una tecnología fuertemente, aunque no totalmente, dependiente del conocimiento científico, representa algo así como la pauta que seguiría buena parte de la tecnología del siglo XX. Y ningún ejemplo muestra esto con mayor claridad que el transistor.

Un *transistor* —comenzaré recordando— es un dispositivo electrónico hecho de un material semiconductor que puede regular una corriente que pasa a través de él y también actuar como amplificador y que, comparado con los tubos de vacío y los triodos que le precedieron, necesita cantidades muy pequeñas de energía para funcionar; además, son más estables, compactos, actúan instantáneamente y duran más.

El transistor es un «hijo» de la física cuántica, una rama de la física que, junto con la relatividad einsteiniana, revolucionó la física de la primera mitad del siglo xx. Con «“hijo” de la física cuántica» quiero decir que, sin poseer una gran maestría en esta compleja disciplina, es imposible imaginar que hubiese sido posible inventar el transistor, un artilugio del que con justicia se puede decir que cambió el mundo; el mundo que todos poblamos, y también los mundos de la industria y, subsidiariamente, de la economía. Y tras los transistores vinieron los circuitos integrados, minúsculos y muy delgados dispositivos en los que se fundamenta el mundo digital (cada circuito integrado puede albergar millones de transistores). Integrados en circuitos integrados, o *chips*, los transistores han cambiado, literalmente, las formas en las que nos comunicamos, trabajamos, relacionamos con el dinero, escuchamos música, vemos televisión, conducimos coches, lavamos nuestra ropa o cocinamos.

Hasta la llegada de los transistores y circuitos integrados, las máquinas de calcular utilizadas eran gigantescos amasijos de componentes electrónicos. Durante la Segunda Guerra Mundial se construyó una de las primeras computadoras electrónicas, el *Electronic Numerical Integrator and Computer*, Computador Integrador Numérico Electrónico, también conocido por sus siglas inglesas, ENIAC. Tenía 17 000 tubos electrónicos, unidos por miles de cables, pesaba 30 toneladas y consumía 174 kilovatios. Podemos considerarlo el paradigma de la primera generación de computadoras. Con los transistores llegó, en la década de 1950, la segunda generación, ejemplificada por el TRADIC (de *Transistorized Digital Computer*), construido en 1954 por los Laboratorios Bell para la Fuerza Aérea estadounidense; utilizaba 700 transistores y podía competir en velocidad con ENIAC. El primer ordenador personal (PC) tardó más en llegar: fue construido en 1972 en el Centro Xerox de Investigación de Palo Alto, pero no atrajo realmente la atención del gran público hasta finales de la década de 1980.

El número de computadoras, *smartphones* (teléfonos inteligentes) y tabletas, y el número de ellos conectados a Internet, que existen en nuestros hogares, crece

y crece exponencialmente. En la actualidad, el mundo digital es el reino de los terminales, los módems, los lenguajes-protocolos de programación, de los bits (acrónimo de *binary digit*), *bytes* (conjuntos ordenados de 8 bits), *megabytes* (1 *megabyte* es un millón de *bytes*) y las sucesivas unidades, *gigabytes*, *terabytes*, etcétera; del correo electrónico, los servidores, las «nubes», las realidades virtuales o las redes sociales, sistemas que requieren de un enorme conjunto de tecnologías. Pronto estaremos rodeados de minúsculos microprocesadores que detectarán nuestra presencia (sensores de rayos infrarrojos nos identificarán por el calor que despedimos), se anticiparán a nuestros deseos —que conocerán tras una cierta educación: cada vez son *más inteligentes*— e incluso interpretarán nuestras emociones. Cuartos de aseo inteligentes supervisarán nuestra salud, realizando, por ejemplo, análisis químicos de orina o tomándonos el pulso simplemente cuando nos sentamos en el asiento del retrete. Es lo que ahora, en el siglo XXI, se denomina *Internet de las cosas*, que no es sino la intensificación de la presencia de sensores en todo tipo de objetos y entornos, sensores que tienen acceso a Internet y que se conectan entre sí en grupos.

No olvido el impacto que este mundo tecnológico ha tenido en la economía. Basta mencionar un nombre: Silicon Valley, surgido, por cierto, cuando algunos científicos se decidieron a traspasar las fronteras de la academia de una manera mucho más radical que cuando aceptaron trabajar para laboratorios industriales; esto es, convirtiéndose ellos mismos en empresarios. Como es bien sabido, el crecimiento, durante las décadas de 1960 y 1970, de Silicon Valley fue extraordinario. Con él y en él se estableció una «nueva alianza» entre ciencia e industria, entre investigación básica e innovación.

