
LA SOCIEDAD RED

MANUEL CASTELLS

Versión castellana de Carmen Martínez Gimeno y
Jesús Alborés

Segunda edición

Alianza Editorial

LA REVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

¿QUÉ REVOLUCIÓN?

El gradualismo, escribió el paleontólogo Stephen J. Gould, «la idea de que todo cambio debe ser suave, lento y constante, nunca se leyó de las rocas. Representó un sesgo cultural común, en parte una respuesta del liberalismo del siglo XIX a un mundo en revolución. Pero continúa empañando nuestra lectura, supuestamente objetiva, de la historia de la vida. [...] La historia de la vida, tal como yo la interpreto, es una serie de estados estables, salpicados a intervalos raros por acontecimientos importantes que suceden con gran rapidez y ayudan a establecer la siguiente etapa estable»¹. Mi punto de partida, y no soy el único que lo asume², es que, al final del siglo XX, hemos vivido uno de esos raros intervalos de la historia.

¹ Gould, 1980, pág. 226.

² Melvin Kranzberg, uno de los principales historiadores de la tecnología, escribió: «La era de la información ha revolucionado los elementos técnicos de la sociedad industrial» (1985, pág. 42). En cuanto a sus efectos sociales: «Aunque tenga un carácter evolutivo, en el sentido de que todos los cambios y beneficios no aparecerán de la noche a la mañana, sus efectos serán revolucionarios sobre nuestra sociedad» (ibid., pág. 52). En la misma línea de argumentación, véanse también, por ejemplo, Nora y Minc, 1978; Dizard, 1982; Pérez, 1983; Forester, 1985; Darbon y Robin, 1987; Stourdze, 1987; Dosi *et al.*, 1988a; Bishop y Waldholz, 1990; Salomon, 1992; Petrella, 1993; Ministerio de Correos y Telecomunicaciones (Japón), 1995; Negroponte, 1995.

Un intervalo caracterizado por la transformación de nuestra «cultura material»³ por obra de un nuevo paradigma tecnológico organizado en torno a las tecnologías de la información.

Por tecnología entiendo, en continuidad con Harvey Brooks y Daniel Bell, «el uso del conocimiento científico para especificar modos de hacer cosas de una manera *reproducible*»⁴. Entre las tecnologías de la información incluyo, como todo el mundo, el *conjunto convergente* de tecnologías de la microelectrónica, la informática (máquinas y *software*), las telecomunicaciones/televisión/radio y la optoelectrónica⁵. Además, a diferencia de algunos analistas, también incluyo en el ámbito de las tecnologías de la información la ingeniería genética y su conjunto de desarrollos y aplicaciones en expansión⁶. Ello es debido, en primer lugar, a que la ingeniería genética se centra en la decodificación, manipulación y reprogramación final de los códigos de información de la materia viva. Pero, también, porque la biología, la electrónica y la informática parecen estar convergiendo e interactuando en sus aplicaciones, en sus materiales y, lo que es más fundamental, en su planteamiento conceptual, tema que merece otra mención más adelante en este mismo capítulo⁷. En torno a este núcleo de tecnologías de la información, en el sentido amplio definido, se constituyó durante las dos últimas décadas del siglo XX una constelación de importantes descubrimientos en materiales avanzados, en fuentes de energía, en aplicaciones médicas, en técnicas de fabricación (en curso o potenciales, como la nanotecnología) y en la tecnología del transporte, entre otras⁸. Además, el proceso actual de transformación tecnológica se expande de forma exponencial por su capacidad para crear una interfaz entre los campos tecnológicos mediante un lenguaje digital común en el que la información se genera, se almacena, se recobra, se procesa y se transmite. Vivimos en un mundo que, en expresión de Nicholas Negroponte, se ha vuelto digital⁹.

La exageración profética y la manipulación ideológica que caracterizan a la mayoría de los discursos sobre la revolución de la tecnología de la información no deben llevarnos a menospreciar su verdadero significado

³ Sobre la definición de tecnología como «cultura material», que considero la perspectiva sociológica apropiada, véase su exposición en Fischer, 1992, págs. 1-32: «La tecnología es similar a la idea de cultura material».

⁴ Brooks, 1971, pág. 13, de un texto sin publicar, citado por Bell, que añade las cursivas (1976, pág. 29).

⁵ Saxby, 1990; Mulgan, 1991.

⁶ Hall, 1987; Marx, 1989.

⁷ Para un relato estimulante e informado, aunque deliberadamente polémico, sobre la convergencia entre la revolución biológica y la revolución de la tecnología de la información, más amplia, véase Kelly, 1995.

⁸ Forester, 1988; Edquist y Jacobsson, 1989; Herman, 1990; Drexler y Peterson, 1991; Lincoln y Essin, 1993; Dondero, 1995; Lovins y Lovins, 1995; Lyon y Gerner, 1995.

⁹ Negroponte, 1995.

fundamental. Es, como este libro tratará de mostrar, un acontecimiento histórico al menos tan importante como lo fue la revolución industrial del siglo XVIII, inductor de discontinuidad en la base material de la economía, la sociedad y la cultura. La relación histórica de las revoluciones tecnológicas, en la compilación de Melvin Kranzberg y Carroll Pursell¹⁰, muestra que todas se caracterizan por su *capacidad de penetración* en todos los dominios de la actividad humana no como una fuente exógena de impacto, sino como el paño con el que está tejida esa actividad. En otras palabras, *se orientan hacia el proceso*, además de inducir nuevos productos. Por otra parte, a diferencia de cualquier otra revolución, *el núcleo* de la transformación que estamos experimentando en la revolución en curso remite a *las tecnologías del procesamiento de la información y de la comunicación*¹¹. La tecnología de la información es a esta revolución lo que las nuevas fuentes de energía fueron a las sucesivas revoluciones industriales, de la máquina de vapor a los combustibles fósiles e incluso a la energía nuclear, ya que la generación y distribución de energía fue el elemento clave subyacente en la sociedad industrial. Sin embargo, esta declaración sobre el papel preeminente de la tecnología de la información se confunde con frecuencia con la caracterización de la revolución actual como esencialmente dependiente del nuevo conocimiento e información, lo cual es cierto para el actual proceso de cambio tecnológico, pero asimismo

¹⁰ Kranzberg y Pursell, 1967.

¹¹ La comprensión plena de la revolución tecnológica actual requeriría examinar la especificidad de las nuevas tecnologías de la información frente a sus antepasadas históricas de igual carácter revolucionario, como el descubrimiento de la imprenta en China probablemente a finales del siglo VII y en Europa en el siglo XV, tema clásico de la literatura sobre las comunicaciones. Ya que no puedo tratar el tema dentro de los límites de este libro, centrado en la dimensión sociológica del cambio tecnológico, permítaseme sugerir a la atención del lector unos cuantos puntos. Las tecnologías de la información basadas en la electrónica (incluida la impresión electrónica) presentan una capacidad incomparable de memoria y velocidad de combinación y transmisión de bits. El texto electrónico permite una flexibilidad de retroalimentación, interacción y configuración mucho mayor, como todo escritor que utilice un procesador de textos reconocerá, alterando de este modo el mismo proceso de comunicación. La comunicación en línea, combinada con la flexibilidad del texto, permite una programación de espacio/tiempo ubicua y asíncrona. En cuanto a los efectos sociales de las tecnologías de la información, propongo la hipótesis de que la profundidad de su impacto es una función de la capacidad de penetración de la información en la estructura social. Así, aunque la imprenta afectó de forma considerable a las sociedades europeas en la Edad Moderna, y a la China medieval en menor medida, sus efectos quedaron hasta cierto punto limitados por el analfabetismo general de la población y por la baja intensidad de la información en la estructura productiva. La sociedad industrial, al educar a los ciudadanos y organizar gradualmente la economía en torno al conocimiento y la información, preparó el terreno para que la mente humana contara con las facultades necesarias cuando se dispuso de las nuevas tecnologías de la información. Para un comentario histórico sobre esta primera revolución de la tecnología de la información, véase Boureau *et al.*, 1989. Para algunos elementos del debate sobre la especificidad tecnológica de la comunicación electrónica, incluida la perspectiva de McLuhan, véase el capítulo 5.

para las revoluciones tecnológicas precedentes, como han expuesto sobresalientes historiadores de la tecnología como Melvin Kranzberg y Joel Mokyr¹². La primera revolución industrial, si bien no se basó en la ciencia, contó con un amplio uso de la información, aplicando y desarrollando el conocimiento ya existente. Y la segunda revolución industrial, a partir de 1850, se caracterizó por el papel decisivo de la ciencia para fomentar la innovación. En efecto, los laboratorios de I+D aparecieron por vez primera en la industria química alemana en las últimas décadas del siglo XIX¹³.

Lo que caracteriza a la revolución tecnológica actual no es el carácter central del conocimiento y la información, sino la aplicación de ese conocimiento e información a aparatos de generación de conocimiento y procesamiento de la información/comunicación, en un círculo de retroalimentación acumulativo entre la innovación y sus usos¹⁴. Un ejemplo puede clarificar este análisis. Los empleos de las nuevas tecnologías de las telecomunicaciones en las dos últimas décadas han pasado por tres etapas diferenciadas: automatización de las tareas, experimentación de los usos y reconfiguración de las aplicaciones¹⁵. En las dos primeras etapas, la innovación tecnológica progresó mediante el aprendizaje *por el uso*, según la terminología de Rosenberg¹⁶. En la tercera etapa, los usuarios aprendieron tecnología *creándola* y acabaron reconfigurando las redes y encontrando nuevas aplicaciones. El círculo de retroalimentación entre la introducción de nueva tecnología, su utilización y su desarrollo en nuevos campos se hizo mucho más rápido en el nuevo paradigma tecnológico. Como resultado, la difusión de la tecnología amplifica infinitamente su poder al apropiársela y redefinirla sus usuarios. Las nuevas tecnologías de la información no son sólo herramientas que aplicar, sino procesos que desarrollar. Los usuarios y los creadores pueden ser los mismos. De este modo, los usuarios pueden tomar el control de la tecnología, como en el caso de Internet (véase más adelante este capítulo y el capítulo 5). De esto se deduce una estrecha relación entre los procesos sociales de creación y manipulación de símbolos (la cultura de la sociedad) y la capacidad de producir y distribuir bienes y servicios (las fuerzas productivas). Por primera vez en la historia, la mente humana es una fuerza productiva directa, no sólo un elemento decisivo del sistema de producción.

Así, los ordenadores, los sistemas de comunicación y la decodificación y programación genética son amplificadores y prolongaciones de la mente humana. Lo que pensamos y cómo pensamos queda expresado en bienes,

¹² M. Kranzberg, «Prerequisites for industrialization», en Kranzberg y Pursell, 1967, vol. I, cap. 13; Mokyr, 1990.

¹³ Ashton, 1948; Clow y Clow, 1952; Landes, 1969; Mokyr, 1990, pág. 112.

¹⁴ Dizard, 1982; Forester, 1985; Hall y Preston, 1988; Saxby, 1990.

¹⁵ Bar, 1990.

¹⁶ Rosenberg, 1982; Bar, 1992.

servicios, producción material e intelectual, ya sea alimento, refugio, sistemas de transporte y comunicación, ordenadores, misiles, salud, educación o imágenes. La integración creciente entre mentes y máquinas, incluida la máquina del ADN, está borrando lo que Bruce Mazlish denomina «la cuarta discontinuidad»¹⁷ (la existente entre humanos y máquinas), alterando de forma fundamental el modo en que nacemos, vivimos, aprendemos, trabajamos, producimos, consumimos, soñamos, luchamos o morimos. Por supuesto, los contextos culturales/institucionales y la acción social intencionada interactúan decisivamente con el nuevo sistema tecnológico, pero este sistema lleva incorporada su propia lógica, caracterizada por la capacidad de traducir todos los aportes a un sistema de información común y procesar esa información a una velocidad creciente, con una potencia en aumento, a un coste decreciente, en una red de recuperación y distribución potencialmente ubicua.

Existe un rasgo adicional que caracteriza a la revolución de la tecnología de la información comparada con sus predecesoras históricas. Mokyr¹⁸ ha expuesto que las revoluciones tecnológicas se dieron sólo en unas cuantas sociedades y se difundieron en un área geográfica relativamente limitada, viviendo a menudo en un espacio y tiempo aislados con respecto a otras regiones del planeta. Así, mientras los europeos tomaron algunos de los descubrimientos realizados en China, durante muchos siglos, China y Japón sólo adoptaron la tecnología europea de forma muy limitada, restringiéndose fundamentalmente a las aplicaciones militares. El contacto entre civilizaciones de diferentes niveles tecnológicos con frecuencia tomó la forma de la destrucción de la menos desarrollada o de aquellas que no habían aplicado su conocimiento sobre todo a la tecnología militar, como fue el caso de las civilizaciones americanas aniquiladas por los conquistadores españoles, a veces mediante la guerra biológica accidental¹⁹. La revolución industrial se extendió a la mayor parte del globo desde sus tierras originales de Europa Occidental durante los dos siglos posteriores. Pero su expansión fue muy selectiva y su ritmo, muy lento para los parámetros actuales de difusión tecnológica. En efecto, incluso en la Gran Bretaña de mediados del siglo XIX, las nuevas tecnologías industriales no habían afectado a sectores que representaban la mayoría de la mano de obra y al menos la mitad del producto nacional bruto²⁰. Además, su alcance planetario en las décadas siguientes las más de las veces tomó la forma de dominación colonial, ya fuera en India bajo el Imperio Británico; en América Latina bajo la dependencia comercial/industrial de Gran Bretaña y Estados Unidos; en el desmembramiento de África bajo

¹⁷ Mazlish, 1993.

¹⁸ Mokyr, 1990, págs. 293, 209 ss.

¹⁹ Véase, por ejemplo, Thomas, 1993.

²⁰ Mokyr, 1990, pág. 83.

el Tratado de Berlín; o en la apertura al comercio exterior de Japón y China por los cañones de los barcos occidentales. En contraste, las nuevas tecnologías de la información se han extendido por el globo a una velocidad vertiginosa en menos de dos décadas, de mediados de la década de 1970 a mediados de la de 1990, exhibiendo una lógica que propongo como característica de esta revolución tecnológica: la aplicación inmediata para su propio desarrollo de las tecnologías que genera, enlazando el mundo mediante la tecnología de la información²¹. Sin duda alguna, existen grandes áreas del mundo y considerables segmentos de población desconectados del nuevo sistema tecnológico: éste es precisamente uno de los argumentos centrales de este libro. Además, la velocidad de la difusión tecnológica es selectiva, tanto social como funcionalmente. La oportunidad diferencial en el acceso al poder de la tecnología para las gentes, los países y las regiones es una fuente crítica de desigualdad en nuestra sociedad. Las zonas desconectadas son discontinuas cultural y espacialmente: se encuentran en los centros deprimidos de las ciudades estadounidenses o en las *banlieues* francesas, así como en los poblados de chozas de África o en las regiones rurales desposeídas de China o India. No obstante, en los albores del siglo XXI, las funciones dominantes, los grupos sociales y los territorios de todo el globo están conectados en un nuevo sistema tecnológico, que no comenzó a tomar forma como tal hasta los años setenta.

¿Cómo ocurrió esta transformación fundamental en lo que viene a ser un instante histórico? ¿Por qué se está difundiendo por todo el globo a un paso tan acelerado aunque desigual? ¿Por qué es una «revolución»? Puesto que a nuestra experiencia de lo nuevo le da forma nuestro pasado reciente, creo que para responder a estas preguntas básicas sería útil hacer un breve recordatorio del curso histórico de la revolución industrial, aún presente en nuestras instituciones y, por tanto, en nuestro marco mental.

LECCIONES DE LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

Los historiadores han mostrado que hubo al menos dos revoluciones industriales: la primera comenzó en el último tercio del siglo XVIII, se caracterizó por nuevas tecnologías como la máquina de vapor, la hiladora de varios husos, el proceso Cort en metalurgia y, en un sentido más general, por la sustitución de las herramientas por las máquinas; la segunda, unos cien años después, ofreció el desarrollo de la electricidad, el motor de combustión interna, la química basada en la ciencia, la fundición de acero eficiente y el comienzo de las tecnologías de la comunicación, con

²¹ Pool, 1990; Mulgan, 1991.

la difusión del telégrafo y la invención del teléfono. Entre las dos existen continuidades fundamentales, así como algunas diferencias críticas, la principal de las cuales es la importancia decisiva del conocimiento científico para producir y dirigir el desarrollo tecnológico desde 1850²². Precisamente debido a sus diferencias, los rasgos comunes a ambas pueden ofrecer una percepción preciosa para comprender la lógica de las revoluciones tecnológicas.

Ante todo, en ambos casos, somos testigos de lo que Mokyr describe como un periodo de «cambio tecnológico acelerado y sin precedentes» según los parámetros históricos²³. Un conjunto de macroinvenciones prepararon el terreno para el florecimiento de las microinvenciones en el campo de la agricultura, la industria y las comunicaciones. En la base material de la especie humana se introdujo de manera irreversible una discontinuidad histórica fundamental, en un proceso de trayectoria dependiente, cuya lógica secuencial interna ha sido investigada por Paul David y teorizada por Brian Arthur²⁴. En efecto, hubo «revoluciones» en el sentido de que la aparición repentina e inesperada de unas aplicaciones tecnológicas transformó los procesos de producción y distribución, creó un aluvión de nuevos productos y cambió decisivamente la ubicación de la riqueza y el poder en un planeta que de repente quedó al alcance de aquellos países y elites capaces de dominar el nuevo sistema tecnológico. El lado oscuro de esta aventura tecnológica es que estuvo inextricablemente unida a las ambiciones imperialistas y a los conflictos interimperialistas.

