

LA CIVILIZACIÓN DE LAS MÁQUINAS. TRES INVENCIONES EN TRES SIGLOS

CARLOS SÁNCHEZ DEL RÍO Y SIERRA
Real Academia de Ciencias

INTRODUCCIÓN

Para percibir adecuadamente el contenido de las páginas que siguen es preciso recordar que la base material de nuestra civilización permaneció prácticamente inalterada durante más de tres mil años. Más concretamente, desde que existen textos escritos hasta el siglo XVIII se aprecian pocos cambios en la forma en que nuestros antepasados se ocuparon de satisfacer sus necesidades materiales.

En la agricultura encontramos los mismos cereales (trigo en Oriente Próximo y Europa, arroz en Asia y maíz en América), las mismas frutas y verduras y el mismo ganado (ovejas, cerdos, vacas y gallinas) como base de la alimentación humana. Los animales domésticos (perros, gatos y caballos, entre otros) tampoco cambiaron, excepto en América, después del descubrimiento.

El vestido se basó en tejidos con los mismos materiales tradicionales: lana, lino, seda y algodón. Se calentaban quemando leña y se alumbraban de noche con velas y candiles.

Los materiales de construcción fueron siempre la piedra, los ladrillos o adobes y la madera. Y los demás utensilios se basaban en cerámica, vidrio, cuero y los metales cobre, hierro o varias aleaciones.

Las herramientas también permanecieron inmutables durante siglos y siglos. Siempre usaron los hombres cuchillos, sierras, martillos y otros utensilios. Los mecanismos fundamentales, palanca, polea, torno, cuña, tornillo y plano inclinado, también son antiquísimos.

El transporte terrestre se apoyó en animales de tiro como caballos, asnos y camellos, y el marítimo en barcos de vela o de remos.

A pesar de cuanto se lleva escrito se produjeron algunas innovaciones importantes durante el Medievo y el Renacimiento. Pensemos en los molinos de viento, en la pólvora, en la brújula, en las gafas y, sobre todo, en el papel y la imprenta.

Todas estas innovaciones, sin duda importantes, no se pueden comparar con los cambios producidos por la nueva mentalidad que trajo consigo la ciencia y la tecnología a partir del siglo XVII. No es ésta la ocasión de mencionar

los nuevos materiales (aceros, aluminio, plásticos) o los nuevos hábitos alimenticios propiciados por conservas y congelados. Ni es éste el lugar para describir los avances en medicina desde las vacunas, las anestésicas hasta los antibióticos.

Es, en cambio, pertinente fijarnos en el aspecto tal vez más llamativo de nuestra civilización. Vivimos rodeados de máquinas de todas clases: herramientas automáticas, automóviles, aviones, electrodomésticos, teléfonos, radio, televisión, ordenadores y tantos otros artilugios sin los cuales parece que no podríamos vivir.

Y sucede que la mayor parte de las novedades mencionadas son consecuencia de tres invenciones que han tenido lugar en los tres últimos siglos: las máquinas térmicas en el XVIII, la corriente eléctrica en el XIX y el dispositivo transistor en el XX. El objeto de este texto es la exposición de estas tres invenciones con algún detalle.

LAS MÁQUINAS TÉRMICAS

Las máquinas térmicas convierten el calor que se genera en la combustión en energía mecánica. Esta energía puede sustituir al esfuerzo muscular de los hombres o de los animales, que anteriormente eran casi la única forma de producir un trabajo.

La primera máquina de esta clase tenía por objeto mover las bombas que extraían el agua de las minas, y fue construida por Thomas Newcomen en 1712. El calor obtenido quemando carbón servía para producir vapor de agua en una caldera y el invento consistía en aprovechar la fuerza expansiva del vapor para mover un pistón ajustado a un cilindro.