Encontramos otro buen ejemplo del papel motor de la ciencia en desarrollos tecnológicos en nada menos que una de las teorías científicas más bellas que jamás se han creado: la teoría de la relatividad general, formulada por Albert Einstein en 1915. Esta teoría describe los fenómenos gravitacionales, y nos ha permitido entender o descubrir cosas como la expansión del universo o la existencia de objetos astronómicos tan sorprendentes como los agujeros negros, pero también es fundamental para una herramienta tecnológica cuyo uso se extiende cada vez más: el *Global Positioning System* o sistema de posicionamiento global (GPS): hay que tener en cuenta los efectos relativistas para que no se produzcan desviaciones importantes en las localizaciones. Por cierto, el GPS depende, como es bien sabido, de satélites artificiales, «instru-

mentos» tecnológicos de los que podría hablar mucho, entre otras cosas, para hacer hincapié en la relación entre tecnología, fuerzas armadas y política. Pero debo continuar ahora con el presente siglo, el XXI.

## **El siglo XXI y la cuarta revolución industrial**

Klaus Schwab, fundador del Foro Económico Mundial, que se reúne anualmente en Davos (Suiza), ha acuñado el término *cuarta revolución industrial* para el proceso que se inició a comienzos del siglo XXI y que se basa en las posibilidades del mundo digital. «Se caracteriza», ha señalado, «por un Internet más ubicuo y móvil, por sensores más pequeños y potentes y que son cada vez más baratos, y por la inteligencia artificial y el aprendizaje de la máquina». Las anteriores fueron, según él, la propiciada por la invención de la máquina de vapor; la que se produjo entre finales del siglo XIX y comienzos del XX, caracterizada por la producción en masa gracias al desarrollo de la ciencia electromagnética y la cadena de montaje, y la de la globalización, posible debido a las técnicas digitales y las computadoras, que se inició en la década de 1960.

El presente siglo será —ya lo está siendo— la centuria en la que florecerán campos como la inteligencia artificial, la robotización, la nanotecnociencia, los materiales y una nueva medicina, la de la ingeniería genética y la biología sintética.

Es inminente la llegada, la invasión, de máquinas «inteligentes» que superarán las conocidas y que podrán realizar muchas de las tareas protagonizadas hasta ahora por humanos, con mayor eficacia y seguridad que estos. Hablar de «inteligencia artificial» implica, por supuesto, ponerse de acuerdo antes sobre qué es la «inteligencia», puesto que no existe una definición que se acepte universalmente. Una posible forma de reconocer la inteligencia artificial es el denominado *test de Turing*, propuesto por el genial y nada afortunado matemático inglés Alan Turing, en un artículo publicado en 1950 en el que sostuvo que una máquina es inteligente si una persona que la interroga, pero no la puede ver, es incapaz de deducir por sus respuestas si se trata de una máquina o de un humano. Para el tipo de inteligencia implícita en el test de Turing podrían bastar dispositivos muy sofisticados pero estáticos, del tipo de *Deep Blue*, la computadora de IBM que derrotó en 1997 a Gary Kasparov, campeón mundial

de ajedrez. Más recientes, enero de 2017, y mucho más significativas son las victorias de un programa de ordenador, *Libratus*, diseñado en la Universidad Carnegie Mellon, de Pittsburg, por dos matemáticos, Noam Brown y Tuomas Sandholm, en una partida de póker ante cuatro campeones mundiales de ese juego. Y digo «significativas», porque el póker no es como el ajedrez, basado en reglas lógicas, en millones y millones de posibilidades, pero todas obedeciendo a unas reglas fijas; mientras que en el póker desempeñan un papel central las iniciativas de las personas, incluidas las «faroles».

Los dispositivos «inteligentes» ya están ayudando a resolver, o al menos a aliviar, algunos de los problemas que afectan hoy a la humanidad: vehículos —existen prototipos— que no necesitan de un conductor, que, por ejemplo, incrementarán la movilidad de ancianos y discapacitados; edificios inteligentes que permiten economizar los gastos energéticos y reducir las emisiones de dióxido de carbono; servicios médicos automatizados, presenciales o a distancia; o sistemas para mejorar la enseñanza en todos los niveles educativos. Los ejemplos de máquinas como estas, que no solo respondan a preguntas, sino que reaccionen ante el entorno, que tomen decisiones ante situaciones inesperadas y que puedan aprender de «experiencias» anteriores, son ya muy numerosos y lo serán mucho más pronto. Por supuesto, también están los sistemas inteligentes «móviles», los robots que podrán mantener —existen algunos— otros tipos de relación, más personales y afectivas, con los humanos, y de apariencia más similar a ellos.