No obstante, ésta es precisamente una confirmación del carácter revolucionario de las nuevas tecnologías industriales. El ascenso histórico del denominado Occidente, limitado de hecho a Gran Bretaña y un puñado de naciones de Europa Occidental, así como a su prole norteamericana, está ligado sobre todo a la superioridad tecnológica lograda durante las dos revoluciones industriales²⁵. Nada de la historia cultural, científica, política o militar del mundo previo a la revolución industrial explicaría la indisputable supremacía «occidental» (anglosajona/alemana, con un toque fran-

²² Singer *et al.*, 1958; Mokyr, 1985. Sin embargo, como el mismo Mokyr señala, en la primera revolución industrial inglesa también hubo interacción de la ciencia y la tecnología. Así, la mejora decisiva de Watt de la máquina de vapor diseñada por Newcomen tuvo lugar en interacción con su amigo y protector Joseph Black, profesor de química de la Universidad de Glasgow, donde Watts fue nombrado en 1957 «Diseñador del Instrumento Matemático de la Universidad» y donde dirigió sus propios experimentos con un modelo de la máquina de Newcomen (véase Dickinson, 1958). En efecto, Ubbelohde (1958, pág. 673) informa que «el desarrollo de Watt de un condensador para el vapor, separado del cilindro en el que se movía el pistón, estaba estrechamente ligado e inspirado por las investigaciones científicas de Joseph Black (1728-1799), profesor de química de la Universidad de Glasgow».

²³ Mokyr, 1990, pág. 82.

²⁴ David, 1975; David y Bunn, 1988; Arthur, 1989.

²⁵ Rosenberg y Birdzell, 1986.

cés) entre 1750 y 1950. China fue una cultura muy superior durante la mayor parte de la historia anterior al Renacimiento; la civilización musulmana (tomándose la libertad de utilizar este término) dominó buena parte del Mediterráneo y ejerció una influencia significativa en África durante toda la Edad Moderna; Asia y África permanecieron en general organizadas en torno a centros culturales y políticos autónomos; Rusia gobernó en un aislamiento espléndido sobre una vasta extensión a lo largo de Europa Oriental y Asia; y el Imperio Español, la cultura europea rezagada de la revolución industrial, fue la principal potencia mundial durante más de dos siglos desde 1492. La tecnología, como expresión de condiciones sociales específicas, introdujo una nueva trayectoria histórica en la segunda mitad del siglo XVIII.

Esta trayectoria se originó en Gran Bretaña, aunque se pueden seguir los rastros de sus raíces intelectuales por toda Europa, hasta el espíritu de descubrimiento del Renacimiento²⁶. En efecto, algunos historiadores sostienen que el conocimiento científico necesario subyacente en la primera revolución industrial se hallaba disponible cien años antes, listo para su uso en condiciones sociales maduras; o, como sostienen otros, esperando el ingenio técnico de inventores autodidactas, como Newcomen, Watts, Crompton o Arkwright, capaces de traducir el conocimiento disponible, combinado con la experiencia artesanal, en nuevas y decisivas tecnologías industriales²⁷. Sin embargo, la segunda revolución industrial, más dependiente del nuevo conocimiento científico, cambió sus centros de gravedad hacia Alemania y Estados Unidos, donde se dieron los principales avances en química, electricidad y telefonía²⁸. Los historiadores han analizado minuciosamente las condiciones sociales de la geografía cambiante de la innovación tecnológica, centrándose con frecuencia en las características de los sistemas de educación y ciencia o en la institucionalización de los derechos de propiedad. Sin embargo, la explicación contextual para la trayectoria desigual de la innovación tecnológica parece ser excesivamente amplia y abierta a interpretaciones alternativas. Hall y Preston, en su análisis de la geografía cambiante de la innovación tecnológica entre 1846 y 2003, muestran la importancia de los medios *locales* de innovación, entre los cuales Berlín, Nueva York y Boston se constituyeron como los «centros industriales de alta tecnología del mundo» entre 1880 y 1914, mientras que «Londres en ese periodo era una pálida sombra de Berlín»²⁹. La razón estriba en la base territorial para la interacción de los sistemas de descubrimiento tecnoló-

²⁶ Singer *et al.*, 1957.

²⁷ Rostow, 1975; véase Jewkes *et al.*, 1969 para el argumento y Singer *et al.*, 1958 para las pruebas históricas.

²⁸ Mokyr, 1990.

²⁹ Hall y Preston, 1988, pág. 123.

gico y su aplicación, es decir, en las propiedades sinérgicas de lo que se conoce en la literatura como «medios de innovación»³⁰.

En efecto, los avances tecnológicos llegaron en racimos, interactuando unos con otros en un proceso de rendimientos crecientes. Sean cuales fueren las condiciones que determinaron ese agrupamiento, la lección clave que debe retenerse es que *la innovación tecnológica no es un acontecimiento aislado*³¹. Refleja un estado determinado de conocimiento, un entorno institucional e industrial particular, una cierta disponibilidad de aptitudes para definir un problema técnico y resolverlo, una mentalidad económica para hacer que esa aplicación sea rentable, y una red de productores y usuarios que puedan comunicar sus experiencias de forma acumulativa, aprendiendo al utilizar y crear: las elites aprenden creando, con lo que modifican las aplicaciones de la tecnología, mientras que la mayoría de la gente aprende utilizando, con lo que permanece dentro de las limitaciones de los formatos de la tecnología. La interactividad de los sistemas de innovación tecnológica, y su dependencia de ciertos «medios» de intercambio de ideas, problemas y soluciones, es un rasgo crítico que cabe generalizar de la experiencia de pasadas revoluciones a la actual³².

Los efectos positivos de las nuevas tecnologías industriales sobre el crecimiento económico, los niveles de vida y el dominio humano de una naturaleza hostil (reflejado en el alargamiento espectacular de la esperanza de vida, que no había mejorado de forma constante antes de 1750) a largo plazo son indiscutibles en la relación histórica. Sin embargo, no llegaron pronto, a pesar de la difusión de la máquina de vapor y la nueva maquinaria. Mokyr nos recuerda que

el consumo per cápita y los niveles de vida aumentaron poco al principio [al final del siglo XVIII], pero las tecnologías de producción cambiaron de forma espectacular en muchas industrias y sectores, preparando el camino para el crecimiento schumpeteriano sostenido en la segunda mitad del siglo XIX, cuando el progreso tecnológico se extendió a las industrias que no se habían visto afectadas previamente³³.

³⁰ El origen del concepto de «medio de innovación» puede atribuirse a Aydalot, 1985. También estaba presente de forma implícita en la obra de Anderson, 1985, y en el análisis de Arthur, 1985. En torno a las mismas fechas, Peter Hall y yo en Berkeley, Roberto Camagni en Milán y Denis Maillat en Lausanne, junto con Philippe Aydalot brevemente, poco antes de que falleciera, comenzamos a desarrollar análisis empíricos de los medios de innovación, un tema que, con toda razón, se ha convertido en un campo de investigación en la década de los noventa.

³¹ Dentro de los límites de este capítulo no puede hacerse una exposición específica de las condiciones históricas precisas para un agrupamiento de innovaciones tecnológicas. Pueden encontrarse interesantes reflexiones sobre el tema en Gille, 1978, y Mokyr, 1990. Véase también Mokyr, 1990, pág. 298.

³² Rosenberg, 1976, 1982; Dosi, 1988.

³³ Mokyr, 1990, pág. 83.

Se trata de una afirmación crucial que obliga a evaluar los efectos reales de los principales cambios tecnológicos, considerando un lapso de tiempo muy dependiente de las condiciones específicas de cada sociedad. Sin embargo, la relación histórica parece indicar que, en términos generales, cuanto más estrecha sea la relación entre los emplazamientos de la innovación, la producción y el uso de las nuevas tecnologías, más rápida será la transformación de las sociedades y mayor la retroalimentación positiva de las condiciones sociales sobre las condiciones generales necesarias para que haya más innovaciones. Así, en España, la revolución industrial se difundió rápidamente en Cataluña desde finales del siglo XVIII, pero siguió un ritmo mucho más lento en el resto del país, sobre todo en Madrid y en el sur; sólo el País Vasco y Asturias se habían unido al proceso de industrialización a finales del siglo XIX³⁴. Las fronteras de la innovación industrial coincidieron en buena medida con las zonas prohibidas al comercio con las colonias hispanoamericanas durante casi dos siglos: mientras que las elites andaluza y castellana, así como la Corona, podían vivir de sus rentas americanas, los catalanes tenían que mantenerse con su comercio e ingenio, sometidos como estaban a la presión de un estado centralista. Como resultado en parte de esta trayectoria histórica, Cataluña y el País Vasco fueron las únicas regiones realmente industrializadas hasta la década de 1950 y los principales semilleros de actividades empresariales e innovación, en pronunciado contraste con las tendencias del resto de España. De este modo, las condiciones sociales específicas fomentan la innovación tecnológica, que se introduce en el camino del desarrollo económico y produce más innovación. No obstante, la reproducción de estas condiciones es cultural e institucional, pero también económica y tecnológica. La transformación de los entornos sociales e institucionales puede alterar el ritmo y la geografía del desarrollo tecnológico (por ejemplo, Japón tras la Restauración Meiji o Rusia durante un breve periodo bajo Stolypin), si bien la historia presenta una inercia considerable.

Una última y esencial lección de las revoluciones industriales, que considero importante para este análisis, es polémica: aunque ambas brindaron todo un despliegue de nuevas tecnologías que formaron y transformaron un sistema industrial en etapas sucesivas, su núcleo lo constituyó la innovación fundamental en la generación y distribución de la energía. R. J. Forbes, un historiador clásico de la tecnología, sostiene que «la invención de la máquina de vapor es el hecho central de la revolución industrial», que sería seguido por la introducción de los nuevos generadores de fuerza motriz y del generador móvil, con el que «podía crearse la energía de la máquina de vapor donde se necesitaba y en el grado deseado»³⁵. Y aunque Mokyr insiste en el carácter polifacético de la revolución indus-

³⁴ Fontana, 1988; Nadal y Carreras, 1990.

³⁵ Forbes, 1958, pág. 150.

trial, también cree que «a pesar de las protestas de algunos historiadores económicos, se sigue considerando a la máquina de vapor como la invención más esencial de la revolución industrial»³⁶. La electricidad fue la energía central de la segunda revolución, pese a otros avances extraordinarios en la química, el acero, el motor de combustión interna, el telégrafo y la telefonía. Ello se debe a que sólo mediante la generación y la distribución de la electricidad todos los otros campos fueron capaces de desarrollar sus aplicaciones y conectarse entre sí. Un caso a propósito es el del telégrafo eléctrico que, utilizado por primera vez de forma experimental en la década de 1790 y ampliamente extendido en 1837, sólo pudo convertirse en una red de comunicación que conectara al mundo a gran escala cuando pudo depender de la difusión de la electricidad. Su uso extendido a partir de la década de 1870 cambió el transporte, el telégrafo, la iluminación y, no menos importante, el trabajo de las fábricas, al difundir energía bajo la forma del motor eléctrico. En efecto, aunque se ha asociado a las fábricas con la primera revolución industrial, de hecho durante casi un siglo no fueron concomitantes al uso de la máquina de vapor, que se utilizaba mucho en los talleres artesanales, mientras que bastantes grandes fábricas continuaban empleando fuentes de energía hidráulica mejoradas (por lo que fueron conocidas durante largo tiempo como *mills*, molinos). Fue el motor eléctrico el que hizo posible e indujo una organización del trabajo a gran escala en la fábrica industrial³⁷. Como escribió R. J. Forbes (en 1958):

Durante los últimos doscientos cincuenta años, cinco grandes generadores nuevos de fuerza motriz han producido lo que suele llamarse la Era de la Máquina. El siglo XVIII trajo la máquina de vapor; el siglo XIX, la turbina de agua, el motor de combustión interna y la turbina de vapor; y el siglo XX, la turbina de gas. Los historiadores han acuñado con frecuencia expresiones pegadizas para denotar movimientos o corrientes de la historia. Una de ellas es «la revolución industrial», título de un desarrollo del que suele decirse que se inició a comienzos del siglo XVIII y se extendió a lo largo de gran parte del XIX. Fue un movimiento lento, pero trajo aparejados cambios tan profundos en su combinación de progreso material y dislocación social que muy bien pudiera describirse colectivamente como revolucionario si consideramos esas fechas extremas³⁸.

³⁶ Mokyr, 1990, pág. 84.

³⁷ Jarvis, 1958; Canby, 1962; Hall y Preston, 1988. Una de las primeras especificaciones detalladas de un telégrafo eléctrico se encuentra en una carta firmada C. M. y publicada en *Scots Magazine* en 1753. Uno de los primeros experimentos prácticos con un sistema eléctrico fue propuesto por el catalán Francisco de Salva en 1795. Hay informes sin confirmar de que en 1798 se llegó a construir entre Madrid y Aranjuez (42 km) un telégrafo de un solo alambre según el esquema de Salva. Sin embargo, el telégrafo eléctrico no se estableció hasta la década de 1830 (William Cooke en Inglaterra y Samuel Morse en Estados Unidos); en 1851 se tendió el primer cable submarino entre Dover y Calais (Garratt, 1958); véase también Sharlin, 1967; Mokyr, 1990.

³⁸ Forbes, 1958, pág. 148.

De este modo, actuando sobre el proceso en el núcleo de todos los procesos, esto es, la energía necesaria para producir, distribuir y comunicar, las dos revoluciones industriales se difundieron por todo el sistema económico y calaron todo el tejido social. Las fuentes de energía baratas, accesibles y móviles extendieron y aumentaron el poder del cuerpo humano, creando la base material para la continuación histórica de un movimiento similar encaminado a la expansión de la mente humana.

LA SECUENCIA HISTÓRICA DE LA REVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

La breve aunque intensa historia de la revolución de la tecnología de la información ha sido contada tantas veces en los años recientes que no resulta necesario proporcionar al lector otro relato completo sobre ella³⁹. Además, dada la aceleración de su ritmo, cualquier relato de ese tipo se quedaría obsoleto de inmediato, ya que entre esta escritura y su lectura (digamos dieciocho meses) los microchips habrán duplicado sus rendimientos para un precio determinado, según la «ley de Moore», generalmente aceptada⁴⁰. Sin embargo, considero útil desde el punto de vista analítico recordar los principales ejes de la transformación tecnológica en la generación/procesamiento/transmisión de la información y situarla en la secuencia que condujo a la formación de un nuevo paradigma socio-técnico⁴¹. Este breve resumen me permitirá, más tarde, soslayar referencias a los rasgos tecnológicos cuando se exponga su interacción específica con la economía, la cultura y la sociedad a través del itinerario intelectual de este libro, excepto cuando se requieran nuevos elementos de información.

³⁹ Una buena historia de los orígenes de la revolución de la tecnología de la información, superada, naturalmente, por los acontecimientos que han ocurrido desde los años ochenta, es la de Braun y Macdonald, 1982. El esfuerzo más sistemático por resumir los desarrollos de la fase temprana de la revolución en la tecnología de la información es la serie de libros de Tom Forester, 1980, 1985, 1987, 1989, 1993. Buenas exposiciones de los orígenes de la ingeniería genética son las de Russell, 1988, y Elkington, 1985. Una autorizada historia de la informática es la de Ceruzzi, 1998. Para la historia de Internet, véanse Abbate, 1999, y Naughton, 1999.

⁴⁰ Una «ley» aceptada en la industria electrónica, cuyo origen es debido a Gordon Moore, presidente de Intel, la legendaria compañía que empezó en Silicon Valley y hoy es la mayor del mundo y una de las más rentables de la microelectrónica.

⁴¹ La información presentada en este capítulo generalmente es accesible en periódicos y revistas. Extraje gran parte de ella de *Business Week*, *The Economist*, *Wired*, *Scientific American*, *New York Times*, *El País* y *San Francisco Chronicle*, que constituyen mis fuentes de información básica diaria o semanal. También proviene de charlas ocasionales sobre temas tecnológicos con colegas y amigos del entorno de Berkeley y Stanford, expertos en electrónica y biología, y al corriente de las tendencias en el mundo empresarial. No considero necesario proporcionar referencias detalladas sobre datos tan generales, excepto cuando una estadística o cita determinadas sean difíciles de encontrar.

La microingeniería de los macrocambios: electrónica e información

Aunque pueden encontrarse precedentes científicos e industriales de las tecnologías de la información basadas en la electrónica unas décadas antes de 1940⁴² (no siendo la menos importante la invención del teléfono por Bell en 1876, de la radio por Marconi en 1898 y del tubo de vacío por De Forest en 1906), fue durante la Segunda Guerra Mundial y el periodo subsiguiente cuando tuvieron lugar los principales avances tecnológicos en la electrónica: el primer ordenador programable y el transistor, fuente de la microelectrónica, el verdadero núcleo de la revolución de la tecnología de la información en el siglo XX⁴³. No obstante, hasta la década de los setenta no se difundieron ampliamente las tecnologías de la información, acelerando su desarrollo sinérgico y convergiendo en un nuevo paradigma. Sigamos las etapas de la innovación en los tres principales campos tecnológicos que, aunque estrechamente interrelacionados, constituyen la historia de las tecnologías basadas en la electrónica: la microelectrónica, los ordenadores y las telecomunicaciones.