La técnica de principios del siglo XVIII era bastante tosca, pero gracias al ingenio de Newcomen se pudo construir esta primera máquina de vapor que recibió el nombre de «máquina atmosférica» por su manera de funcionar. La máquina consistía esencialmente en un cilindro vertical con un pistón unido por una cadena a un contrapeso: se deja entrar en el cilindro vapor de agua a baja presión que hace subir el pistón; acto seguido se inyecta agua fría en el in-

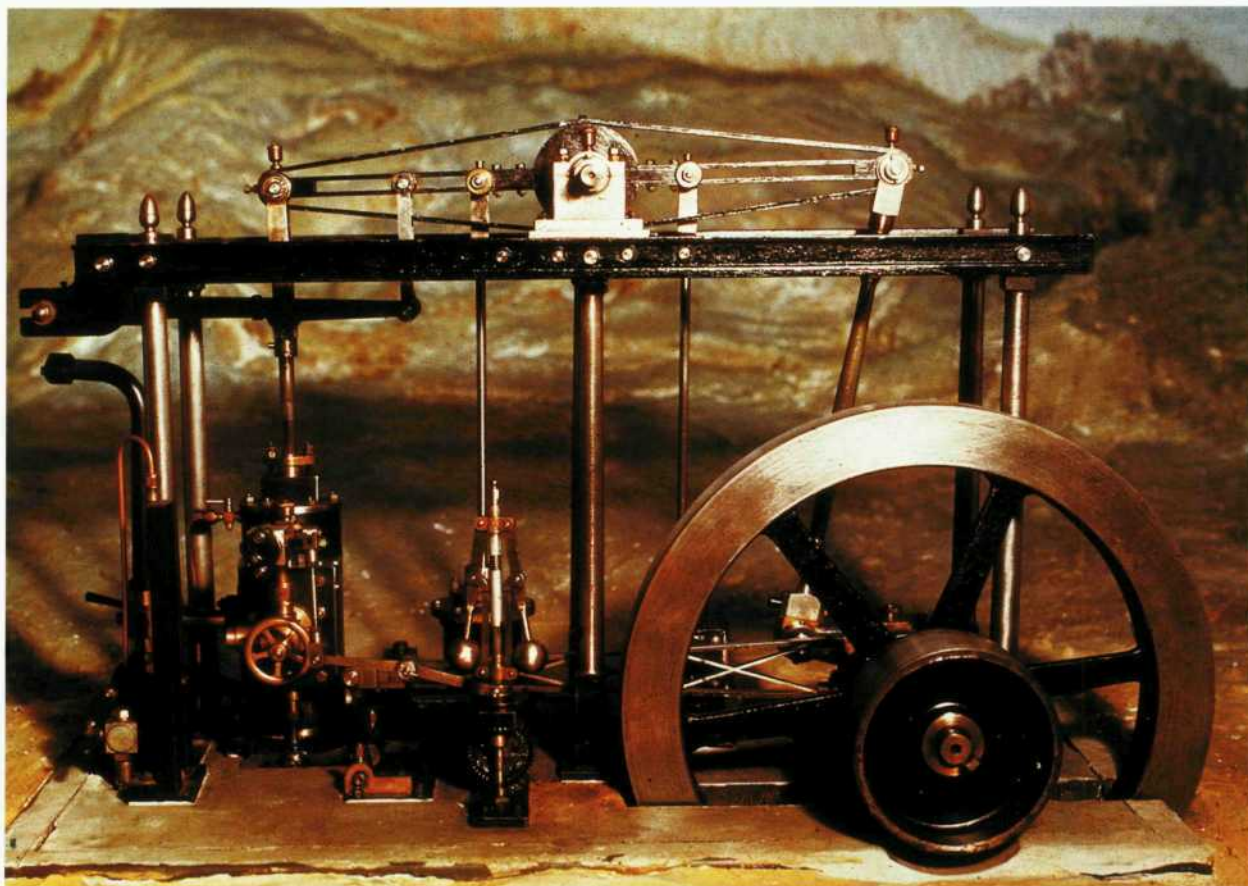


Fig. 1.- Máquina de vapor de James Watt.

terior del cilindro, con lo que se condensa el vapor, se reduce la presión interna y el pistón baja con fuerza debido a la presión atmosférica. Todo el proceso se llevaba a cabo controlando manualmente los dos grifos de entrada del vapor y del agua. De este modo tan sencillo como ineficaz se consiguió por primera vez producir trabajo mecánico a partir del calor que se generaba en la combustión del carbón.