Estamos en el umbral de este mundo. Pero aparecerán problemas importantes. Uno de ellos es cómo afectará al mercado laboral. Algunos estudios pronostican que en dos décadas el 47 % de los empleos en Estados Unidos se verán sustituidos por procesos automatizados. El empleo crecerá en puestos de trabajo cognitivos y creativos de altos ingresos, y en ocupaciones manuales de bajos ingresos, pero disminuirá con fuerza para los empleos rutinarios y repetitivos de ingresos medios. No son pocos los que creen que, al igual que en épocas anteriores de cambio tecnológico el balance para el mercado laboral resultó siempre positivo, lo mismo sucederá ahora. No estoy nada seguro de que será así, pero sí sé que la historia no ofrece necesariamente lecciones inmutables, solo formas racionales de comprender el pasado. De lo que sí estoy seguro es de que muchas personas sentirán lo mismo que los luditas de los siglos XVIII y XIX, que trataron de combatir las máquinas de hilar que amena-

zaban sus trabajos en los nuevos telares industriales. Pero los luditas perdieron la batalla, como la perderán, si es que aparecen, quienes intenten luchar contra la robotización inteligente en curso.

De la nanotecnociencia se pueden decir muchas cosas. Engloba cualquier rama de la tecnología o de la ciencia que investiga o hace uso de nuestra capacidad para controlar y manipular la materia a escalas comprendidas entre 1 y 100 nm. Avances logrados en este dominio han permitido desarrollar nanomateriales y nanodispositivos que ya se están utilizando en ámbitos diversos. Así, es posible emplear una disolución de nanopartículas de oro de unos 35 nm de diámetro para localizar y detectar tumores cancerígenos en el cuerpo, puesto que hay una proteína presente en las células cancerígenas que reacciona con los anticuerpos adheridos a esas nanopartículas, permitiendo localizar las células malignas. Es posible, por otra parte, utilizar tubos nanoscópicos de grafeno (un material bidimensional compuesto de átomos de carbono dispuestos según un patrón regular hexagonal), observados en 1976 por Morinobu Endo y sobre los que llamó la atención en 1991 Sumio Ijima, para fabricar materiales más resistentes que el acero y entre 6 y 10 veces más ligeros, que seguramente revolucionarán los mundos de la electricidad, la electrónica y la computación. Al igual que lo que ha sucedido en otras ocasiones, uno de los actuales impedimentos para la comercialización de dispositivos que utilizan grafeno es el precio de este: gramo a gramo, es uno de los materiales más caros del planeta, pues una hojuela de un micrómetro de grosor cuesta más de 1 000 dólares. Pero este problema lo suele resolver el tiempo —piénsese, por ejemplo, en lo que costó obtener, unos cuantos miles de millones de dólares, el primer mapa de un genoma humano, y lo que cuesta ahora, en torno a mil dólares—, con la mejora de las técnicas implicadas en la producción. Cuando el grafeno tenga un precio competitivo, tendrá un impacto muy significativo en las industrias de fabricación e infraestructura.

Particularmente relevante a la hora de plantearse qué nos puede reservar el futuro son la ingeniería genética y la biotecnología (nótese los términos *tecnología* e *ingeniería*, que revelan la íntima relación que existe en estos dominios entre ciencia básica y tecnología, relación de la que ha surgido el término *tecnociencia*). Diseñar vida, animal o vegetal, a la carta, es algo que hace tiempo que está en marcha. La denominada *biología sintética* proporcionará la posibilidad de personalizar los organismos mediante la configu-

ración del ADN. Plantas y animales podrán ser diseñados para producir productos farmacéuticos. Ya se han comenzado a diseñar los genomas de cerdos para confeccionar órganos adecuados para trasplantar a humanos, un proceso denominado *xenotrasplante*. Hace muy pocos días los periódicos de todo el mundo se hacían eco del hecho de que un equipo internacional de investigadores había conseguido por primera vez embriones viables sin carga genética defectuosa, eliminando en este caso las causas de la muerte súbita. Se abre de esta manera —en realidad, esta puerta lleva mucho tiempo abriéndose— para curar muchos males (10 000 se han mencionado), pero también, es evidente, para intervenir en la evolución de nuestra propia especie, para modificar la línea germinal. Ante semejante posibilidad, se ha intensificado el debate de si se deben introducir normas para evitar utilizar este tipo de técnicas que pueden conducir a obvias desigualdades sociales. Personalmente veo muy difícil que lleguen a implantarse, de manera efectiva, normas legales semejantes. La historia enseña que lo que puede hacerse, más pronto que tarde, se hace. Más aún en casos como este, en el que de lo que se trata es de mejorar características de individuos, y hacerlo de forma que esas mejoras se transmitan a su descendencia. Me doy cuenta perfectamente de los peligros que ello implica, pero lamento decir que mi creencia en la amplitud de miras sociales de los humanos no es tanta como para pensar que aquellos que puedan no utilicen estos poderes. ¿No estamos viendo que es así en infinidad de apartados (pensemos, aunque no sea lo mismo, en la negación que no pocos hacen —y alguno, reciente, muy importante— del cambio climático, o si se prefiere, de tomar medidas para minimizarlo)? En definitiva y para finalizar, es evidente que el futuro, social y genético, de nuestra especie se halla ante retos no hace mucho inimaginables. Todo ello producto del conocimiento científico y el desarrollo tecnológico. Y de lo que no cabe duda es que, intelectualmente, ese futuro será muy interesante, apasionante de hecho.