El transistor, inventado en 1947 en los Laboratorios Bell de Murray Hill (Nueva Jersey) por tres físicos, Bardeen, Brattain y Shockley (ganadores del Premio Nobel por este descubrimiento), hizo posible procesar los impulsos eléctricos a un ritmo más rápido en un modo binario de interrupción y paso, con lo que se posibilitó la codificación de la lógica y la comunicación con máquinas y entre ellas: denominamos a estos dispositivos de procesamiento semiconductores y la gente comúnmente los llama chips (en realidad formados por millones de transistores). El primer paso para la difusión del transistor se dio con la invención efectuada por Shockley del transistor de contacto en 1951. No obstante, su fabricación y uso extendido requerían nuevas tecnologías de fabricación y la utilización de un material apropiado. El paso al silicio, construyendo la nueva revolución literalmente sobre la arena, fue efectuado por primera vez por Texas Instruments (en Dallas) en 1945 (cambio facilitado por la contratación en 1953 de Gordon Teal, otro sobresaliente científico de los Laboratorios Bell). La invención del proceso planar en 1959 por Fairchild Semiconductors (en Silicon Valley) abrió la posibilidad de integrar componentes miniaturizados con una fabricación de precisión.

No obstante, el paso decisivo en la microelectrónica se había dado en 1957: el circuito integrado fue coinventado por Jack Kilby, ingeniero de Texas Instruments (que lo patentó) y Bob Noyce, uno de los creadores

⁴² Véase Hall y Preston, 1988; Mazlish, 1993.

⁴³ Creo que, como en el caso de la revolución industrial, habrá varias revoluciones de la tecnología de la información, de las cuales la que se constituyó en los años setenta es sólo la primera. Es probable que la segunda, a comienzos del siglo XXI, otorgue un papel más importante a la revolución biológica, en estrecha interacción con las nuevas tecnologías informáticas.

de Fairchild. Pero fue Noyce quien los fabricó primero, utilizando el proceso planar. Desató una explosión tecnológica: en sólo tres años, entre 1959 y 1962, los precios de los semiconductores cayeron un 85% y en los diez años siguientes la producción se multiplicó por veinte, el 50% de la cual fue para usos militares⁴⁴. Como comparación histórica, el precio de la tela de algodón tardó setenta años (1780-1850) en caer un 85% en Gran Bretaña durante la revolución industrial⁴⁵. Luego, el movimiento se aceleró durante la década de los sesenta: cuando mejoró la tecnología de fabricación y se contó para el perfeccionamiento del diseño de los chips con poderosos ordenadores que utilizaban dispositivos microelectrónicos más rápidos y potentes, el precio medio de un circuito integrado cayó de 50 dólares en 1962 a 1 dólar en 1971.

El salto gigante hacia adelante en la difusión de la microelectrónica en todas las máquinas llegó en 1971 con la invención efectuada por un ingeniero de Intel, Ted Hoff (también en Silicon Valley), del microprocesador, esto es, el ordenador en un chip. De este modo, la capacidad de procesar información podía instalarse en todas partes. Estaba en marcha la carrera en pos de una capacidad de integración cada vez mayor de circuitos en un único chip, con la tecnología del diseño y la fabricación en superación constante de los límites de integración que con anterioridad se consideraban físicamente imposibles a menos que se abandonara el material de silicio. A mediados de la década de 1990, las valoraciones técnicas todavía otorgaban diez o veinte años de buena vida a los circuitos basados en el silicio, si bien se había acometido la investigación sobre materiales alternativos. El grado de integración ha progresado a pasos agigantados en las dos últimas décadas. Aunque los detalles técnicos no tienen cabida en este libro, resulta importante desde el punto de vista analítico indicar la velocidad y extensión del cambio tecnológico.

Como es sabido, la potencia de los chips puede evaluarse mediante una combinación de tres características: su capacidad de integración, indicada por la mínima anchura de las líneas del chip, medida en micras (1 micra = 1 millonésima parte de un metro); su capacidad de memoria, medida en bits: miles (k) y millones (megabits); y la velocidad del microprocesador, medida en megahercios. Así, el primer procesador de 1971 se presentó en líneas de unas 6,5 micras; en 1980 alcanzó 4 micras; en 1987, 1 micra; en 1995, el chip del Pentium de Intel presentaba un tamaño de 0,35 de micra; y se proyectaba alcanzar 0,25 de micra en 1999. De este modo, donde en 1971 se insertaban 2.300 transistores en un chip del tamaño de una chincheta, en 1993 había 35 millones de transistores. La capacidad de memoria, indicada por la capacidad DRAM (*Dynamic Random Access Memory*), era en 1971 de 1.024 bits; en 1980, de 64.000; en 1987, de

⁴⁴ Braun y Macdonald, 1982.

⁴⁵ Mokyr, 1990, pág. 111.

1.024.000; en 1993, de 16.384.000; y la proyectada para 1999 era de 256.000.000. En lo que respecta a la velocidad, a mediados de los noventa los microprocesadores de 64 bits eran 550 veces más rápidos que el primer chip Intel de 1972; y las MPU se duplican cada dieciocho meses. Las proyecciones para 2002 prevén una aceleración de la tecnología de la microelectrónica en integración (chips de 0,18 micras), capacidad DRAM (1.024 megabits) y velocidad del microprocesador (más de 500 megahercios en comparación con los 150 de 1993). Combinado con los avances espectaculares en el procesamiento paralelo de microprocesadores múltiples (incluida, en el futuro, la unión de microprocesadores múltiples en un solo chip), parece que el poder de la microelectrónica aún está liberándose, con lo que la capacidad informática va aumentando de forma inexorable. Además, la mayor miniaturización, la mayor especialización y el descenso de los precios de los chips cada vez más potentes hicieron posible colocarlos en todas las máquinas de nuestra vida cotidiana, desde los lavavajillas y los hornos microondas hasta los automóviles, cuya electrónica, en los modelos estándar de la década de 1990, era más valiosa que su acero.

Los ordenadores también fueron concebidos por la Segunda Guerra Mundial, madre de todas las tecnologías, pero no nacieron hasta 1946 en Filadelfia, si se exceptúan los aparatos de uso bélico, como el Colossus británico de 1943, aplicado a descifrar los códigos enemigos, y el Z-3 alemán, al parecer producido en 1941 para ayudar a los cálculos de la aviación⁴⁶. No obstante, la mayor parte del esfuerzo aliado en electrónica se concentró en los programas de investigación del MIT, y la experimentación real del poder de cálculo, bajo el patrocinio del ejército estadounidense, se realizó en la Universidad de Pennsylvania, donde Mauchly y Eckert produjeron en 1946 el primer ordenador con fines generales, el ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Calculator). Los historiadores recordarán que el primer ordenador electrónico pesaba 30 toneladas, fue construido en módulos de metal de dos metros y medio de altura, tenía 70.000 resistores y 18.000 tubos de vacío, y ocupaba la superficie de un gimnasio. Cuando se prendía, su consumo eléctrico era tan alto que la red eléctrica de Filadelfia titilaba⁴⁷.

No obstante, la primera versión comercial de esta máquina primitiva, UNIVAC-1, producida en 1951 por el mismo equipo, entonces bajo la marca Remington Rand, tuvo un gran éxito en el procesamiento del censo estadounidense de 1950. IBM, también respaldada por contratos militares y basándose en parte en la investigación del MIT, superó sus primeras reservas hacia la era del ordenador y entró en la carrera en 1953 con su máquina de tubo de vacío 701. En 1958, cuando Sperry Rand presentó un ordenador *mainframe* (nombre que hacía referencia a las enor-

⁴⁶ Hall y Preston, 1988.

⁴⁷ Véase la descripción de Forester, 1987.

mes cajas metálicas donde se alojaban las unidades centrales de proceso) de segunda generación, IBM le siguió de inmediato con su modelo 7090. Pero hasta 1964, con su ordenador *mainframe* 360/370, no llegó a dominar la industria de los ordenadores, poblada por nuevas empresas de máquinas de oficina (Control Data, Digital) y antiguas (Sperry, Honeywell, Burroughs, NCR), la mayoría de las cuales en la década de 1990 no vivían sus mejores momentos o habían desaparecido: así de rápido ha actuado la «destrucción creativa» schumpeteriana en la industria electrónica. En esa época antigua, es decir, treinta años antes de que se escribiera este texto, la industria se organizó en una jerarquía bien definida de *mainframes*, miniordenadores (en realidad, máquinas bastante voluminosas) y terminales, dejando alguna especialidad informática al esotérico mundo de los superordenadores (una fertilización cruzada de predicción meteorológica y juegos bélicos), donde el extraordinario genio de Seymour Cray, pese a su falta de visión tecnológica, reinó durante algún tiempo.

La microelectrónica cambió todo esto al introducir una «revolución dentro de la revolución». El advenimiento del microprocesador en 1971, con la capacidad de colocar un ordenador en un chip, cambió de arriba abajo el mundo de la electrónica y, en realidad, el mundo. En 1975, Ed Roberts, un ingeniero que había creado una pequeña compañía de calculadoras, la MITS, en Albuquerque (Nuevo México), construyó una caja de cálculo con el increíble nombre de Altair, por un personaje de la serie de televisión *Star Trek* que era objeto de la admiración de su niña. La máquina era primitiva, pero estaba construida como un ordenador de pequeña escala en torno a un microprocesador. Fue la base para el diseño del Apple I y luego del Apple II, el primer microordenador comercializado con éxito, realizado en el garaje de las casas paternas por dos jóvenes que habían abandonado los estudios, Steve Wozniak y Steve Jobs, en Menlo Park (Silicon Valley), en una saga verdaderamente extraordinaria que ahora ya se ha convertido en la leyenda fundadora de la era de la información. Lanzada en 1976 con tres socios y 91.000 dólares como capital, Apple Computers ya había alcanzado en 1992 583 millones en ventas, anunciando la era de la difusión del poder del ordenador. IBM reaccionó rápido y en 1981 presentó su versión propia de microordenador con un nombre brillante: el Ordenador Personal (PC), que se convirtió de hecho en el acrónimo de los miniordenadores. Pero debido a que no se basó en tecnología propia, sino en la desarrollada para IBM por otras fuentes, se volvió vulnerable al clonaje, de inmediato practicado a escala masiva, sobre todo en Asia. No obstante, aunque este hecho acabó sentenciando su dominio del negocio en ordenadores personales, también extendió por todo el mundo el uso de los clónicos de IBM, difundiendo un estándar común, pese a la superioridad de las máquinas de Apple. El Macintosh de Apple, lanzado en 1984, fue el primer paso hacia una informática fácil para el usuario, con la introducción de la tecnología de la interfaz de

usuario basada en el icono, desarrollada originalmente en el Centro de Investigación de Palo Alto de Xerox.

Con el desarrollo de un nuevo *software* adaptado a su funcionamiento, se cumplió una condición fundamental para la difusión de los microordenadores⁴⁸. El *software* para los ordenadores personales también surgió a mediados de los años setenta por el entusiasmo generado por Altair: dos jóvenes que habían abandonado sus estudios en Harvard, Bill Gates y Paul Allen, adaptaron el BASIC para que funcionara en la máquina Altair en 1976. Cuando comprendieron todas sus posibilidades, fundaron Microsoft (primero en Albuquerque, para trasladarse dos años después a Seattle, donde vivían los padres de Gates), gigante del *software* actual que transformó el dominio del *software* del sistema operativo en dominio del *software* del mercado del microordenador en su conjunto, un mercado que crece de forma exponencial.

En los últimos veinte años del siglo XX, el aumento de la potencia de los chips tuvo como resultado un espectacular incremento de la potencia de los microordenadores. A comienzos de los años noventa, microordenadores basados en un único chip tenían la misma capacidad de procesamiento de IBM sólo cinco años antes. Desde mediados de la década de 1980, los microordenadores no pueden concebirse en aislamiento: actúan en redes, con una movilidad creciente, mediante ordenadores portátiles. Esta extraordinaria versatilidad, y la posibilidad de añadir memoria y capacidad de procesamiento compartiendo la potencia informática en una red electrónica, cambió de forma decisiva la era del ordenador en la década de 1990 de un almacenamiento y procesamiento de datos centralizado a la utilización compartida de la potencia del ordenador interactivo en red. No sólo cambió todo el sistema tecnológico, sino también sus interacciones sociales y organizativas. De este modo, el coste medio del procesamiento de la información descendió de unos 75 dólares por millón de operaciones en 1960 a menos de un céntimo de centavo en 1990.

Esta capacidad de interconexión sólo se hizo posible, como es natural, debido a los importantes avances ocurridos tanto en las telecomunicaciones como en las tecnologías de las redes informáticas durante la década de 1970. Pero, al mismo tiempo, tales cambios sólo fueron posibles por los nuevos dispositivos microelectrónicos y la intensificación de la capacidad informática, en un ejemplo de relación sinérgica en la revolución de la tecnología de la información.

Las telecomunicaciones también han sufrido la revolución producida por la combinación de las tecnologías de «nodo» (conmutadores y selectores de rutas electrónicos) y los nuevos enlaces (tecnologías de la transmisión). El primer conmutador electrónico que se produjo industrialmente, el ESS-1, fue presentado por los Laboratorios Bell en 1969. Para

⁴⁸ Egan, 1995.

mediados de los años setenta, el avance en las tecnologías del circuito integrado ya había hecho posible el conmutador digital, que aumentaba la velocidad, la potencia y la flexibilidad, a la vez que se ahorraba espacio, energía y trabajo, frente a los dispositivos analógicos. Aunque ATT, empresa matriz de los descubridores, los Laboratorios Bell, al principio se mostró reacia a su presentación debido a la necesidad de amortizar la inversión ya realizada en equipamiento analógico, pero cuando en 1977 Northern Telecom de Canadá se hizo con una parte del mercado estadounidense al llevar la delantera en conmutadores digitales, las empresas Bell se unieron a la carrera y desataron un movimiento similar en todo el mundo.

Los importantes avances en optoelectrónica (fibras ópticas y transmisión por láser) y en la tecnología de la transmisión de paquetes digitales ampliaron de forma espectacular la capacidad de las líneas de transmisión. Las Redes Digitales de Servicios Integrados de Banda Ancha (RDSI-BA) imaginadas en la década de 1990 podían sobrepasar con creces las revolucionarias propuestas de los años setenta de una Red Digital de Servicios Integrados (RDSI): mientras que la capacidad de transporte de la RDSI sobre hilo de cobre se estimaba en 144.000 bits, la RDSI-BA de los años noventa sobre fibra óptica, siempre y cuando se hiciera realidad a un alto precio, podría transportar mil billones de bits. Para medir el ritmo de cambio, recordemos que en 1956 el primer cable telefónico transatlántico conducía 50 circuitos de voz comprimidos; en 1995, las fibras ópticas podían conducir 85.000 circuitos semejantes. Esta capacidad de transmisión basada en la optoelectrónica, junto con avanzadas arquitecturas de conmutación y selección de rutas, como el Modo de Transferencia Asíncrono (*Asynchronous Transfer Mode*, ATM) y el Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Interconexión (*Transmission Control Protocol/Interconnection Protocol* [TCP/IP]), son la base de Internet.

Las diferentes formas de utilización del espectro de la radio (transmisión tradicional, transmisión directa por satélite, microondas, telefonía celular digital), así como el cable coaxial y la fibra óptica, ofrecen una diversidad y versatilidad de tecnologías de transmisión que se están adaptando a toda una gama de empleos y posibilitando una comunicación ubicua entre usuarios móviles. De este modo, la telefonía celular se difundió con fuerza por todo el mundo en la década de los noventa, salpicando literalmente toda Asia con buscapersonas sencillos y a América Latina con teléfonos celulares, símbolos de posición social. En el año 2000 se disponía de las tecnologías para un dispositivo de comunicación personal de cobertura universal, a la espera de solucionar una serie de cuestiones técnicas, legales y comerciales antes de salir al mercado. Cada paso de gigante en un campo tecnológico específico amplifica los efectos de las tecnologías de la información relacionadas. La convergencia de todas estas tecnologías electrónicas en el campo de la comunicación interactiva condujo a la

constitución de Internet, quizá el medio tecnológico más revolucionario de la era de la información.

La constitución de Internet

La creación y el desarrollo de Internet en las tres últimas décadas del siglo XX se derivó de una combinación única de estrategia militar, cooperación de grandes proyectos científicos, espíritu empresarial tecnológico e innovación contracultural⁴⁹. En el origen de Internet se encuentra la labor de una de las instituciones de investigación más innovadoras del mundo: la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada (ARPA: Advanced Research Projects Agency) del Departamento de Defensa de Estados Unidos. Cuando a finales de los años cincuenta el lanzamiento del primer *Sputnik* alarmó al *establishment* militar estadounidense de la alta tecnología, ARPA emprendió una serie de audaces iniciativas, algunas de las cuales cambiaron la historia de la tecnología e introdujeron la era de la información a gran escala. Una de estas estrategias, que desarrolló una idea concebida por Paul Baran en Rand Corporation en 1960-1964, era diseñar un sistema de comunicaciones invulnerable a un ataque nuclear. Basado en una tecnología de comunicación mediante la conmutación de paquetes, el sistema independizó la red de los centros de mando y control, de modo que las unidades del mensaje encontraban su propia ruta a través de la red, reensamblándose con un significado coherente en cualquiera de sus puntos.

Cuando, posteriormente, la tecnología digital permitió empaquetar todo tipo de mensajes, incluido el sonido, las imágenes y los datos, se constituyó una red capaz de comunicar sus nodos sin utilizar centros de control. La universalidad del lenguaje digital y la pura lógica reticular del sistema de comunicación crearon las condiciones tecnológicas para una comunicación horizontal, global.