Pasaron los años y en 1765 un mecánico escocés, James Watt, construyó la primera máquina de vapor relativamente eficaz y que funcionaba automáticamente. Mejoró el rendimiento de la máquina condensando el vapor fuera del cilindro para evitar que en cada ciclo se enfriase éste. Además, cubrió la parte superior del cilindro con una caperuza; de este modo se inyectaba vapor de agua para forzar el descenso del pistón que había subido gracias al contrapeso. Para evitar que los tiempos de subida y bajada del pistón fueran diferentes inventó la máquina de doble efecto, en la cual se usaba el vapor tanto para subir el pistón como para bajarlo, y sustituyó la cadena por un ingenioso paralelogramo. Añadió automatismos, de manera que la máquina funcionaba sin intervención manual.

Por todos estos perfeccionamientos es justo considerar a Watt el inventor de la máquina de vapor. Es interesante recordar que, para la difusión comercial de sus máquinas, Watt acuñó el término «caballo de vapor» como unidad de po-

tencia. Una máquina de diez «caballos», decía, podía producir el mismo efecto que diez caballerías propulsando una noria. Pocos años después propuso también Watt la construcción de máquinas de alta presión sin condensador; en la caldera se debía producir vapor de agua, a la presión de varias atmósferas, que actuaría sobre el pistón contra la presión atmosférica. Evidentemente, la construcción de estas máquinas necesitaría una tecnología más avanzada.

La introducción de las máquinas de vapor fue decisiva para el éxito de la revolución industrial, por varios motivos. En primer lugar, se pudieron instalar en cualquier sitio fábricas que necesitaban energía, aunque no hubiera un salto de agua. En segundo lugar, la máquina de vapor revolucionó el transporte y en consecuencia favoreció el comercio.

La aplicación de la máquina de vapor al transporte no fue, sin embargo, inmediata, ya que fue preciso vencer importantes dificultades técnicas. La propulsión de barcos mediante máquinas de vapor exigió el desarrollo de instalaciones que no fueran sensibles a los movimientos de las embarcaciones, que pueden ser muy violentos en situaciones de mar gruesa. Por eso el primer servicio de barcos de vapor no se estableció hasta 1807, y fue curiosamente en América, entre Albany y Nueva York. Los primeros vapores transatlánticos, que así se llamaron los buques a vapor, no entraron en servicio hasta 1838.

La aplicación de las máquinas de vapor al transporte terrestre fue todavía más difícil. La construcción de una máquina de vapor compacta, ligera y que soportase los traqueteos de los caminos de la época era inviable. Por eso se pensó en lo que resultó ser el ferrocarril, aprovechando la experiencia que se tenía en el uso, que se hacía en las minas, de vagonetas sobre raíles arrastradas por caballerías. Hubo dudas porque muchos opinaban que las ruedas propulsores de las locomotoras resbalarían sobre los raíles y habría que utilizar cremalleras u otras complicaciones; por fortuna estos temores se disiparon cuando se comprobó que una locomotora pesada y con muchas ruedas tiene la adherencia suficiente para arrastrar un tren de muchos vagones.

La gran dificultad fue conseguir locomotoras compactas, porque el vapor de agua que se produce en una caldera portátil no basta para mantener el ritmo de consumo de vapor que requiere la máquina. La solución consistió en la construcción de calderas con tubos por los cuales penetran las llamas gracias al tiro forzado que se provoca al expulsar por la chimenea el vapor que sale de los cilindros; de este modo, George Stephenson consiguió el primer ferrocarril en 1829. A partir de entonces y durante el resto del siglo XIX se construyó la red ferroviaria mundial que terminó con los lentos y costosos carros y carretas que fueron el único medio de transporte durante milenios.

Un perfeccionamiento notable de las máquinas de vapor fue el desarrollo de la turbina de vapor en 1884, debido a Charles Parsons. El rendimiento de estas máquinas era superior, y se empezaron a instalar en buques a partir de 1897. Actualmente se utilizan turbinas de vapor de gran tamaño para mover los alternadores de las centrales eléctricas térmicas de carbón, de petróleo o nucleares.