La primera red de ordenadores, bautizada como Arpanet por su poderoso patrocinador, inició las comunicaciones el 1 de septiembre de 1969. Los primeros cuatro nodos de la red se establecieron en la Universidad de California en Los Angeles, el Stanford Research Institute, la Universidad de California en Santa Barbara y la Universidad de Utah. La red estaba abierta a los centros de investigación que cooperaban con el Departamento de Defensa de Estados Unidos, pero los científicos empezaron a utilizarla para sus propios fines de comunicación, incluyendo una red de mensajes para los aficionados a la ciencia ficción. En un determi-

⁴⁹ Pueden consultarse excelentes historias de Internet en Abbate, 1990, y Naughton, 1999. Véase también Hart *et al.*, 1992. Sobre la contribución de la cultura de los *hackers* al desarrollo de Internet, véanse Hafner y Markoff, 1991; Naughton, 1999; Himannen, 2000.

nado momento se hizo difícil separar la investigación de orientación militar de la comunicación científica y de la charla personal. Por tanto, se dio acceso a la red a los científicos de todas las disciplinas y en 1983 hubo una escisión entre Arpanet, dedicada a fines científicos, y MILNET, directamente orientada a las aplicaciones militares. La National Science Foundation también empezó a desarrollar en los años ochenta otra red científica, CSNET, y —en cooperación con IBM— otra red más para estudiosos de disciplinas no científicas, BITNET. Sin embargo, todas las redes utilizaban Arpanet como la columna vertebral de su sistema de comunicaciones. La red de redes que se formó durante los años ochenta fue denominada ARPA-INTERNET, y posteriormente Internet, mantenida todavía por el Departamento de Defensa y gestionada por la National Science Foundation. Tras quedar tecnológicamente obsoleta después de más de veinte años en servicio, Arpanet fue clausurada el 28 de febrero de 1990. En ese momento, NSFNET, gestionada por la National Science Foundation, la reemplazó como columna vertebral de Internet. Sin embargo, las presiones comerciales, el desarrollo de redes corporativas privadas y redes cooperativas no lucrativas condujeron a la clausura de esta última columna vertebral de Internet gestionada por el gobierno en abril de 1995, lo que abrió la vía a la plena privatización de Internet cuando una serie de entidades comerciales derivadas de las redes regionales de la NSF sumaron sus fuerzas para constituir dispositivos cooperativos entre redes privadas. Una vez privatizada, Internet carecía de cualquier auténtica autoridad supervisora. Una serie de instituciones y mecanismos *ad hoc*, creados a lo largo del desarrollo de Internet, adoptaron cierto tipo de responsabilidad informal en la coordinación de las configuraciones técnicas y en la negociación de acuerdos para asignar direcciones de Internet. En enero de 1992, a iniciativa de la National Science Foundation, se le confió a la Internet Society, una organización sin ánimo de lucro, la responsabilidad respecto a las organizaciones coordinadoras preexistentes, la Internet Activities Board y la Internet Engineering Task Force. La principal función de coordinación en el nivel internacional sigue siendo los acuerdos multilaterales para la asignación de las direcciones de dominios en todo el mundo, un asunto muy polémico⁵⁰. En 1999, y a pesar de que en 1998 se estableció una nueva corporación regulativa estadounidense (IANA/ICANN), no existía una autoridad clara e indiscutible sobre Internet, ni en Estados Unidos ni en el mundo: un signo de la independencia característica del nuevo medio, tanto en el aspecto tecnológico como en el cultural.

Para que la red fuera capaz de mantener el crecimiento exponencial del volumen de comunicación era preciso mejorar la tecnología de transmisión. En los años setenta Arpanet utilizaba conexiones de 56.000 bits

⁵⁰ Conseil d'État, 1998.

por segundo; en 1987, las líneas de la red transmitían 1,5 millones de bits por segundo. En 1992, la NSFNET, la red que actúa como columna vertebral de Internet, funcionaba con velocidades de transmisión de 45 millones de bits por segundo, capacidad suficiente para enviar 5.000 páginas por segundo. En 1995 la tecnología de transmisión en gigabits estaba en fase de prototipo, con una capacidad que permitiría la transmisión de la Biblioteca del Congreso de los Estados Unidos en un minuto.

Sin embargo, la capacidad de transmisión no era suficiente para establecer una red de comunicación mundial. Los ordenadores tenían que poder hablar entre sí. El primer paso en esta dirección fue la creación de un protocolo de comunicaciones apto para ser utilizado por todo tipo de redes, una tarea aparentemente imposible a comienzos de los setenta. En el verano de 1973, Vinton Cerf y Robert Kahn, científicos informáticos que investigaban en el ARPA, diseñaron la arquitectura básica de Internet basándose en los trabajos para la creación de un protocolo de comunicaciones llevados a cabo por Kahn en su empresa de investigación, BBN. Convocaron una reunión en Stanford, a la que asistieron investigadores del ARPA y de diversas universidades y centros de investigación, entre ellos PARC/Xerox, donde los trabajos de Robert Metcalfe sobre tecnología de comunicación de paquetes acabarían dando como fruto la creación de redes de áreas locales (LAN). La cooperación tecnológica también incluía varios grupos en Europa, en especial los investigadores franceses que participaban en el programa Cyclades. Trabajando sobre la base de este seminario en Stanford, Cerf, Metcalfe y Gerard Lelann (de Cyclades) especificaron un Protocolo de Control de Transmisión (TCP) que se ajustara a los requisitos de diferentes investigadores y de las diferentes redes existentes. En 1978, Cerf, Postel (de UCLA) y Cohen (de la USC) dividieron el protocolo en dos partes: de ordenador principal [*host*] a ordenador principal (TCP) y protocolo interredes (IP). En 1980, el protocolo TCP/IP resultante se había convertido en el estándar de comunicación entre ordenadores en Estados Unidos. Su flexibilidad permitía adoptar una estructura de conexiones en múltiples niveles entre redes de ordenadores que demostró su capacidad para adaptarse a diversos sistemas de comunicación y a diversos códigos. Cuando en los años ochenta los operadores de telecomunicaciones, especialmente en Europa, impusieron como estándar internacional un protocolo de comunicaciones diferente (el x.25), el mundo estuvo muy cerca de dividirse en redes de ordenadores no comunicables. Sin embargo, en último término prevaleció la capacidad del TCP/IP de adaptarse a la diversidad. Con algunas adaptaciones (asignando el x.25 y el TCP/IP a distintos niveles de la red de comunicaciones, estableciendo después vínculos entre los niveles y haciendo ambos protocolos complementarios) el TCP/IP logró ser aceptado como el estándar común para los protocolos de comunicación entre ordenadores. A partir de ese momento, los ordenadores pudieron codificar y decodificar

entre sí paquetes de datos transmitidos a alta velocidad en la red de Internet. Todavía fue necesario dar un paso más hacia la convergencia tecnológica para que los ordenadores se comunicaran: la adaptación del TCP/IP a Unix, un sistema operativo que permitía acceder de un ordenador a otro. El sistema Unix fue inventado por los Laboratorios Bell en 1969, pero su uso no se extendió hasta 1983, cuando los investigadores de Berkeley (con fondos, una vez más, de ARPA) adaptaron el Unix al protocolo TCP/IP. Como la nueva versión de Unix se financió con fondos públicos, el *software* se comercializó al coste de distribución. Había nacido la conexión en redes a gran escala, pues las redes de áreas locales y regionales se interconectaron y empezaron a difundirse en cualquier lugar en el que existieran líneas telefónicas y los ordenadores estuvieran equipados con modems, un componente barato del equipo.

Detrás del desarrollo de Internet estaban las redes científicas, institucionales y personales en las que participaron el Departamento de Defensa, la National Science Foundation, algunas de las principales universidades de investigación (en especial el MIT, UCLA, Stanford, la Universidad de California del Sur, Harvard, la Universidad de California en Santa Bárbara y la Universidad de California en Berkeley) y *think-tanks* tecnológicos como el Laboratorio Lincoln del MIT, el SRI, la Palo Alto Research Corporation (fundada por Xerox), los Laboratorios Bell de ATT, la Rand Corporation y BBN (Bot, Beranek & Newman). Algunos de los protagonistas tecnológicos clave del periodo de 1960-1970 fueron, entre otros, J. C. R. Licklider, Paul Baran, Douglas Engelbart (inventor del ratón), Robert Taylor, Ivan Sutherland, Lawrence Roberts, Alex McKenzie, Robert Kahn, Alan Kay, Robert Thomas, Robert Metcalfe y un brillante teórico de la informática, Leonard Kleinrock, junto con el grupo de destacados graduados que se formaron con él en UCLA, algunos de los cuales llegarían a ser mentes clave del diseño y desarrollo de Internet: Vinton Cerf, Stephen Crocker y Jon Postel, entre otros. Muchos de estos científicos de la informática pasaron por estas instituciones, creando un ambiente de investigación interconectado cuyo dinamismo y objetivos se independizaron en gran parte de los fines específicos de la estrategia militar o de la conexión de superordenadores. Eran cruzados de la tecnología convencidos de que estaban transformando el mundo, cosa que acabaron haciendo.

Muchas de las aplicaciones de Internet provinieron de invenciones inesperadas de sus primeros usuarios, lo que indujo una praxis y una trayectoria tecnológica que se convertirían en rasgos esenciales de Internet. Por ejemplo, en las primeras fases de Arpanet, el motivo para interconectar los ordenadores era la posibilidad de utilizar recursos de tiempo compartido a través del procesamiento informático remoto, de modo que los recursos informáticos dispersos pudieran utilizarse plenamente *on-line*. Sin embargo, la mayoría de los usuarios en realidad no necesitaban tanta capacidad informática, o no estaban dispuestos a rediseñar sus sistemas de acuerdo con los

requisitos de la comunicación. Lo verdaderamente decisivo fue la comunicación por correo electrónico [*e-mail*] entre los participantes en la red, una aplicación creada por Ray Tomlinson en BBN y que sigue siendo el uso más popular de la comunicación por ordenador en el mundo actual.

Pero ésta no es más que una parte de la historia. En paralelo a los esfuerzos del Pentágono y de importantes proyectos científicos por establecer una red universal de ordenadores con acceso público dentro de unas normas de «uso aceptable», en los Estados Unidos se extendió una contracultura informática, muchas veces asociada intelectualmente a las secuelas de los movimientos de los años sesenta en su versión más libertario-utópica. Un importante elemento del sistema, el módem, fue una de las innovaciones tecnológicas que surgieron de los pioneros de esta contracultura, originalmente denominados *hackers* antes de que ese término adquiriera sus connotaciones negativas. El módem para ordenador personal fue inventado en 1978 por dos estudiantes de Chicago, Ward Christensen y Randy Suess, mientras intentaban descubrir un sistema para transferirse programas de microordenador por teléfono para ahorrarse el viaje, durante el invierno de Chicago, entre sus distantes domicilios. En 1979 difundieron el protocolo XModem, que permitía a los ordenadores transferir archivos informáticos directamente sin pasar por un ordenador central. Y difundieron de forma gratuita la tecnología, porque su objetivo era dar a conocer tanto como fuera posible las capacidades de comunicación. Las redes de ordenadores excluidas de Arpanet (reservada a universidades científicas de elite en sus primeras etapas) encontraron una forma para empezar a comunicarse entre sí de forma independiente. En 1979, tres estudiantes de la Duke University y de la Universidad de Carolina del Norte, no incluidas en Arpanet, crearon una versión modificada del protocolo Unix que permitió conectar ordenadores a través de la línea telefónica normal. Lo utilizaron para iniciar un foro de discusión informática en línea, Usenet, que rápidamente se convirtió en uno de los primeros sistemas de conversación electrónica a gran escala. Los inventores de Usenet News también difundieron gratuitamente su *software* en un folleto distribuido en la conferencia de usuarios de Unix. En 1983, Tom Jennings diseñó un sistema para enviar boletines de anuncios en ordenador personal añadiendo un módem y un *software* especial que permitía a otros ordenadores conectarse a un ordenador personal equipado con esta tecnología de interfaz. Éste fue el origen de una de las más originales redes populares, Fidonet, que en 1990 conectaba 2.500 ordenadores en los Estados Unidos. Como era barata, abierta y cooperativa, Fidonet tuvo especial éxito en los países pobres de todo el mundo, como Rusia, especialmente entre grupos contraculturales⁵¹, hasta que sus limitaciones tecnoló-

⁵¹ Rohozinski, 1998.

gicas y el desarrollo de Internet llevaron a la mayoría de sus usuarios a la *world wide web* (red mundial). Sistemas multiconferencia, como Well en el área de la bahía de San Francisco, conectaron a usuarios de ordenadores en redes de afinidades.

Irónicamente, este enfoque contracultural de la tecnología tuvo un efecto similar a la estrategia de conexión horizontal en redes de inspiración militar: puso los instrumentos tecnológicos a disposición de cualquiera que tuviera el conocimiento técnico y una herramienta informática, el ordenador personal, que pronto iniciaría una progresión espectacular de aumento de la potencia y bajada simultánea del precio. La aparición de los ordenadores personales y las posibilidades de comunicación de las redes espolearon el desarrollo de los sistemas de tablones de anuncios [*Bulletin Boards Systems: BBS*], al principio en los Estados Unidos, después en todo el mundo. Los sistemas de tablones de anuncios en red no requerían sofisticadas redes informáticas, sino únicamente ordenadores personales, modems y líneas telefónicas. Por tanto, se convirtieron en boletines electrónicos de noticias para toda clase de intereses y afinidades, creando lo que Howard Rheingold denominó «comunidades virtuales»⁵². A finales de los años ochenta, varios millones de usuarios de ordenador se comunicaban a través de ordenadores en redes cooperativas o comerciales que no formaban parte de Internet. Muchas veces éstas redes utilizaban protocolos que no eran compatibles, por lo que se pasaron a los de Internet, lo que en los años noventa permitió su integración en Internet y, de ese modo, la expansión de la propia Internet.

Sin embargo, en 1990 Internet todavía era muy difícil de utilizar para el no iniciado. Tenía una capacidad muy limitada de transmisión de gráficos y era sumamente difícil localizar y recuperar la información. Un nuevo salto tecnológico permitió la difusión de Internet en la sociedad en general: el diseño de una nueva aplicación, la *world wide web*, que organizó los *sites* de Internet por la información que contenían y no por su ubicación, lo que proporcionó a los usuarios un sistema sencillo para buscar la información deseada. La invención de la *world wide web* tuvo lugar en Europa en 1990, en el Centre Européen pour Recherche Nucleaire (CERN) de Ginebra, uno de los principales centros mundiales de investigación en física. Fue inventada por un grupo de investigadores del CERN dirigidos por Tim Berners-Lee y Robert Cailliau. Desarrollaron su investigación no a partir de la tradición de Arpanet, sino de las aportaciones de la cultura de los *hackers* de los años setenta. En particular, se apoyaron en la obra de Ted Nelson, que en 1974, en su folleto *Computer Lib* llamó a la gente a tomar y utilizar en beneficio propio el poder informático. Nelson imaginó un nuevo sistema de organizar la información que

⁵² Rheingold, 1993.

denominó «hipertexto», basado en vínculos horizontales de información. A esta visión pionera Berners-Lee y sus colaboradores añadieron nuevas tecnologías adaptadas del mundo multimedia para proporcionar un lenguaje audiovisual a su aplicación. El equipo del CERN creó un formato para documentos de hipertexto al que denominó *Hypertext Markup Language* (HTML), diseñado en la tradición de flexibilidad de Internet, de modo que los ordenadores pudieran adaptar sus lenguajes específicos dentro de este formato compartido, añadiendo ese formateado al inicio del protocolo TCP/IP. También establecieron un protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP: *Hypertext Transfer Protocol*) para guiar las comunicaciones entre los navegantes de la red y los servidores y crearon un formato de dirección estándar, el localizador uniforme de recursos (URL: *Uniform Resource Locator*), que combina la información sobre el protocolo de la aplicación y sobre la dirección del ordenador que contiene la información solicitada. También en este caso el URL podía manejar diversos protocolos de transferencia, no únicamente el HTTP, facilitando de ese modo la interfaz general. El CERN distribuyó gratuitamente el *software* www a través de Internet, y los primeros en establecer *sites* en la red fueron los grandes centros de investigación científica de todo el mundo. Uno de estos centros era el National Center for Supercomputer Applications (NCSA) de la Universidad de Illinois, uno de los centros de superordenadores más antiguos de la National Science Foundation. Como esos superordenadores cada vez se utilizaban menos, los investigadores del NCSA, como los de la mayoría de los otros centros de superordenadores, estaban buscando nuevas tareas. También algunos de sus empleados, entre ellos Marc Andreessen, un estudiante universitario que trabajaba a tiempo parcial en el centro por 6,85 dólares a la hora. «A finales de 1992, Marc, un técnico muy competente, y “aburrido como una ostra”, decidió que sería divertido intentar darle a la red el interfaz gráfico del que carecía»⁵³. Él y su colaborador Eric Bina crearon un navegador denominado Mosaic, que se pudo adquirir gratuitamente en el *web site* de la NCSA a partir de noviembre de 1993; en la primavera de 1994 ya se estaban utilizando varios millones de copias. Andreessen y su equipo fueron abordados por un legendario empresario de Silicon Valley, Jim Clark, que empezaba a aburrirse de la compañía que había creado con gran éxito, Silicon Graphics. Fundaron juntos otra empresa, Netscape, que produjo y comercializó el primer navegador fiable de Internet, Netscape Navigator, lanzado al mercado en octubre de 1994⁵⁴. Nuevos navegadores, o motores de búsqueda, fueron desarrollados con rapidez y el mundo entero se entregó a Internet, creando literalmente una red mundial.

⁵³ Reid, 1997, pág. 6.

⁵⁴ Lewis, 1999.

Tecnologías de red y ubicuidad informática

A finales de los años noventa, el poder de comunicación de Internet, junto con nuevos desarrollos en telecomunicaciones e informática, indujo otro cambio tecnológico de primer orden: el paso de los microordenadores y los superordenadores descentralizados e independientes a un sistema informático ubicuo a través de dispositivos interconectados de procesamiento de información en múltiples formatos. En este nuevo sistema tecnológico la potencia informática se distribuye en una red comunicada construida en torno a servidores que utilizan protocolos comunes de Internet que tienen la posibilidad de acceder a megadordenadores servidores, generalmente diferenciados entre servidores de bases de datos y servidores de aplicaciones. Aunque el nuevo sistema todavía estaba en fase de formación en el momento de escribir estas líneas, los usuarios accedían a la red desde diversos dispositivos especializados distribuidos en todas las esferas de la vida y en cualquier actividad: en el hogar, en el trabajo, en los centros comerciales o de ocio, en los medios de transporte y, finalmente, en todas partes. Estos dispositivos, muchos de ellos portátiles, pueden comunicarse entre sí sin necesidad de un sistema operativo propio. Por tanto, la potencia informática, las aplicaciones y los datos se almacenan en los servidores de la red y la inteligencia informática se sitúa en la propia red: los *web sites* se comunican entre sí y disponen del *software* necesario para conectar cualquier dispositivo a una red informática universal. Nuevos programas de *software*, como Java (1995) y Jini (1999), diseñados por Bill Joy en Sun Microsystems, permitieron a la red convertirse en el actual sistema de procesamiento de la información. La lógica de conexión en redes que tiene su paradigma en Internet se ha hecho aplicable a cualquier ámbito de la actividad, a cualquier contexto y a cualquier ubicación que pueda tener una conexión electrónica. El auge de la telefonía móvil, a cuya cabeza están Nokia, finlandesa; Ericsson, sueca, y Motorola, estadounidense, hizo posible acceder a Internet desde dispositivos móviles. Teléfonos móviles de tercera generación, presentados por Nokia y Ericsson en 1997, podían transferir datos a 384 kilobits por segundo al aire libre y a 2 megabits en espacios cerrados, en comparación con los 64 kilobits por segundo que son capaces de transmitir los cables de cobre. Además, el extraordinario aumento de la capacidad de transmisión con la tecnología de comunicación de banda ancha proporcionó la oportunidad de utilizar Internet, o tecnologías de comunicación relacionadas con Internet, para transmitir voz y datos mediante la tecnología de conmutación de paquetes, revolucionando las telecomunicaciones y la industria de telecomunicaciones. En palabras de Vinton Cerf: «Para acceder a Internet hoy pasamos por una centralita telefónica. Mañana pasaremos por Internet para tener una conversación telefónica»⁵⁵. En otra visión

⁵⁵ Cerf, 1999.

tecnológica, Cerf afirmó que «durante la segunda mitad de la próxima década —es decir, en torno a los años 2005-2010— existirá una nueva locomotora (tecnológica): millones de dispositivos conectados a Internet»⁵⁶. Por tanto, en última instancia la red de comunicaciones se establecerá a través de la conmutación de paquetes; la comunicación de datos constituirá la inmensa mayoría del tráfico y la transmisión de voz no será más que un servicio especializado. Este volumen de tráfico de comunicación requerirá una expansión gigantesca de la capacidad, tanto transoceánica como local. La construcción de una nueva infraestructura de telecomunicaciones global basada en la fibra óptica y en la transmisión digital estaba bien avanzada a finales de siglo. La fibra óptica transatlántica tiene una capacidad cercana a los 110 gigabits por segundo en el año 2000, en comparación con los 5 gigabits por segundo de 1993.

La frontera de la tecnología de la información al final del milenio parecía ser la aplicación de un enfoque nanotecnológico, químico y/o biológico a la fabricación de chips. Así, en julio de 1999 la revista *Science* publicaba los resultados de un trabajo experimental del científico informático Phil Kuekes, del laboratorio de Hewlett-Packard de Palo Alto, y del químico James Health, de UCLA. Ambos habían descubierto un modo de construir conmutadores electrónicos mediante procesos químicos en vez de la luz, reduciendo así los conmutadores al tamaño de una molécula. Aunque estos ultradiminutos componentes electrónicos están lejos de la fase operativa (y lo estarán al menos durante una década), éste y otros programas experimentales parecen indicar que la electrónica molecular ofrece una posible vía para superar los límites físicos de la creciente densidad de los chips de silicio, a la vez que inauguran una era de ordenadores cien mil millones de veces más rápidos que el microprocesador Pentium: eso permitiría almacenar una capacidad informática equivalente a la de 100 estaciones de trabajo de 1999 en el volumen de un grano de sal. Sobre la base en estas tecnologías, los científicos informáticos vislumbran la posibilidad de entornos informáticos en los que miles de millones de dispositivos microscópicos de procesamiento de la información se difundirán por doquier, «como el pigmento en la pintura de una pared». Si esto llega a ocurrir, las redes de ordenadores serán, literalmente, el tejido de nuestra vida⁵⁷.

La divisoria tecnológica de los años setenta

Este sistema tecnológico en el que estamos plenamente inmersos al comienzo del siglo XXI cuajó en los años setenta. Debido a la trascenden-

⁵⁶ Citado por *The Economist*, 1997, pág. 33.

⁵⁷ Hall, 1999a; Markoff, 1999a, 1999b.

cia de los contextos históricos específicos para las trayectorias tecnológicas y a la forma particular de interacción de la tecnología y la sociedad, es importante recordar unas cuantas fechas asociadas con descubrimientos esenciales en las tecnologías de la información. Todos ellos tienen algo sustancial en común: aunque basados en buena medida en el conocimiento previo existente y desarrollados en prolongación de tecnologías clave, representaron un salto cualitativo en la difusión masiva de la tecnología en aplicaciones comerciales y civiles, debido a su asequibilidad y su coste descendente para una calidad en aumento. Así pues, el microprocesador, el artefacto clave en la expansión de la microelectrónica, se inventó en 1971 y comenzó a difundirse a mediados de los años setenta. El microordenador se inventó en 1975 y el primer producto que gozó de éxito comercial, el Apple II, se presentó en abril de 1977, en torno a la misma fecha en que Microsoft comenzó a producir sistemas operativos para microordenadores. El Xerox Alto, matriz de muchas tecnologías de *software* para los ordenadores personales de la década de 1990, fue desarrollado en los laboratorios PARC de Palo Alto en 1973. El primer conmutador electrónico industrial apareció en 1969 y el digital se desarrolló a mediados de la década de 1970 y se difundió comercialmente en 1977. La fibra óptica fue producida por primera vez de forma industrial por Corning Glass a comienzos de la década de 1970. También a mediados de esa década, Sony empezó a producir comercialmente máquinas de vídeo, basándose en descubrimientos estadounidenses e ingleses de los años sesenta que nunca alcanzaron una producción masiva. Y por último, pero no menos importante, fue en 1969 cuando el Departamento de Defensa estadounidense, por medio de la Advanced Research Project Agency (ARPA), estableció una red de comunicación electrónica revolucionaria, que crecería durante la década siguiente para convertirse en la actual Internet. Le fue de gran ayuda el invento efectuado por Cerf y Kahn en 1974 del TCI/IP, el protocolo de red de interconexión que introdujo la tecnología de «entrada», permitiendo que diferentes tipos de redes se enlazaran. Creo que se puede decir sin exagerar que la revolución de la tecnología de la información, como tal revolución, nació en la década de 1970, sobre todo si se incluye en ella el surgimiento y difusión paralelos de la ingeniería genética en torno a las mismas fechas y lugares, un acontecimiento que merece, cuando menos, unas cuantas líneas de atención.

Las tecnologías de la vida

Aunque la biotecnología podría remontarse a la tablilla de Babilonia del año 6000 a.C. sobre la fermentación de la cerveza, y la revolución en

microbiología al descubrimiento científico de la estructura básica de la vida, la doble hélice del ADN por Francis Crick y James Watson en la Universidad de Cambridge en 1953, hasta comienzos de los años setenta la división de los genes y la recombinación del ADN, el fundamento tecnológico de la ingeniería genética, no hicieron posible la aplicación de conocimiento acumulativo. Generalmente se atribuye a Stanley Cohen, de Stanford, y a Herbert Boyer, de la Universidad de California en San Francisco, el descubrimiento de los procedimientos para la clonación de genes en 1973, aunque su trabajo se basaba en la investigación del premio Nobel Paul Berg, de Stanford. En 1975 los investigadores de Harvard aislaron el primer gen de mamífero a partir de la hemoglobina del conejo, y en 1977 se clonó el primer gen humano.

A partir de ese momento se inició una carrera para fundar firmas comerciales, la mayoría de ellas surgidas de las principales universidades y centros de investigación hospitalarios. En California del Norte, Nueva Inglaterra, Maryland, Virginia, Carolina del Norte y San Diego surgieron grupos de empresas de este tipo. Tanto periodistas e inversores como activistas sociales quedaron impresionados por las tremendas posibilidades que inauguraba la capacidad de desarrollar la ingeniería de la vida, incluida la vida humana. Genentech en el sur de San Francisco, Cetus en Berkeley y Biogen en Cambridge, Massachusetts, fueron algunas de las primeras compañías, organizadas en torno a científicos que habían obtenido el premio Nobel, que utilizaron las nuevas tecnologías genéticas para aplicaciones médicas. Pronto les siguieron empresas agrícolas, y se asignó un número cada vez mayor de tareas a los microorganismos —en algunos casos modificados genéticamente—, una de las cuales, y no la menos importante, era la de limpiar la contaminación, muchas veces generada por las mismas compañías y organizaciones que vendían los supermicrobios. Sin embargo, las dificultades científicas, los problemas técnicos e importantes obstáculos legales derivados de justificadas preocupaciones éticas y de seguridad ralentizaron la tan pregonada revolución biotecnológica durante los años ochenta. Se perdió una cantidad considerable de capital riesgo y algunas de las compañías más innovadoras, incluida Genentec, fueron absorbidas por gigantes farmacéuticos (Hoffman-La Roche, Merck), que se daban perfecta cuenta de que no podían repetir la costosa arrogancia que habían mostrado las empresas informáticas establecidas frente a las empresas innovadoras recién fundadas: comprar empresas pequeñas e innovadoras junto con los servicios de sus científicos se convirtió en una póliza de seguro de primer orden para las multinacionales farmacéuticas y químicas, tanto para internalizar los beneficios comerciales de la revolución tecnológica como para controlar su ritmo. A continuación se produjo un ralentizamiento de ese ritmo, al menos en la difusión de sus aplicaciones.

Sin embargo, a finales de los ochenta y en los noventa un importante avance científico y una nueva generación de intrépidos empresarios científicos revitalizaron la biotecnología, centrándose de forma decisiva en la ingeniería genética, la tecnología auténticamente revolucionaria de ese campo. La clonación genética entró en una nueva fase cuando, en 1988, Harvard patentó formalmente un ratón creado a través de la ingeniería genética, quitando así los derechos de autor de la vida a Dios y a la naturaleza. En los siete años siguientes fueron patentados otros siete ratones como formas de vida de nueva creación, identificadas como propiedad de sus ingenieros. En agosto de 1989 los investigadores de la Universidad de Michigan y de Toronto descubrieron el gen responsable de la fibrosis quística, abriendo el camino a la terapia genética. En febrero de 1997 Wilmut y sus colaboradores del Roslin Institute de Edimburgo anunciaron la clonación de una oveja, a la que llamaron Dolly, creada a partir del ADN de una oveja adulta. En julio de 1988 la revista *Nature* publicó los resultados de un experimento potencialmente todavía más relevante: dos biólogos de la Universidad de Hawaii, Yanagimachi y Wakayama, realizaron una clonación masiva de 22 ratones, incluidos 7 clones de clones, demostrando así la posibilidad de la producción secuencial de clones en condiciones más difíciles que la de la clonación de ovejas, puesto que los embriones de ratones tienen un desarrollo mucho más rápido que los de las ovejas. También en 1998 un equipo científico de la Universidad del Estado de Portland logró clonar monos adultos, aunque no consiguió reproducir las condiciones de su experimento.

A pesar de todo el bombo en los medios de comunicación y de las historias de terror, la clonación humana no está en los planes de nadie y, en términos estrictos, sería materialmente imposible, puesto que los seres vivos constituyen su personalidad y su organismo en interacción con su entorno. La clonación de animales es económicamente ineficaz porque, practicada en escala masiva, plantearía la posibilidad de la desaparición de todo un grupo de seres vivos en caso de una infección: todos los animales de un tipo determinado serían vulnerables al mismo agente letal. Pero existen otras posibilidades, en especial en la investigación médica: la clonación de órganos humanos y la clonación a gran escala de animales modificados genéticamente para fines de experimentación y para la sustitución de órganos humanos. Además, en vez de sustituir órganos con transplantes, la nueva investigación biológica, con importantes aplicaciones médicas y comerciales, tiene como objetivo inducir capacidades de autorregeneración en los seres humanos. Un examen de las potenciales aplicaciones en desarrollo a finales de los años noventa pone de manifiesto los siguientes proyectos, que se espera que sean operativos entre el 2000 y el 2010, y todos ellos relacionados con la inducción de la autorregeneración o desarrollo de órganos, tejidos o

huesos en el cuerpo humano mediante la manipulación genética: vejiga, un proyecto de la compañía Reprogenesis; uretra, de Integra Life Sciences; huesos maxilares, de Osiris Therapeutics; células productoras de insulina, sustitutivas de la función del páncreas, de BioHybrid Technologies; cartílagos, de ReGen Biologics; dientes, un proyecto de diversas compañías; nervios de la médula espinal, de Acorda; cartílago de los senos, de Reprogenesis; un corazón humano completo basado en proteínas manipuladas genéticamente cuya capacidad para producir vasos sanguíneos ya se ha comprobado, de Genentech; y regeneración del hígado a partir de un tejido en el que se injertan células de hígado, de Human Organ Sciences.

La frontera más decisiva de la investigación y la aplicación biológica es la terapia genética y la prevención genética a gran escala. En el contexto de este desarrollo potencial está el esfuerzo iniciado en 1990 por el gobierno de Estados Unidos para promover y financiar un programa cooperativo de quince años, dotado con 3.000 millones de dólares y coordinado por James Watson, que reúne algunos de los equipos de investigación microbiológica más avanzados para trazar el mapa del genoma humano, es decir, identificar y localizar los 60.000/80.000 genes que componen el alfabeto de la especie humana⁵⁸. Se esperaba que el mapa estuviera completo en el 2001, antes de lo previsto. En abril del 2000, los equipos de la Universidad de California reunidos en el centro de investigación de Walnut Creek completaron la secuenciación de 3 de los 23 cromosomas humanos. Mediante éstos y otros programas se está identificando un flujo continuo de genes humanos relacionados con diversas enfermedades. Este esfuerzo desencadenó numerosas manifestaciones de reserva y críticas por motivos éticos, religiosos y legales. Sin embargo, en tanto que los científicos, reguladores y expertos en ética debatían las implicaciones humanistas de la ingeniería genética, los investigadores convertidos en empresarios establecían de forma expeditiva mecanismos para el control legal y financiero del genoma humano. El intento más osado emprendido en este sentido fue el proyecto iniciado en 1990 en Rockville, Maryland, por dos científicos, J. Craig Venter, entonces en el National Institute of Health, y William Haseltine, entonces en Harvard. Utilizando superordenadores secuenciaron en sólo cinco años en torno al 85% del total de genes humanos, creando una gigantesca base de datos genética⁵⁹. Más tarde se separaron y crearon dos compañías. Una de ellas, Celera Genomics, se planteaba completar la secuenciación en el 2000. El problema es que no saben, y durante algún

⁵⁸ Sobre el desarrollo de la biotecnología y la ingeniería genética, véanse, por ejemplo, Hall, 1987; Teitelman, 1989; Bishop y Waldholz, 1990; Congreso de los Estados Unidos, Oficina de Evaluación Tecnológica, 1991.

⁵⁹ Véase *Business Week*, 1995e.

tiempo no sabrán, qué es cada secuencia de un gen o dónde se ubica: su base de datos comprende cientos de miles de fragmentos de genes con funciones desconocidas. ¿Cuál es, pues, su interés? Por un lado, la investigación centrada en genes específicos puede beneficiarse (y de hecho se beneficia) de los datos contenidos en estas secuencias. Pero, y esto es más importante y la razón de todo el proyecto, Craig y Haseltine han patentado todos sus datos, de forma que, literalmente, algún día pueden poseer los derechos legales sobre una gran parte del conocimiento para manipular el genoma humano. La amenaza que planteaba esto era lo suficientemente grave como para que, si bien atrajeron decenas de millones de dólares de inversores, una importante compañía farmacéutica, Merck, aportara una financiación sustancial a la Universidad de Washington para que llevara a cabo la misma secuenciación ciega e hiciera públicos los datos, de modo que no hubiera un control privado del conocimiento que pudiera bloquear el desarrollo de productos basados en un futuro conocimiento sistemático del genoma humano. Y el Human Genome Project, subvencionado con fondos públicos, publicó sus resultados para impedir la propiedad privada de los conocimientos genéticos. Para el sociólogo, la lección de estas batallas comerciales no se limita a un ejemplo más de codicia humana. Señala una aceleración del ritmo de difusión y profundización de la revolución genética.