Una máquina térmica alternativa a la máquina de vapor fue la invención de Jean Lenoir, en 1859, del motor de combustión interna; en ese motor se quemaba gas del alumbrado dentro del cilindro, con lo cual se dilataba la mezcla gaseosa que provocaba el movimiento del pistón. La gran ventaja de los motores de combustión interna es que son mucho más ligeros que las máquinas de vapor de igual potencia. Por eso son las máquinas adecuadas para la propulsión de automóviles y aviones. Pero su desarrollo no ocurrió hasta que se dispuso de gasolinas y otros combustibles líquidos derivados del petróleo. El motor de gasolina de cuatro tiempos que hoy usamos fue invención de Nikolaus Otto en 1880, y su versión de gasóleo fue obra de Rudolf Diesel en 1897.

Finalmente y ya en este siglo, se desarrolló la turbina de gas hacia 1940. Esta máquina térmica se usa en las centrales eléctricas que consumen gas natural y en la propulsión de aviones.

LA CORRIENTE ELÉCTRICA

La corriente eléctrica es un método excelente de transportar energía y de transmitir información a través de conductores metálicos que son generalmente de cobre.

Aunque ya se habían estudiado fenómenos eléctricos durante el siglo XVIII, la historia de la corriente eléctrica comienza en 1800 con la invención por Alessandro Volta de su famosa pila. Consistía en unas docenas de discos de cobre, cinc y fieltro húmedo acidulado, apilados en este orden: si se conectan el primer disco de cobre con el último de cinc con un alambre metálico, los electrones libres del metal se ponen en movimiento y decimos que circula una corriente eléctrica por el alambre conductor.

Esta corriente puede aprovecharse de diversos modos, y hacia 1820 ya se usaba para producir una luz blanca e intensa (arco voltaico) en los teatros y para hacer sonar a distancia una campanilla (timbre eléctrico) en las mansiones de las familias pudientes.

Del mismo modo que la corriente podía mover una pieza para que la campanilla sonase, era posible construir un motor accionado por la corriente eléctrica. De hecho se construyeron pronto dichos motores, pero no resultaron prácticos porque las pilas consumen cinc para producir energía, por lo que ésta resulta sumamente cara.

En 1831, sin embargo, Michel Faraday hizo un descubrimiento sensacional que denominó inducción electromagnética; sucede que si se mueve un conductor metálico cerrado cerca de un imán se ponen en marcha los electrones del metal, igual que si estuvieran conectados a una pila. Esto permite producir corriente eléctrica barata a partir de la energía mecánica de un salto de agua o de una máquina térmica. A partir de 1866 se pudieron



Fig. 2.— Alessandro Volta.



Fig. 3.— Thomas Alva Edison.

construir grandes generadores utilizando la propia corriente para crear el campo magnético necesario (principio dinamoeléctrico de Werner von Siemens), y a finales del siglo XIX las máquinas de las fábricas se movían por motores eléctricos, y circulaban tranvías propulsados también por la electricidad. Finalmente la corriente eléctrica llegó a los hogares a partir de la invención de las lámparas de incandescencia, por Thomas Edison y Joseph Swan en 1880. La luz eléctrica fue y es la aplicación más importante de la corriente eléctrica, hasta el punto de que todavía hoy la gente habla de la «factura de la luz» para referirse al pago de la energía eléctrica consumida en una vivienda.

Otra aplicación importantísima de la corriente eléctrica es la transmisión de información. Desde antiguo se usaron métodos visuales para la transmisión de mensajes; tal vez el más conocido sea el telégrafo de banderas que se empleaba para comunicarse entre dos barcos. El inconveniente de estos métodos visuales es que su alcance es limitado y sólo pueden usarse de día.