El desarrollo de la ingeniería genética abre la posibilidad de actuar sobre los genes, lo que hará a la humanidad capaz no sólo de controlar ciertas enfermedades, sino de identificar las predisposiciones biológicas e intervenir en tales predisposiciones, modificando potencialmente el destino genético. En los años noventa, los científicos podían identificar defectos concretos en genes humanos específicos como origen de diversas enfermedades. Esto estimuló la expansión de lo que parece el campo más prometedor de la investigación médica, la terapia genética⁶⁰. Sin embargo, los investigadores experimentales se han topado con una barrera: cómo insertar un gen modificado con la instrucción para corregir el gen defectuoso en el lugar adecuado del cuerpo, incluso aunque sepan dónde está el objetivo. Generalmente utilizaban virus o cromosomas artificiales, pero el índice de éxito era extremadamente bajo. Por tanto empezaron a experimentar con otras herramientas, como diminutos glóbulos de grasa diseñados para transportar genes supresores de los tumores directamente a los tumores cancerosos, una tecnología utilizada por empresas como Valentis y Transgene. Algunos biólogos creen que esta mentalidad ingenieril (un objetivo, un mensajero, un impacto) pasa por alto la complejidad de la interacción biológica, en la que los or-

⁶⁰ *Business Week*, 1994a, págs. 94-104.

ganismos vivos se adaptan a entornos distintos y modifican la conducta prevista⁶¹.

Independientemente de cuándo empiece a dar resultados la terapia genética, si es que los da, la finalidad última de la terapia médica basada en la genética es la prevención, es decir, identificar los defectos genéticos en el esperma y en los óvulos humanos, actuando sobre los portadores humanos antes de que desarrollen la enfermedad programada, a fin de eliminar sus deficiencias genéticas y las de su descendencia antes de que sea tarde. Esta perspectiva, naturalmente, encierra tantas promesas como peligros. Lyon y Gerner concluyen su equilibrado examen de los desarrollos de la ingeniería genética humana con una predicción y una advertencia:

En unas pocas generaciones podríamos eliminar ciertas enfermedades mentales, quizá, o la diabetes, o la hipertensión, o prácticamente cualquier otra enfermedad que eligiéramos. Pero lo que importa es no perder de vista que la naturaleza de la decisión dicta si las opciones que se tomen son acertadas y justas. [...] La forma, más bien ignominiosa, en que la elite científica y administrativa está manejando los frutos más tempranos de la terapia genética es ominosa. [...] Los seres humanos nos hemos desarrollado intelectualmente hasta el punto en el que, relativamente pronto, seremos capaces de entender gran parte de la intimidante complejidad de la composición, funcionamiento y dinámica del genoma. Emocionalmente, sin embargo, seguimos siendo simios, con todo el bagaje conductual que eso conlleva. Quizá la forma definitiva de terapia genética para nuestra especie sea la de elevarnos por encima de su bajo legado y aprender a aplicar ese nuevo conocimiento de forma sabia y benigna⁶².

Todo apunta al pleno florecimiento de la terapia genética y sus aplicaciones en los primeros años del nuevo milenio, lo que desencadenará el debate más fundamental sobre la frontera, ahora difusa, entre naturaleza y sociedad.

El contexto social y la dinámica del cambio tecnológico

¿Por qué los descubrimientos sobre las nuevas tecnologías de la información se concentraron en la década de los años setenta y en su mayor parte en los Estados Unidos? ¿Y cuáles son las consecuencias de esta concentración de tiempo/lugar para el desarrollo futuro y para su interacción con las sociedades? Resultaría tentador relacionar de forma directa la formación de este paradigma tecnológico con las características

⁶¹ Capra, 1999a.

⁶² Lyon y Gerner, 1995, pág. 567.

de su contexto social. En particular, si recordamos que a mediados de la década de los años setenta los Estados Unidos y el mundo occidental se vieron sacudidos por una importante crisis económica, estimulada (pero no causada) por el *shock* del petróleo de 1973-1974. Una crisis que impulsó la espectacular reestructuración del sistema capitalista a escala global, induciendo en realidad un nuevo modelo de acumulación en discontinuidad histórica con el capitalismo posterior a la Segunda Guerra Mundial, como he propuesto en el prólogo de este libro. ¿Fue el nuevo paradigma tecnológico una respuesta del sistema capitalista para superar sus contradicciones internas? ¿O fue un modo de asegurar la superioridad militar sobre el enemigo soviético, respondiendo a su reto tecnológico en la carrera espacial y el armamento nuclear? Ninguna de estas dos explicaciones parece convincente. Si bien existe una coincidencia histórica entre la concentración de nuevas tecnologías y la crisis económica de los años setenta, su sincronización es demasiado exacta, el «ajuste tecnológico» habría sido demasiado rápido, demasiado mecánico, cuando sabemos por las lecciones de la revolución industrial y otros procesos históricos de cambio tecnológico que las sendas económica, industrial y tecnológica, aunque se relacionan, se mueven con lentitud y ajustan su interacción de forma imperfecta. En cuanto al argumento militar, al impacto del *Sputnik* de 1957-1960 se respondió con el programa espacial estadounidense mediante la inversión tecnológica masiva de los años sesenta, no de los setenta; y el nuevo impulso importante a la tecnología militar estadounidense se acometió en 1983 en torno al programa «Guerra de las Galaxias», que en realidad utilizó las tecnologías desarrolladas en la década prodigiosa precedente. Y aunque Internet se originara en investigaciones patrocinadas por el Departamento de Defensa, de hecho no se utilizó en aplicaciones militares hasta mucho más tarde, más o menos al mismo tiempo que empezó a difundirse en las redes contraculturales. De hecho, parece que la pista del nuevo sistema tecnológico en la década de 1970 ha de seguirse hasta la dinámica autónoma del descubrimiento tecnológico y su difusión, incluidos los efectos sinérgicos entre varias tecnologías clave. Así, el microprocesador hizo posible el microordenador; los avances en las telecomunicaciones, como ya se ha mencionado, permitieron a los microordenadores funcionar en red, con lo que se aumentó su potencia y flexibilidad. Las aplicaciones de estas tecnologías a la fabricación electrónica acrecentaron el potencial de nuevas tecnologías de diseño y fabricación en la producción de semiconductores. El nuevo *software* se vio estimulado por el rápido crecimiento del mercado de microordenadores, que a su vez se expandió por las nuevas aplicaciones, y de las mentes de los diseñadores de *software* surgieron en profusión tecnologías fáciles para el usuario. La conexión de ordenadores en redes se extendió mediante el *software* que hizo posible una *www* orientada al usuario, y así sucesivamente.

El fuerte impulso tecnológico inducido por el ejército en la década de 1960 preparó a la tecnología estadounidense para el salto hacia adelante. Pero la invención del microprocesador por Ted Hoff, cuando trataba de cumplir un pedido para una empresa japonesa de calculadoras manuales en 1971, se produjo por el conocimiento e ingenio acumulados en Intel, en estrecha interacción con el medio de innovación creado desde la década de 1950 en Silicon Valley. En otras palabras, la primera revolución de la tecnología de la información se concentró en los Estados Unidos, y en buena medida en California, en la década de 1970, atendiendo a los avances de las dos décadas previas y bajo la influencia de diversos factores institucionales, económicos y culturales. Pero no surgió de ninguna necesidad preestablecida: su inducción fue tecnológica, en lugar de ser determinada por la sociedad. Sin embargo, una vez que cobró existencia como sistema, en virtud de la concentración que he descrito, sus desarrollos y aplicaciones, y, en definitiva, su contenido, resultaron moldeados de forma decisiva por el contexto histórico en el que se expandió. En efecto, en la década de 1980, el capitalismo (en concreto, las principales empresas y los gobiernos del club de los países del G-7) ya habían emprendido un proceso sustancial de reestructuración económica y organizativa, en el que la nueva tecnología de la información desempeñaba un papel fundamental que la conformó decisivamente. Por ejemplo, el movimiento impulsado por las empresas hacia la desregulación y liberalización en la década de 1980 fue concluyente para la reorganización y el crecimiento de las telecomunicaciones, de modo más notable tras el desposeimiento de ATT. A su vez, la disponibilidad de nuevas redes de telecomunicaciones y sistemas de información puso los cimientos para la integración global de los mercados financieros y la articulación segmentada de la producción y el comercio de todo el mundo, como examinaremos en el capítulo siguiente.

De este modo, y hasta cierto punto, la disponibilidad de nuevas tecnologías constituidas como un sistema en la década de los setenta fue una base fundamental para el proceso de reestructuración socioeconómica de la década de los ochenta. Y los usos de esas tecnologías en esa década condicionaron en buena parte sus usos y trayectorias en la de 1990. El surgimiento de la sociedad red, que trataré de analizar en los capítulos siguientes de este volumen, no puede entenderse sin la interacción de estas dos tendencias relativamente autónomas: el desarrollo de las nuevas tecnologías de la información y el intento de la antigua sociedad de reequiparse mediante el uso del poder de la tecnología para servir a la tecnología del poder. Sin embargo, el resultado histórico de esa estrategia consciente a medias es en buena medida indeterminado, ya que la interacción de tecnología y sociedad depende de la relación estocástica existente entre un número excesivo de variables casi independientes. Sin rendirnos necesariamente al relativismo histórico, cabe decir que la revolución de la tecnología de la información fue cultural, histórica y es-

pacialmente dependiente de un conjunto muy específico de circunstancias cuyas características marcaron su evolución futura.

MODELOS, ACTORES Y CENTROS DE LA REVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

Si la primera revolución industrial fue británica, la primera revolución de la tecnología de la información fue estadounidense, con una inclinación californiana. En ambos casos, científicos e industriales de otros países desempeñaron un papel importante, tanto en el descubrimiento como en la difusión de las nuevas tecnologías. Francia y Alemania fueron fuentes clave de talento y aplicaciones en la revolución industrial. Los descubrimientos científicos originados en Inglaterra, Francia, Alemania e Italia pusieron las bases de las nuevas tecnologías de la electrónica y la biología. El ingenio de las compañías japonesas fue decisivo para la mejora de los procesos de fabricación en la electrónica y en la penetración de las tecnologías de la información en la vida cotidiana de todo el mundo, mediante un aluvión de productos innovadores, de los vídeos y faxes a los videojuegos y buscas⁶³. En efecto, en la década de 1980, las compañías japonesas lograron dominar la producción de semiconductores en el mercado mundial, si bien a mediados de la de 1990 las compañías estadounidenses retomaron en conjunto la cabeza de la competición. La industria entera evolucionó hacia la interpenetración, las alianzas estratégicas y el establecimiento de redes entre firmas de diferentes países, como analizaré en el capítulo 3. Esto hizo que la diferenciación por origen nacional fuera menos importante. No obstante, no sólo hubo innovadores, firmas e instituciones estadounidenses en los orígenes de la revolución durante la década de 1970, sino que han continuado desempeñando un papel dirigente en su expansión, que probablemente se mantendrá en el siglo XXI; aunque sin duda seremos testigos de una presencia creciente de firmas japonesas, chinas y coreanas, así como de una contribución europea importante en biotecnología, química avanzada, *software* y telecomunicaciones.

Para comprender las raíces sociales de la revolución de la tecnología de la información en los Estados Unidos, más allá de los mitos que la rodean, recordaré brevemente el proceso de formación de su medio de innovación más famoso: Silicon Valley. Como ya he mencionado, fue allí donde se desarrollaron el circuito integrado, el microprocesador, el microordenador, entre otras tecnologías clave, y donde ha latido el corazón de la innovación electrónica cuatro décadas ya, mantenido por cerca de

⁶³ Forester, 1993.

un cuarto de millón de trabajadores de la tecnología de la información⁶⁴. Además, la zona de la Bahía de San Francisco en su conjunto (que incluye otros centros de innovación como Berkeley, Emeryville, Marin County y el mismo San Francisco) también se halló en los orígenes de la ingeniería genética y, a comienzos del siglo XXI, es uno de los principales centros del mundo en *software* avanzado, ingeniería genética, diseño y desarrollo de Internet y diseño informático multimedia.

Silicon Valley (Condado de Santa Clara, 48 km al sur de San Francisco, entre Stanford y San José) se convirtió en un medio de innovación por la convergencia en ese sitio del nuevo conocimiento tecnológico; de un gran mercado de expertos ingenieros y científicos de las principales universidades de la zona; de financiamiento generoso y un mercado asegurado por parte del Departamento de Defensa; del desarrollo de una eficaz red de sociedades de capital de riesgo y, en la primera etapa, del liderazgo institucional de la Universidad de Stanford. En efecto, los orígenes de la ubicación poco probable de la industria electrónica en una agradable zona semirrural de California del Norte pueden remontarse al establecimiento en 1951 del Parque Industrial de Stanford, realizado por el visionario decano de Ingeniería y vicerrector de la universidad, Frederick Terman. Había apoyado personalmente a dos de sus estudiantes doctorales, William Hewlett y David Packard, para crear una empresa electrónica en 1938. La Segunda Guerra Mundial fue una bonanza para Hewlett-Packard y otras empresas electrónicas que acababan de ponerse en marcha. Así que, naturalmente, fueron los primeros inquilinos de una nueva y privilegiada ubicación donde sólo las firmas que Stanford juzgara innovadoras podrían beneficiarse de una renta de alquiler simbólica. Como el parque se llenó en seguida, las nuevas firmas electrónicas comenzaron a localizarse a lo largo de la autopista 101 hacia San José.

El acontecimiento decisivo fue el traslado a Palo Alto en 1955 de William Shockley, el inventor del transistor. Fue algo fortuito, aunque refleja la incapacidad histórica de las empresas electrónicas establecidas para hacerse con la tecnología microelectrónica revolucionaria. Shockley había solicitado el apoyo de grandes compañías de la costa Este, como RCA y Raytheon, para desarrollar la producción industrial de su descubrimiento. Cuando le negaron su apoyo, Shockley aceptó un trabajo en Silicon Valley, en una empresa subsidiaria de Beckman Instruments, debido sobre todo a que su madre vivía en Palo Alto. Con el apoyo de Beckman Instruments decidió crear allí su propia compañía, Shockley Transistors, en 1956. Empleó a ocho brillantes ingenieros jóvenes, la mayoría procedentes de Bell Labs, a los que atrajo la posibilidad de trabajar con Shockley; uno

⁶⁴ Sobre la historia de la formación de Silicon Valley, dos libros provechosos y fáciles de leer son los de Rogers y Larsen, 1984, y Malone, 1985.

de ellos, aunque no precisamente de Bell Labs, era Bob Noyce. Pronto quedaron decepcionados. Aunque aprendieron las nociones fundamentales de la electrónica puntera con Shockley, rechazaron su autoritarismo y tozudez, que condujeron a su empresa a callejones sin salida. En particular, deseaban, en contra de su decisión, trabajar con el silicio como el camino más prometedor para la integración a mayor escala de transistores. Por tanto, al cabo de sólo un año dejaron a Shockley (cuya empresa se vino abajo) y crearon (con ayuda de Fairchild Cameras) Fairchild Semiconductors, donde tuvo lugar durante los siguientes dos años la invención del proceso planar y del circuito integrado. En tanto que Shockley, después de repetidos fracasos empresariales, acabó refugiándose en una cátedra de Stanford en 1963, los «Ocho de Fairchild», tan pronto como descubrieron el potencial tecnológico y comercial de sus conocimientos, abandonaron Fairchild para fundar cada uno su propia compañía. Y sus nuevos contratados hicieron lo mismo tras cierto tiempo, de tal forma que los orígenes de la mitad de las ochenta y cinco firmas mayores de semiconductores estadounidenses, incluidos los principales productores actuales como Intel, Advanced Micro Devices, National Semiconductors, Signetics, etc., pueden remontarse a este proceso de escisión de Fairchild.

Fue esta transferencia de tecnología de Shockley a Fairchild y luego a una red de empresas escindidas lo que constituyó la fuente inicial de innovación sobre la que se levantó Silicon Valley y la revolución en la microelectrónica. En efecto, a mediados de la década de 1950, Stanford y Berkeley aún no eran centros punteros en electrónica; lo era el MIT y ello se reflejó en la ubicación original de la industria electrónica en Nueva Inglaterra. Sin embargo, tan pronto como Silicon Valley tuvo a su disposición el conocimiento, el dinamismo de su estructura industrial y la continua creación de nuevas empresas lo afirmaron ya como el centro mundial de la microelectrónica a comienzos de la década de 1970. Anna Saxenian comparó el desarrollo de los complejos electrónicos de las dos zonas (la carretera 128 de Boston y Silicon Valley) y llegó a la conclusión de que la organización social e industrial de las empresas desempeñó un papel decisivo en el fomento u obstrucción de la innovación⁶⁵. Así, mientras que las grandes empresas de prestigio reconocido del Este eran demasiado rígidas (y demasiado arrogantes) para reequiparse constantemente en pos de nuevas fronteras tecnológicas, Silicon Valley siguió produciendo una profusión de nuevas firmas y practicando la fertilización cruzada y la difusión del conocimiento mediante los cambios de trabajo y las escisiones. Las tertulias hasta entrada la noche en el Walker's Wagon Wheel Bar and Grill de Mountain View hicieron más por la difusión de la innovación tecnológica que la mayoría de los seminarios de Stanford.

⁶⁵ Saxenian, 1994.

En otra obra⁶⁶ he tratado por extenso otro factor clave de la formación de Silicon Valley: la temprana existencia de una red de empresas de capital riesgo⁶⁷. El hecho relevante a este respecto es que muchos de los primeros inversores procedían de la industria electrónica, y por tanto entendían los proyectos tecnológicos y comerciales por los que apostaban. Por ejemplo, Gene Kleiner, de una de las empresas más importantes de capital riesgo de los años sesenta, Kleiner, Perkins y socios, era uno de los ingenieros de los Ocho de Fairchild. En 1988, podía calcularse que «el capital riesgo constituía en torno a la mitad de las inversiones en los nuevos productos y servicios asociados a la industria de la información y la comunicación»⁶⁸.

Un proceso similar se dio en el desarrollo del microordenador, que introdujo una divisoria histórica en los usos de la tecnología de la información⁶⁹. A mediados de la década de 1970, Silicon Valley ya había atraído a cientos de miles de mentes jóvenes y brillantes provenientes de todo el mundo, que llegaban a la agitación de la nueva Meca tecnológica en busca del talismán de la invención y el dinero. Se reunían en clubes abiertos para intercambiar ideas e información sobre los últimos avances. Uno de ellos era el Home Brew Computer Club (Club de Ordenadores de Fabricación Casera), cuyos jóvenes visionarios (entre los que estaban Bill Gates, Steve Jobs y Steve Wozniak) crearían en los siguientes años hasta 22 firmas, incluidas Microsoft, Apple, Comeco y North Star. Fue la lectura en el club de un artículo aparecido en *Popular Electronics* que informaba sobre la máquina Altair de Ed Roberts lo que inspiró a Wozniak para diseñar un microordenador, Apple I, en su garaje de Menlo Park durante el verano de 1976. Steve Jobs vio el potencial y juntos fundaron Apple, con un préstamo de 91.000 dólares de un ejecutivo de Intel, Mike Markkula, que entró como socio. Casi al mismo tiempo, Bill Gates fundó Microsoft para proporcionar el sistema operativo a los microordenadores, aunque en 1978 ubicó su compañía en Seattle para aprovechar los contactos sociales de su familia.

Podría contarse un relato paralelo sobre el desarrollo de la ingeniería genética: científicos sobresalientes de Stanford, la Universidad de California en San Francisco y Berkeley crearon en paralelo empresas, ubicadas al principio en la zona de la Bahía, que también atravesarían procesos frecuentes de escisión, aunque seguirían manteniendo estrechos vínculos con

⁶⁶ Castells, 1989b, capítulo 2.

⁶⁷ Zook, 2000c.

⁶⁸ Kay, 1990, pág. 173.

⁶⁹ Levy, 1984; Egan, 1995. Para un interesante estudio de la compleja interacción entre creatividad tecnológica y estrategia empresarial véase Hiltzik, 1999, sobre la experiencia de uno de los más importantes centros de innovación de Silicon Valley, Xerox-PARC.

sus «alma mater»⁷⁰. Procesos muy similares ocurrieron en Boston/Cambridge en torno a Harvard-MIT, en el triángulo de investigación alrededor de la Duke University y la Universidad de Carolina del Norte y, más importante, en Maryland, en torno a los grandes hospitales, los institutos nacionales de investigación sobre la salud y la Universidad Johns Hopkins.

La lección fundamental de esas pintorescas historias es doble: el desarrollo de la revolución tecnológica contribuyó a la formación de un entorno innovador en el que descubrimientos y aplicaciones interactuaban y eran puestos a prueba en un proceso recurrente de ensayo y error, de aprender haciendo; ese entorno requería (y sigue requiriendo a principios del siglo XXI, a pesar de la conexión *on-line* en red) la concentración espacial de centros de investigación, instituciones de educación superior, compañías tecnológicas avanzadas, una red de proveedores auxiliares de bienes y servicios y redes empresariales de capital riesgo para financiar las empresas recién constituidas. En segundo lugar, una vez que ese entorno se consolida, como ocurrió con Silicon Valley en los años setenta, tiende a generar su propia dinámica y a atraer los conocimientos, la inversión y el talento de todo el mundo. En efecto, en los años noventa Silicon Valley se benefició de una proliferación de compañías japonesas, taiwanesas, coreanas, indias y europeas y del aflujo de miles de ingenieros y expertos en informática, principalmente de India y China, para quienes una activa presencia en el valle es el vínculo más productivo con las fuentes de nueva tecnología y con valiosa información comercial⁷¹. Además, dada su posición en las redes de la innovación tecnológica y su inherente enfoque empresarial de las normas de la nueva economía de la información, el área de la bahía de San Francisco ha conseguido sumarse a cualquier desarrollo nuevo. En los años noventa, cuando Internet se privatizó y se convirtió en una tecnología comercial, Silicon Valley también logró captar a la nueva industria. Algunas de las principales compañías de equipos para Internet (como Cisco Systems), compañías de ordenadores en red (como Sun Microsystems), compañías de *software* (como Oracle) y portales de Internet (como Yahoo!) empezaron en Silicon Valley. Además, la mayoría de las nuevas empresas de Internet que introdujeron el comercio electrónico y revolucionaron el comercio (como Ebay) también se agruparon en Silicon Valley⁷². La aparición del multimedia a mediados de los años noventa creó una red de vínculos tecnológicos y comerciales entre la capacidad de diseño por ordenador de las compañías de Silicon Valley y los estudios productores de imagen de Hollywood, a la que se denominó de inmediato la industria de «Siliwood». En un rincón decadente de San

⁷⁰ Blakely *et al.*, 1988; Hall *et al.*, 1988.

⁷¹ Saxenian, 1999.

⁷² Reid, 1997; Bronson, 1999; Kaplan, 1999; Lewis, 1999; Zook, 2000.

Francisco, South of Market, artistas, diseñadores gráficos y programadores se unieron en la denominada «Multimedia Gulch» [Torretera Multimedia], que amenaza con inundar nuestras salas de estar con imágenes salidas de sus mentes febriles, creando de paso el centro de diseño multimedia más dinámico del mundo⁷³.

¿Puede extrapolarse este modelo social, cultural y espacial al resto del mundo? Para responder a esta pregunta, en 1988 mi colega Peter Hall y yo emprendimos un viaje de varios años por el mundo, que nos llevó a visitar y analizar algunos de los principales centros científicos/tecnológicos de este planeta, de California a Japón, de Nueva Inglaterra a la vieja Inglaterra, de París-Sur a Hsinchu-Taiwan, de Sofía-Antípolis a Akademgorodok, de Zelenograd a Daeduck, de Múnich a Seúl. Nuestras conclusiones, presentadas en forma de libro⁷⁴, confirman el papel crucial desempeñado por los medios de innovación en el desarrollo de la revolución de la tecnología de la información: concentraciones de conocimiento científico/técnico, instituciones, empresas y trabajo cualificado constituyen las forjas de la innovación en la era de la información. No obstante, no necesitan reproducir el modelo cultural, espacial, institucional e industrial de Silicon Valley o de otros centros estadounidenses de innovación tecnológica, como California del Sur, Boston, Seattle o Austin.

Nuestro descubrimiento más sorprendente es que las viejas grandes áreas metropolitanas del mundo industrializado son los principales centros de innovación y producción en tecnología de la información fuera de los Estados Unidos. En Europa, París-Sur constituye la mayor concentración de producción e investigación de alta tecnología; y el corredor M-4 de Londres sigue siendo la ubicación preeminente para la electrónica británica, en continuidad histórica con las fábricas de armamento y material que trabajaban para la Corona desde el siglo XIX. El desplazamiento de Berlín por Múnich está obviamente relacionado con la derrota alemana en la Segunda Guerra Mundial, que supuso el traslado deliberado de Siemens de Berlín a Baviera en previsión de la ocupación estadounidense de esa zona. Tokio-Yokohama continúa siendo el núcleo tecnológico de la industria de la tecnología de la información japonesa, a pesar de la descentralización de las plantas sucursales operada bajo el Programa Tecnópolis. Moscú-Zelenograd y San Petersburgo fueron y son los centros del conocimiento y la producción tecnológicos soviéticos y rusos, tras el fracaso del sueño siberiano de Jruschov. Hsinchu es de hecho un satélite de Taipei; Daeduck nunca desempeñó un papel significativo frente a Seúl-Inchon, a pesar de encontrarse en la provincia natal del dictador Park; y Pekín y Shanghai son, como veremos, el núcleo del desarrollo tecnológico

⁷³ Rosen *et al.*, 1999.

⁷⁴ Castells y Hall, 1994.

chino. Al igual que lo son la ciudad de México en ese país, São Paulo-Campinas en Brasil y Buenos Aires en Argentina. En este sentido, el relativo retraso tecnológico de las viejas metrópolis estadounidenses (Nueva York-Nueva Jersey, a pesar de su papel prominente hasta la década de 1960; Chicago, Detroit, Filadelfia) es la excepción a nivel internacional, ligada con el excepcionalismo estadounidense del espíritu de frontera y con su huida interminable de las contradicciones de las ciudades construidas y las sociedades constituidas. Por otra parte, sería interesante explorar la relación que existe entre este excepcionalismo estadounidense y su indiscutible preeminencia en una revolución tecnológica caracterizada por la necesidad de romper moldes mentales para espolear la creatividad.

No obstante, el carácter metropolitano de la mayoría de los emplazamientos de la revolución de la tecnología de la información en todo el mundo parece indicar que el ingrediente crucial en este desarrollo no es que sea nuevo el entorno cultural e institucional, sino su capacidad para generar sinergia basándose en el conocimiento y la información, directamente relacionados con la producción industrial y las aplicaciones comerciales. La fuerza cultural y empresarial de las metrópolis (viejas o nuevas; después de todo, la zona de la Bahía de San Francisco es una metrópoli de más de seis millones de habitantes) las convierte en el entorno privilegiado de esta nueva revolución tecnológica, que en realidad desmiente la noción de que la innovación carece de lugar geográfico en la era de la información.

De modo similar, el modelo empresarial de la revolución de la tecnología de la información parece estar oscurecido por la ideología. No sólo son los modelos japonés, europeo o chino de innovación tecnológica bastante diferentes de la experiencia estadounidense, sino que incluso esta experiencia capital con frecuencia se toma en sentido erróneo. El papel del Estado suele reconocerse como decisivo en Japón, donde las grandes compañías fueron guiadas y respaldadas por el MITI durante largo tiempo, hasta bien entrados los años ochenta, mediante una serie de arriesgados programas tecnológicos, algunos de los cuales fracasaron (por ejemplo, los ordenadores de quinta generación), pero la mayoría ayudó a transformar a Japón en una superpotencia tecnológica en sólo unos veinte años, como ha documentado Michael Borrus⁷⁵. En la experiencia japonesa no puede hallarse la puesta en marcha de empresas innovadoras y las universidades tuvieron un papel pequeño. La planificación estratégica del MITI y la constante interfaz de *keiretsu* y gobierno son los elementos clave para explicar la proeza japonesa que abrumó a Europa y adelantó a los Estados Unidos en varios segmentos de las industrias de la tecnología de la información. Un relato similar puede contarse sobre Co-

⁷⁵ Borrus, 1988.

rea del Sur y Taiwan, si bien en el último caso las multinacionales desempeñaron un papel mayor. Las fuertes bases tecnológicas de India y China están directamente relacionadas con su complejo industrial militar, financiado y dirigido por el Estado.

Pero también fue el caso de gran parte de las industrias electrónicas británicas y francesas, centradas en las telecomunicaciones y la defensa, hasta la década de 1980⁷⁶. En el último cuarto del siglo XX, la Unión Europea desarrolló una serie de programas tecnológicos para mantenerse a la altura de la competencia internacional, respaldando de forma sistemática a los «campeones nacionales», incluso con pérdidas, sin mucho resultado. En efecto, el único medio de sobrevivir tecnológicamente de las compañías europeas de tecnología de la información fue utilizar sus considerables recursos (una parte sustancial de los cuales proviene de los fondos gubernamentales) para establecer alianzas con las compañías japonesas y estadounidenses, que cada vez más son su fuente principal de conocimientos prácticos en tecnología de la información avanzada⁷⁷.

Hasta en los Estados Unidos es un hecho bien conocido que los contratos militares y las iniciativas tecnológicas del Departamento de Defensa desempeñaron un papel decisivo en la etapa formativa de la revolución de la tecnología de la información, es decir, entre las décadas de 1940 y 1960. Incluso la principal fuente de descubrimientos electrónicos, los Laboratorios Bell, desempeñó de hecho el papel de un laboratorio nacional: su compañía matriz (ATT) disfrutó de un monopolio en las comunicaciones establecido por el gobierno, una parte significativa de sus fondos de investigación provino del gobierno estadounidense y de hecho se vio obligada por el gobierno, desde 1956, a cambio de su monopolio sobre las telecomunicaciones públicas, a difundir los descubrimientos tecnológicos al dominio público⁷⁸. El MIT, Harvard, Stanford, Berkeley, UCLA, Chicago, Johns Hopkins y los laboratorios de armamento nacionales como Livermore, Los Álamos, Sandia y Lincoln trabajaron con los organismos del Departamento de Defensa y para ellos en programas que condujeron a avances fundamentales, de los ordenadores de la década de 1940 a la optoelectrónica y las tecnologías de la inteligencia artificial de los programas de la «Guerra de las Galaxias» de la década de 1980. DARPA, el organismo de investigación extraordinariamente innovador del Departamento de Defensa, desempeñó en los Estados Unidos un papel no demasiado diferente al del MITI en el desarrollo tecnológico japonés, incluido el diseño y la financiación inicial de Internet⁷⁹. En efecto, en la década de 1980, cuando el

⁷⁶ Hall *et al.*, 1987.

⁷⁷ Freeman *et al.*, 1991; Castells *et al.*, 1991.

⁷⁸ Bar, 1990.

⁷⁹ Tirman, 1984; Broad, 1985; Stowsky, 1992.

ultraliberal gobierno de Reagan sintió el pellizco de la competencia japonesa, el Departamento de Defensa financió SEMATECH, un consorcio de empresas electrónicas estadounidenses, para apoyar costosos programas de I+D en la fabricación electrónica por razones de seguridad nacional. Y el gobierno federal también ayudó al esfuerzo cooperativo de importantes empresas para colaborar en la microelectrónica con la creación del MCC, ubicando SEMATECH y MCC en Austin (Texas) ⁸⁰. También, durante las decisivas décadas de 1950 y 1960, los contratos militares y el programa espacial resultaron mercados esenciales para la industria electrónica, tanto para los gigantescos contratistas de defensa de California del Sur como para los innovadores que se acababan de poner en marcha en Silicon Valley y Nueva Inglaterra ⁸¹. No podrían haber sobrevivido sin la generosa financiación y los mercados protegidos de un gobierno estadounidense ansioso por recobrar la superioridad tecnológica sobre la Unión Soviética, una estrategia que acabaría siendo rentable. La ingeniería genética que se derivó de la investigación de las principales universidades, hospitales e institutos de investigación sobre la salud, fue en buena medida financiada y patrocinada con dinero gubernamental ⁸². Así pues, el Estado, no el empresario innovador en su garaje, tanto en los Estados Unidos como en el resto del mundo, fue el iniciador de la revolución de la tecnología de la información ⁸³.

Sin embargo, sin estos empresarios innovadores, como los que estuvieron en el origen de Silicon Valley o de los ordenadores clónicos de Taiwan, la revolución de la tecnología de la información habría tenido características muy diferentes y no es probable que hubiera evolucionado hacia el tipo de herramientas tecnológicas descentralizadas y flexibles que se están difundiendo en todos los ámbitos de la actividad humana. En efecto, desde los comienzos de la década de 1970, la innovación tecnológica se ha dirigido esencialmente al mercado ⁸⁴; y los innovadores, aunque aún suelen ser empleados de las principales compañías, sobre todo en Japón y Europa, continúan estableciendo sus propias empresas en los Estados Unidos y, cada vez más, a lo largo del mundo. Ello provoca la aceleración de la innovación tecnológica y la difusión más rápida de esa innovación, ya que las mentes creadoras, llevadas por la pasión y la codicia, escudriñan constantemente la industria en busca de nichos de mercado en productos y procesos. *En efecto, es por esta interfaz de programas de macroinvestigación y grandes mercados desarrollados por el Estado, por una*

⁸⁰ Borrus, 1988; Gibson y Rogers, 1994.

⁸¹ Roberts, 1991.

⁸² Kenney, 1986.

⁸³ Véanse los análisis reunidos en Castells, 1988b.

⁸⁴ Banegas, 1993.

parte, y la innovación descentralizada estimulada por una cultura de creatividad tecnológica y modelos de rápido éxito personal, por la otra, por lo que las nuevas tecnologías de la información llegaron a florecer. Al hacerlo, agruparon a su alrededor redes de empresas, organizaciones e instituciones para formar un nuevo paradigma sociotécnico.

EL PARADIGMA DE LA TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

Como escribe Christopher Freeman:

Un paradigma tecnoeconómico es un grupo de innovaciones técnicas, organizativas y gerenciales interrelacionadas, cuyas ventajas se encuentran no sólo en una nueva gama de productos y sistemas, sino en su mayoría en la dinámica de la estructura del coste relativo de todos los posibles insumos (*inputs*) para la producción. *En cada nuevo paradigma, un insumo particular o conjunto de insumos puede describirse como el «factor clave» de ese paradigma, caracterizado por la caída de los costes relativos y la disponibilidad universal.* El cambio contemporáneo de paradigma puede contemplarse como el paso de una tecnología basada fundamentalmente en insumos baratos de energía a otra *basada sobre todo en insumos baratos de información derivados de los avances en la microelectrónica y la tecnología de las comunicaciones*⁸⁵.

La noción de paradigma tecnológico, elaborada por Carlota Pérez, Christopher Freeman y Giovanni Dosi, adaptando el análisis clásico de las revoluciones científicas de Kuhn, ayuda a organizar la esencia de la transformación tecnológica actual en su interacción con la economía y la sociedad⁸⁶. Creo que sería útil, como una guía para nuestro próximo viaje por los senderos de la transformación social, precisar los rasgos que constituyen el núcleo del paradigma de la tecnología de la información. Tomados en conjunto, constituyen la base material de la sociedad red.

La primera característica del nuevo paradigma es que la información es su materia prima: *son tecnologías para actuar sobre la información*, no sólo información para actuar sobre la tecnología, como era el caso en las revoluciones tecnológicas previas.