La invención del timbre eléctrico sugirió la posibilidad de un telégrafo eléctrico, que resultó práctico como consecuencia de un descubrimiento y una invención. El descubrimiento fue la comprobación de que basta un alambre para enviar una señal, porque la corriente puede «retornar» por la tierra. La invención, debida a Samuel Morse en 1837, es que todas las letras pueden codificarse combinando dos símbolos (puntos y rayas) fácil-

mente reconocibles en una tira de papel donde se graban con un mecanismo de relojería muy sencillo y robusto. Este sistema telegráfico se usó a través del canal de La Mancha en 1850 y fue operativo entre Europa y América en 1865.

Las ondas sonoras dan lugar a vibraciones que se pueden convertir en corrientes eléctricas oscilantes utilizando el mencionado fenómeno de la inducción electromagnética de Faraday. Estas corrientes se pueden volver a convertir en sonido por un proceso inverso, y de esta manera construyó Graham Bell en 1876 el primer teléfono magnético sin pila; el micrófono y el auricular consistían ambos en un imán, un carrete de alambre y una lámina de hierro. Posteriormente se introdujeron las pilas, los micrófonos de carbón y otras novedades.

Actualmente recibimos información mediante la radio y la televisión sin necesidad de estar conectados por cable con el centro que genera tal información. Esta posibilidad no fue resultado de inventores ingeniosos, sino de un conocimiento más profundo de las leyes naturales por parte de científicos sin ánimo de lucro. En un esfuerzo por sintetizar todo el electromagnetismo en un sistema coherente de ecuaciones matemáticas, James Clerk Maxwell llegó en 1865 a la conclusión de que deberían existir ondas electromagnéticas que se propagarían en el espacio sin necesidad de soporte material alguno. Sugirió además que la luz debía de consistir en ondas de esa clase, lo cual era parcialmente correcto.

Hubieron de pasar muchos años hasta que Heinrich Hertz consiguiera en 1888 producir y detectar las ondas postuladas por Maxwell. Eran ondas muy cortas, como las que se emplean ahora en televisión, y muy poco manejables entonces. Un italiano ingenioso, Guglielmo Marconi, tuvo la idea de usar ondas de mayor longitud de onda para transmitir señales inalámbricas y así surgió la radiotelegrafía o telegrafía sin hilos, como se llamó entonces. En 1901 se consiguió la comunicación radiotelegráfica entre Europa y América.

El paso a la radiotelefonía (lo que hoy llamamos radio) no fue asunto trivial. En realidad, hubiera sido imposible si no fuese por nuevos conocimientos sobre la estructura de la materia que llegaron oportunamente. En 1897, Joseph John Thomson identificó el electrón como partícula responsable de la corriente eléctrica. Se sospechaba y se comprobó que los metales incandescentes emiten electrones. Y ello condujo a la invención del diodo rectificador de vacío, por John Fleming en 1904. El paso siguiente fue la introducción por Lee de Forest en 1906 de una rejilla de control en el diodo, que se convirtió en triodo; había nacido la válvula electrónica de vacío, que fue dispositivo imprescindible para el control de corrientes débiles hasta la invención del transistor medio siglo después.

Con la válvula de vacío fue posible la radiotelefonía de los años veinte, el cinematógrafo sonoro de los treinta, la televisión de los cuarenta y cincuenta y los demás artilugios que se conocen con el nombre de electrónica. Conviene mencionar en particular la importancia de las válvulas de vacío, junto a los relés, en la expansión de la red telefónica automática, que fue en su momento el sistema más complejo construido por el hombre.