El segundo rasgo hace referencia a *la capacidad de penetración de los efectos de las nuevas tecnologías*. Puesto que la información es una parte integral de toda actividad humana, todos los procesos de nuestra existencia individual y colectiva están directamente moldeados (aunque sin duda no determinados) por el nuevo medio tecnológico.

⁸⁵ C. Freeman, prólogo a la parte II, en Dosi *et al.*, 1988a, pág. 10.

⁸⁶ Kuhn, 1962; Pérez, 1983; Dosi *et al.*, 1988a.

La tercera característica alude a la *lógica de interconexión* de todo sistema o conjunto de relaciones que utilizan estas nuevas tecnologías de la información. La morfología de red parece estar bien adaptada para una complejidad de interacción creciente y para pautas de desarrollo impredecibles que surgen del poder creativo de esa interacción⁸⁷. Esta configuración topológica, la red, ahora puede materializarse en todo tipo de procesos y organizaciones mediante tecnologías de la información de reciente disposición. Sin ellas, sería demasiado engorroso poner en práctica la lógica de interconexión. No obstante, ésta es necesaria para estructurar lo no estructurado mientras se preserva su flexibilidad, ya que lo no estructurado es la fuerza impulsora de la innovación en la actividad humana. Además, cuando las redes se difunden, su crecimiento se hace exponencial, en tanto que los beneficios de estar en la red crecen exponencialmente dado el mayor número de conexiones, mientras que los costes crecen de forma lineal. Además, los costes de exclusión de la red aumentan con el crecimiento de la red debido al número decreciente de oportunidades de alcanzar otros elementos fuera de ésta. El creador de la tecnología de la red de área local (LAN), Robert Metcalfe, propuso en 1973 una sencilla fórmula matemática que mostraba cómo el valor de la red aumenta con el cuadrado del número de nodos de la red. La fórmula es $V=n(n-1)$, donde n es el número de nodos de la red.

En cuarto lugar y relacionado con la interacción, aunque es un rasgo claramente diferente, el paradigma de la tecnología de la información se basa en la *flexibilidad*. No sólo los procesos son reversibles, sino que pueden modificarse las organizaciones y las instituciones e incluso alterarse de forma fundamental mediante la reordenación de sus componentes. Lo que es distintivo de la configuración del nuevo paradigma tecnológico es su capacidad para reconfigurarse, un rasgo decisivo en una sociedad caracterizada por el cambio constante y la fluidez organizativa. Cambiar de arriba abajo las reglas sin destruir la organización se ha convertido en una

⁸⁷ Kelly, 1995, págs. 25-27, amplía las propiedades de la lógica de la interconexión en unos certeros párrafos:

El átomo es el pasado. El símbolo de la ciencia para el siglo próximo es la red dinámica. [...] Mientras que el átomo representa la simplicidad limpia, la red canaliza el poder desordenado de la complejidad. [...] La única organización capaz de un crecimiento sin prejuicios o un aprendizaje sin guía es la red. Todas las demás topologías limitan lo que pueda pasar. Un enjambre de redes es todo bordes y, por ello, abierta, sin que importe por dónde se entre. En efecto, la red es la organización menos estructurada de la que pueda decirse que tiene una estructura. [...] De hecho, una pluralidad de componentes verdaderamente divergentes sólo pueden guardar coherencia en una red. Ninguna otra disposición —cadena, pirámide, árbol, círculo, cubo— puede contener a la diversidad auténtica funcionando como un todo.

Aunque es posible que los matemáticos y los físicos rechacen algunas de estas afirmaciones, el mensaje básico de Kelly es interesante: la convergencia entre la topología evolutiva de la materia viva, la naturaleza abierta de una sociedad cada vez más compleja y la lógica interactiva de las nuevas tecnologías de la información.

posibilidad debido a que la base material de la organización puede reprogramarse y reequiparse⁸⁸. Sin embargo, debemos evitar un juicio de valor sobre este rasgo tecnológico. Porque la flexibilidad puede ser una fuerza liberadora, pero también una tendencia represiva si quienes reescriben las leyes son siempre los mismos poderes. Como Mulgan escribió, «las redes se han creado no sólo para comunicar, sino también para ganar posición, para sobrecomunicar»⁸⁹. Así pues, es esencial mantener una distancia entre afirmar el surgimiento de nuevas formas y procesos sociales, inducidos y permitidos por las nuevas tecnologías, y extrapolar las consecuencias potenciales de tales desarrollos para la sociedad y la gente: sólo los análisis específicos y la observación empírica serán capaces de determinar el resultado de la interacción de las nuevas tecnologías y las formas sociales emergentes. No obstante, también es esencial identificar la lógica intrínseca del nuevo paradigma tecnológico.

Una quinta característica de esta revolución tecnológica es la *convergencia creciente de tecnologías específicas en un sistema altamente integrado*, dentro del cual las antiguas trayectorias tecnológicas separadas se vuelven prácticamente indistinguibles. Así, la microelectrónica, las telecomunicaciones, la optoelectrónica y los ordenadores están ahora integrados en sistemas de información. Aún existe, y existirá durante cierto tiempo, alguna distinción empresarial entre fabricantes de chips y diseñadores de *software*, por ejemplo. Pero hasta esta diferenciación está quedando borrada por la creciente integración de las firmas empresariales en alianzas estratégicas y proyectos de colaboración, así como por la inscripción de los programas de *software* en el *hardware* de los chips. Además, en lo referente al sistema tecnológico, un elemento no puede imaginarse sin el otro: los microordenadores están en buena parte determinados por la potencia del chip y tanto el diseño como el procesamiento paralelo de los microprocesadores depende de la arquitectura del ordenador. Las telecomunicaciones son ahora sólo una forma de procesar la información; las tecnologías de transmisión y enlace están al mismo tiempo cada vez más diversificadas e integradas en la misma red, operada por los ordenadores⁹⁰. Según el análisis anterior, el desarrollo de Internet está invirtiendo la relación entre la propia Internet y la centralita telefónica en las tecnologías de comunicación, de modo que la transmisión de datos se convierte en la forma predominante, universal, de comunicación. Y la transmisión de datos se basa en instrucciones de *software* para su codificación y decodificación.

La convergencia tecnológica se extiende cada vez más hacia una interdependencia creciente de las revoluciones de la biología y la micro-

⁸⁸ Tuomi, 1999.

⁸⁹ Mulgan, 1991, pág. 21.

⁹⁰ Williams, 1991.

electrónica, tanto desde una perspectiva material como metodológica. Así, los decisivos avances en la investigación biológica, como la identificación de los genes humanos o de segmentos del ADN humano, sólo pueden seguir adelante debido a la ingente potencia de los ordenadores⁹¹. Gracias a la nanotecnología sería posible introducir diminutos microprocesadores en el sistema de seres vivos, incluidos los humanos⁹². Por otra parte, el uso de materiales biológicos en la microelectrónica, aunque aún muy lejos de una aplicación generalizada, ya estaba en un estadio de experimentación a finales de los noventa. En 1995, Leonard Adleman, científico informático de la Universidad de California del Sur, utilizó moléculas sintéticas de ADN, con la ayuda de una reacción química, para hacerlas funcionar según la lógica combinatoria del ADN, como base material de la informática⁹³. Aunque los investigadores tienen aún un largo camino que recorrer hacia la integración material de la biología y la electrónica, la lógica de la primera (la capacidad de autogenerar secuencias no programadas y coherentes) se está introduciendo cada vez más en las máquinas electrónicas⁹⁴. En 1999, Harold Abelson y sus colegas del laboratorio científico del MIT intentaban «trocear» la bacteria *E. coli* para que pudiera funcionar como un circuito electrónico con capacidad de autorreproducirse. Experimentaban con la «computación amorfa», es decir, integrar circuitos en material biológico. Como las células biológicas sólo pueden computar mientras están vivas, esta tecnología se combinaría con la electrónica molecular, insertando millones o miles de millones de estos conmutadores de base biológica en espacios diminutos, con la aplicación potencial de producir «materiales inteligentes» de todo tipo⁹⁵.

Algunos experimentos de investigación avanzada en la interacción entre ser humano y ordenador se basan en el uso de interfaces cerebrales adaptativas que reconocen estados mentales a partir de las señales de electroencefalogramas espontáneos (EEG) *on-line*, basadas en la teoría de redes neuronales artificiales. Así, en 1999, en el European Union Joint Research Center de Ispra, Italia, el científico informático José Millán y sus colegas lograron mostrar experimentalmente que sujetos provistos de un casco EEG compacto podían comunicarse mediante el control consciente de sus pensamientos⁹⁶. Su enfoque se basaba en un proceso de aprendizaje mutuo a través del cual el usuario y la interfaz cerebral se

⁹¹ Bishop y Waldholz, 1990; *Business Week*, 1995e, 1999b, págs., 90-92.

⁹² Hall, 1999b.

⁹³ Allen, 1995.

⁹⁴ Para un análisis de las tendencias, véase Kelly, 1995; para una perspectiva histórica de la convergencia entre mente y máquinas, véase Mazlish, 1994; para una reflexión teórica, véase Levy, 1994.

⁹⁵ Markoff, 1999b.

⁹⁶ Millán *et al.*, 2000.

acoplaban y adaptaban mutuamente. Por tanto, una red neuronal aprende pautas EEG específicas del usuario, al tiempo que los sujetos aprenden a pensar de tal modo que su interfaz personal pueda entenderles mejor.

La convergencia en curso entre diferentes campos tecnológicos en el paradigma de la información es el resultado de su lógica común de generación de la información, una lógica que es más evidente en las funciones del ADN y en la evolución natural, y que cada vez se reproduce más en los sistemas de información más avanzados, a medida que los chips, los ordenadores y el *software* alcanzan nuevas fronteras de velocidad, capacidad de almacenamiento y tratamiento flexible de la información desde fuentes múltiples. Si bien la reproducción del cerebro humano, con sus miles de millones de circuitos e insuperable capacidad de recombinación, es estricta ciencia ficción, los límites de la capacidad de información de los ordenadores actuales se traspasan cada mes⁹⁷.

A partir de la observación de este cambio tan extraordinario en nuestras máquinas y el conocimiento de la vida, y con la ayuda proporcionada por estas máquinas y este conocimiento, está teniendo lugar una profunda transformación tecnológica. El historiador de la tecnología Bruce Mazlish propone la idea del necesario

reconocimiento de que la evolución biológica humana, ahora mejor comprendida en términos culturales, obliga a la humanidad —nosotros— a aceptar la conciencia de que herramientas y máquinas son inseparables de la naturaleza evolutiva humana. También requiere que nos demos cuenta de que el desarrollo de las máquinas, culminando en el ordenador, hace ineludible la percepción de que las mismas teorías que resultan útiles para explicar los funcionamientos de los artificios mecánicos también lo son para comprender al animal humano, y viceversa, ya que la comprensión del cerebro humano arroja luz sobre la naturaleza de la inteligencia artificial⁹⁸.

Desde una perspectiva diferente, basada en los discursos sobre la «teoría del caos» tan de moda en los años ochenta, en los noventa una red de científicos e investigadores convergió en un enfoque epistemológico común, identificado por la palabra clave de «complejidad». Organizados en torno a seminarios celebrados en el Santa Fe Institute de Nuevo México (originalmente un club de físicos de alto nivel del laboratorio de Los Álamos, a los que pronto se sumó una red selecta de premios Nobel y sus amigos), este círculo intelectual tiene como objetivo comunicar el pensamiento científico (incluidas las ciencias sociales) bajo un nuevo paradigma. Tratan de comprender la aparición de estructuras auto-

⁹⁷ Véase el excelente análisis de futuro de Gelernter, 1991.

⁹⁸ Mazlish, 1993, pág. 233.

organizativas que crean complejidad a partir de la simplicidad y un orden superior a partir del caos a través de diversos órdenes de interacción entre los elementos básicos que están en el origen del proceso⁹⁹. Aunque la ciencia ortodoxa muchas veces desestima el proyecto como proposición no verificable, es un ejemplo más del esfuerzo que se realiza, desde frentes distintos, por encontrar un terreno común para la fertilización intelectual mutua de la ciencia y la tecnología en la era de la información. Sin embargo, este enfoque parece vetar cualquier marco integrador y sistemático. El pensamiento de la complejidad debe considerarse un método para la comprensión de la diversidad más que una metateoría unificada. Su valor epistemológico podría derivarse del reconocimiento del carácter autoorganizativo de la naturaleza y de la sociedad. No se trata de que no existan reglas, sino de que las reglas se crean, y se modifican, en un proceso incesante de acciones deliberativas e interacciones únicas. Así, en 1999 un joven investigador del Santa Fe Institute, Duncan Watts, propuso un análisis formal de la lógica de conexión en red subyacente a la formación de «pequeños mundos», es decir, al amplio conjunto de conexiones, en la naturaleza y en la sociedad, entre elementos que, aunque no se comuniquen de forma directa, de hecho están relacionados por una corta cadena de intermediarios. Por ejemplo, Watts muestra matemáticamente que si representamos los sistemas de relaciones mediante un gráfico, la clave para generar el fenómeno de un pequeño mundo (que resume la lógica de conexión en red) es la presencia de una pequeña fracción de límites globales de alcance muy amplio que contraen partes del gráfico que, de no ser por ellos, quedarían distanciadas, mientras que la mayoría de los límites siguen siendo locales, organizados en agrupaciones¹⁰⁰. Esto representa con exactitud la lógica de la interconexión global/local en redes de innovación, como se ha documentado en este capítulo. La contribución relevante de la escuela de pensamiento de la teoría de la complejidad es su énfasis en la dinámica no lineal como enfoque más fructífero para comprender la conducta de los sistemas vivos, tanto en la sociedad como en la naturaleza. La mayoría del trabajo de los investigadores del Santa Fe Institute es de naturaleza matemática, no un análisis empírico de los fenómenos naturales o sociales. Pero hay investigadores en distintos campos de la ciencia que utilizan la dinámica no lineal como principio guía, con resultados científicos cada vez más im-

⁹⁹ La difusión de la teoría del caos a una audiencia amplia se debió en buena medida al *best-seller* de Gleick, 1987; véase también Hall, 1991. Para una historia interesante y de escritura clara sobre la escuela de la «complejidad», véase Waldrop, 1992. También me he basado en conversaciones personales con investigadores del Santa Fe Institute durante mi visita al Instituto en noviembre de 1998. Estoy especialmente agradecido a Brian Arthur por compartir conmigo sus ideas.

¹⁰⁰ Watts, 1999.

portantes. Fritjof Capra, un físico teórico y ecologista de Berkeley, ha integrado muchos de estos resultados en un bosquejo de una teoría coherente de los sistemas vivos en una serie de libros, particularmente en su notable *Web of Life*¹⁰¹. Capra desarrolló su trabajo basándose en la obra del premio Nobel Ilya Prigogine. La teoría de las estructuras disipativas de Prigogine demostró la dinámica no lineal de la autoorganización de los ciclos químicos y permitió una nueva interpretación de la emergencia espontánea del orden como característica clave de la vida. Capra muestra cómo las investigaciones de vanguardia en áreas tan diversas como el desarrollo de las células, los sistemas ecológicos globales (representada por la controvertida teoría de Gaia y el modelo de simulación *Daisy-world* de Lovelock), la neurociencia (por ejemplo, en la obra de Gerald Edelman u Oliver Sacks) y los estudios sobre los orígenes de la vida basados en la teoría de redes químicas son en su totalidad manifestaciones de la perspectiva de una dinámica no lineal¹⁰². Nuevos conceptos clave, como los de atractores, imágenes de fase, propiedades emergentes o fractales ofrecen nuevas perspectivas para entender observaciones del comportamiento de los sistemas vivos, incluidos los sistemas sociales, preparando así el camino para un nexo teórico entre diversos campos de la ciencia. No reduciéndolos a un conjunto común de normas, sino explicando los procesos y los resultados a partir de las propiedades autogenerativas de sistemas vivos específicos. Brian Arthur, un economista de Stanford que participa en el Santa Fe Institute, ha aplicado la teoría de la complejidad a la teoría económica formal, proponiendo conceptos como los de mecanismo de autorrefuerzo, dependencia de la trayectoria y propiedades emergentes, y mostrando su relevancia para la comprensión de las características de la nueva economía¹⁰³.

En suma, el paradigma de la tecnología de la información no evoluciona hacia su cierre como sistema, sino hacia su apertura como una red multifacética. Es poderoso e imponente en su materialidad, pero adaptable y abierto en su desarrollo histórico. Sus cualidades decisivas son su carácter integrador, la complejidad y la interconexión.

De este modo, la dimensión social de la revolución de la tecnología de la información parece obligada a seguir la ley sobre la relación entre tecnología y sociedad propuesta hace tiempo por Melvin Kranzberg: «*La primera ley de Kranzberg dice lo siguiente: La tecnología no es buena ni mala, ni tampoco neutral*»¹⁰⁴. Es en efecto una fuerza, probablemente más que nunca bajo el paradigma tecnológico actual, que penetra en el núcleo

¹⁰¹ Capra, 1995.

¹⁰² Capra, 1999b.

¹⁰³ Arthur, 1998.

¹⁰⁴ Kranzberg, 1985, pág. 50.

de la vida y la mente ¹⁰⁵. Pero su despliegue real en el ámbito de la acción social consciente y la compleja matriz de interacción de las fuerzas tecnológicas desatadas por nuestra especie, y la misma especie, son una cuestión que ha de investigarse, más que una fatalidad ineludible. A continuación, procederé con dicha investigación.

¹⁰⁵ Para una exposición informativa de los avances ocurridos en las encrucijadas de la ciencia y la mente humana, véase Baumgartner y Payr, 1995. Para una interpretación más contundente, aunque polémica, de uno de los fundadores de la revolución genética, véase Crick, 1994.