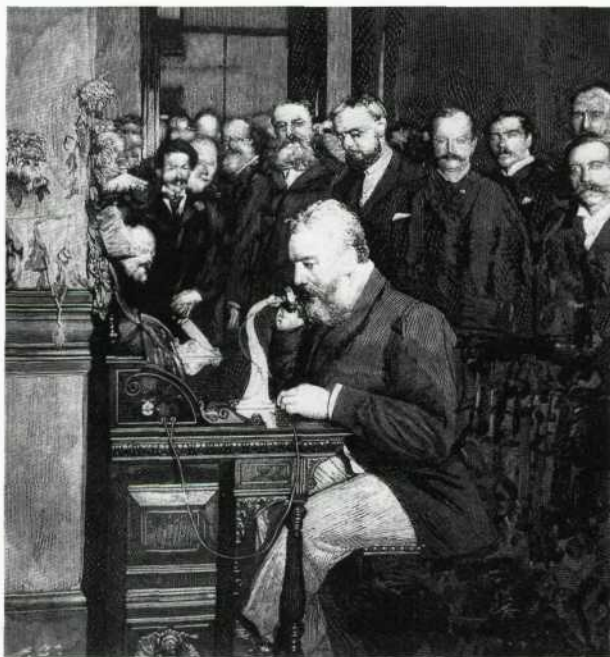


Fig. 4.— Alexander Graham Bell hablando por teléfono desde Nueva York con el profesor Hubbard en Chicago. Grabado de *Ilustración Española y Americana* (1892).

EL TRANSISTOR

En el lenguaje ordinario se suele llamar transistor a un receptor de radiotelefonía portátil alimentado por pilas. Pero, técnicamente, un transistor es un dispositivo semiconductor que permite controlar una corriente eléctrica. El nombre proviene de la expresión inglesa *TRANsfer Current through a ReSISTOR*. Su función es idéntica a una válvula de vacío como las mencionadas anteriormente y puede también sustituir a un relé mecánico como los que se emplean en los sistemas telefónicos.

Las ventajas de los transistores sobre otros dispositivos es que consumen poca corriente, duran mucho, responden con rapidez y son muy baratos. Con estas propiedades no es de extrañar que los transistores sean la base de lo que actualmente llamamos la revolución de la información.

Antes de proseguir vale la pena recordar la historia de este casi milagroso dispositivo electrónico. En 1945 se formó en los laboratorios de investigación de la empresa ATT (American Telegraph and Telephone Company) un grupo de trabajo para estudiar la posibilidad de utilizar dispositivos de estado sólido en lugar de los relés y válvulas de vacío que se usaban en las redes telefónicas de la compañía. La investigación tuvo éxito, de manera que se descubrió el efecto transistor, en germanio, en 1947; se entendió el mecanismo de su funcionamiento (difusión de electrones y huecos) al año siguiente, y se construyó el primer transistor n-p-n en 1950.

A partir de entonces se acelera la historia. En 1952 aparece el primer transistor comercial de germanio fabricado por la General Electric Company. Dos años después la empresa Texas Instruments presenta los transistores de silicio, y en 1954 la misma compañía desarrolla los primeros circuitos integrados, que están formados introduciendo impurezas controladas en determinadas regiones de una lámina de silicio. Habían aparecido los circuitos transistorizados, potencialmente baratísimos.

Los transistores permitieron la construcción de receptores de radio portátiles (los vulgarmente llamados «transistores»), los satélites de comunicaciones y más recientemente los teléfonos móviles celulares, la televisión digital y, sobre todo, los ordenadores. Y esto requiere atención especial porque parece como si el destino hubiera preparado las máquinas de calcular automáticas para la llegada de los transistores.

Los artificios para facilitar los cálculos aritméticos son muy antiguos. Ni se sabe desde cuando se utilizan los ábacos. Las primeras máquinas de calcular con engranajes se inventaron en el siglo XVII por Blaise Pascal y Gottfried Leibniz, y se comercializaron en el siglo XIX. En la misma centuria, Charles Babbage diseñó una máquina analítica con memoria de datos y programable con tarjetas perforadas que no llegó a funcionar porque un ingenio de esa clase, puramente mecánico, es imposible.

Ya en este siglo, Konrad Zuse construyó en Alemania la primera máquina de calcular automática electromecáni-

ca, en 1941. Era un ordenador con 2.000 relés, aritmética binaria y programable, con una cinta de papel perforada como las que se usaban en los teletipos. Hacía una multiplicación en tres segundos y su inventor comprendió que se aumentaría la rapidez de cálculo sustituyendo los relés por válvulas de vacío.

Ese paso se dio en los Estados Unidos. En 1945 se puso en funcionamiento el primer computador electrónico programable, que se conoce con el nombre de ENIAC. Era una máquina con 18.000 válvulas de vacío, 70.000 resistencias, 10.000 condensadores y 6.000 interruptores que se usaban para la programación. Pesaba 30 toneladas y consumía 140 kW de potencia.

Las máquinas siguientes se diseñaron según los criterios que estableció John von Neumann en 1945. El sistema aritmético sería binario procesado en serie; el programa iría codificado en la propia memoria de datos, etc. Todo como se hace ahora. El primer ordenador comercial de este tipo fue fabricado por la empresa Rank Xerox en 1951, y el más famoso fue el legendario IBM 650, producido en 1952 por la compañía International Business Machines (IBM).

Estos primeros ordenadores comerciales eran grandes, pesados, inseguros y consumían mucha energía. Pero tu-

vieron éxito porque permitían cálculos científicos y técnicos complicados y facilitaban las cuentas sencillas pero numerosas de los bancos y otras grandes empresas.

La sustitución de las válvulas de vacío por transistores no se hizo esperar. En 1955 apareció el primer computador transistorizado de la empresa IBM; la memoria era una red de toros de ferritas y se introducían datos e instrucciones por medio de las tarjetas perforadas que usaba tradicionalmente la misma compañía. Se inició entonces la era de los grandes centros de cálculo, que proliferaron en las universidades y empresas importantes. La programación de las máquinas se facilitó con la aparición de los lenguajes de alto nivel (FORTRAN, COBOL, etc.), y se pudo percibir la importancia que la informática (palabra introducida entonces) iba a tener en el futuro.

Una nueva revolución se produjo en 1971. Una empresa con sede en California llamada Integrated Electronics (INTEL) recibió un pedido de una compañía japonesa que deseaba adquirir unos circuitos integrados para fabricar unas calculadoras que fueran capaces de llevar a cabo las cuatro operaciones fundamentales: sumar, restar, multiplicar y dividir. Los ingenieros de INTEL se dieron cuenta de que el circuito que diseñaban podía realizar toda clase de operaciones aritméticas y lógicas. Había nacido el primer microprocesador: una unidad central de proceso de cuatro bits que unida a las correspondientes memorias (también fabricables con circuitos integrados) formaban un microordenador.

A lo largo de la década de los setenta se fueron produciendo circuitos integrados con microprocesadores más potentes, y en 1981 la compañía IBM comercializó el primer ordenador personal (Personal Computer), cuyo sistema operativo de disco (DOS) había sido preparado por una pequeña empresa llamada MICROSOFT. Otras empresas (Xerox, Apple, etc.) introdujeron modos más simples e intuitivos para manejar los ordenadores personales que se han generalizado posteriormente. Actualmente, los microprocesadores comerciales contienen millones de transistores y cualquier ordenador doméstico es miles de veces más potente que los grandes centros de cálculo de hace unas décadas.

CONCLUSIONES

Esta ya larga historia de los inventos que han dado lugar a nuestra civilización de las máquinas se presta a algunas reflexiones provechosas.

En primer lugar y en relación con las máquinas térmicas que nos evitan el esfuerzo físico, hemos conseguido obtener energía mecánica quemando carbón, petróleo o gas natural en vez de consumir los nobles alimentos que proporcionaban la energía muscular de los animales o de nosotros mismos. Esto supone una liberación sin precedentes en la historia humana. En los países industrializados han desaparecido los trabajos más penosos, que son efectuados por máquinas o con ayuda de máquinas.



Fig. 5.— Satélite de comunicaciones Intelsat 6.

En segundo lugar, y pensando ahora en las máquinas que transmiten o procesan información, lo más llamativo es que todo se funda en un truco muy sencillo que denominamos digitalización. Sucede que todo cuanto vemos, oímos, hablamos o razonamos con lógica se puede codificar con sólo dos símbolos (puntos y rayas en telegrafía, o ceros y unos en los ordenadores). Estos símbolos se representan sin ambigüedad en circuitos eléctricos y, consecuentemente, podemos sustituir con máquinas todas las operaciones mentales rutinarias: cálculos, por complejos que sean, almacenamiento masivo de datos cambiantes, recuperación rápida de información, etc.

Conviene recordar, sin embargo, que a pesar de la expresión equívoca, que tanto se usa, «inteligencia artificial», las máquinas no pueden ni podrán nunca sustituir a los hombres en las actividades creativas, que son específicas del espíritu.

La historia de las máquinas muestra además unas diferencias que conviene señalar. Las máquinas de vapor inventadas en el siglo XVIII tuvieron un origen artesanal. La ciencia básica correspondiente —la termodinámica— no existía, y surgió precisamente del estudio de dichas máquinas. Y consecuencia de todo ello fue el establecimiento del principio de la conservación de la energía en fecha tan tardía como 1847.

La corriente eléctrica, que aparece en el siglo XIX, tiene en cambio un origen académico. Las leyes de la electricidad y del magnetismo son establecidas esencialmente por profesores universitarios. Las aplicaciones, por el contrario, son con frecuencia resultado del ingenio de inventores con conocimientos científicos no muy rigurosos. Es curioso recordar que el descubrimiento de los electrones data de 1897, cuando ya se disponía de una potentísima industria eléctrica. Durante un siglo se desarrollaron las aplicaciones de la corriente eléctrica, teniendo sólo de ella la vaga idea de que por los alambres circulaba un hipotético «fluido eléctrico», del cual todavía escriben los periodistas cuando, por avería, se produce una interrupción en el suministro de energía eléctrica.

Finalmente, la invención del transistor y sus aplicaciones, que se produce en la segunda mitad del siglo XX, tiene un origen empresarial. Son científicos e ingenieros de grandes compañías los responsables de la revolución informática que estamos viviendo. Son personas con formación universitaria, pero no motivados por razones aca-

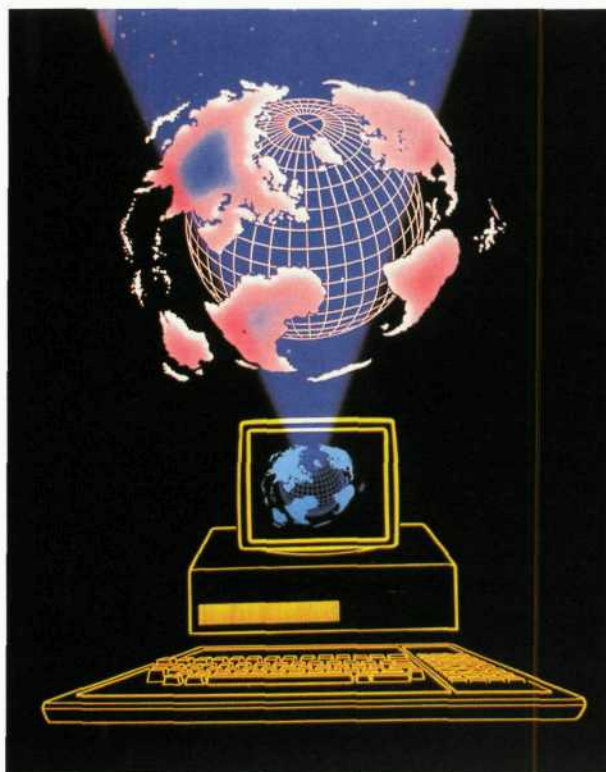


Fig. 6.— Ilustración simbólica de la red informática mundial de comunicación.

démicas o intelectuales sino por ánimo de lucro más o menos disimulado. Hay que insistir en que los transistores y sus aplicaciones no hubieran sido posibles sin un buen conocimiento previo de la estructura de la materia. Y ello a pesar de que entre el descubrimiento empírico del «efecto transistor» y su aplicación científica transcurrieron varios meses.

Todo esto nos enseña que el esquema tradicional que tanto se repite sin crítica es cuanto menos insuficiente. Según este esquema, el progreso económico se basa en un proceso que se inicia con la investigación fundamental, sigue con el desarrollo tecnológico, promueve así la economía, e incide finalmente sobre el comportamiento de la sociedad. Estas relaciones causa-efecto son muy atractivas, pero no ocurren en la realidad. Y por un motivo muy claro: la realidad es más compleja que los esquemas que inventamos para describirla.