

## Incertidumbre y cambio tecnológico\*

● NATHAN ROSENBERG  
Stanford University

Quisiera empezar formulando dos proposiciones que se aceptan de forma general: 1) el cambio tecnológico es un ingrediente fundamental del crecimiento económico a largo plazo, y 2) el cambio tecnológico se caracteriza por presentar un grado elevado de incertidumbre. Comprender la naturaleza de esas incertidumbres y los obstáculos para superarlas no es un asunto banal. Al contrario, apunta al corazón de cómo se idean las nuevas tecnologías, con qué rapidez se difunden, el alcance último de esa difusión, y su consiguiente impacto en el comportamiento de la economía y de la prosperidad económica.

Teniendo en cuenta las grandes incertidumbres que conlleva el proceso de innovación, no es muy sorprendente que las empresas innovadoras hayan experimentado históricamente elevadas tasas de fracaso. Simple y llanamente, la gran mayoría de intentos de innovación fracasan. Pero describir la elevada tasa de fracaso en relación a las innovaciones pasadas, sólo es decir una parte de la historia, y quizá no sea la parte más interesante. En realidad, lo que quiero sugerir es que la parte más curiosa de la historia, a la que me referiré principalmente, ha sido la incapacidad de anticipar el futuro impacto de las innovaciones *con éxito*, incluso después de que se haya verificado su viabilidad técnica. Esta afirmación resulta válida tanto si nos referimos a la máquina de vapor de hace doscientos años, como al láser de nuestros tiempos.

\* Una versión previa de este artículo fue presentada en la *Conference on Growth and Development: The Economics of the 21st Century*, organizada por el *Center for Economic Policy Research* de la Universidad de Stanford, los días 3 y 4 de junio de 1994. El autor quiere agradecer los valiosos comentarios de Moses Abramovitz, Victor Fuchs, Ralph Landau, Roberto Mazzoleni, Richard Nelson, Richard Rosenbloom, Scott Stern y miembros del Program on Economic Growth and Policy of the Canadian Institute for Advanced Research, a versiones anteriores de este texto.

Sugeriré que la incertidumbre tiene diversas procedencias y que posee una serie de características peculiares que conforman el proceso de innovación y, por consiguiente, la forma en que el cambio tecnológico ejerce sus efectos en la economía. Aunque me referiré fundamentalmente a lo que ha configurado la trayectoria y el impacto económico de las nuevas tecnologías, mi centro de atención se limitará a las tecnologías que han tenido impactos significativos. Un estudio que incluyese tanto las innovaciones logradas como las fracasadas proporcionaría visiones de una naturaleza muy diferente.

Debo decir también al principio que, aunque no me interesa de forma prioritaria la reciente literatura formal relativa a la teoría del crecimiento (concretamente la Nueva Teoría del Crecimiento), me sorprende que esta literatura haya omitido, por lo menos hasta el momento, cualquier referencia a la incertidumbre. Aunque la tasa de innovación depende seguramente del grado en que los inversores se pueden apropiar de los beneficios de su innovación, una serie de características centrales del proceso de innovación giran alrededor de la incertidumbre. En última instancia, existe una estimación riesgo/beneficio a tener en cuenta cuando se evalúan los proyectos, que refleja la incertidumbre inherente a la posibilidad de apropiación. Pero los tipos de incertidumbre que aquí identificaremos van más allá del tema de la apropiabilidad.

Me parece necesario hacer una advertencia más. La discusión que sigue es "anécdótica" por naturaleza. Sin embargo, las anécdotas han sido seleccionadas deliberadamente para incluir muchas de las innovaciones más importantes del siglo veinte. De modo que, si las caracterizaciones que se ofrecen a continuación resisten la prueba de un examen posterior, los análisis de este artículo habrán captado los rasgos destacados del proceso de innovación para las tecnologías cuya importancia económica acumulativa ha sido inmensa.

Es fácil suponer que las incertidumbres se reducen de forma radical después de la primera introducción comercial de una nueva tecnología, y Schumpeter fomentó notablemente este supuesto. Sus puntos de vista han demostrado ser muy influyentes. En el mundo de Schumpeter los empresarios se veían obligados a tomar decisiones en circunstancias en las que la información era muy limitada y de poca calidad. Pero en aquel mundo la realización de una innovación con éxito resolvía todas las incertidumbres ex ante. Una vez que esto ocurre, el escenario está dispuesto para los imitadores, cuyas acciones son las responsables de la difusión de una tecnología. Quizá deberíamos decir que entonces el escenario queda listo para los "simples imitadores". Schumpeter era muy aficionado a poner el adjetivo "simples" delante del nombre "imitadores". La cuestión tiene una importancia real, no se trata sólo de un uso lingüístico. Desde el punto de vista de Schumpeter, la vida es fácil para los imitadores, puesto que todo lo que necesitan hacer es seguir los pasos de los empresarios que han llevado la delantera y cuyas anteriores actividades han resuelto todas las grandes incertidumbres.

Es cierto, desde luego, que se han reducido algunas incertidumbres cuando se llega a este punto. No obstante, después de establecer una nueva capacidad tecnológica, los problemas cambian y, como veremos, empiezan a plantearse nuevas incertidumbres, en especial incertidumbres de naturaleza específicamente económica.

El propósito de este artículo es identificar y definir una serie de aspectos importantes de la incertidumbre en la medida que tienen relación con el cambio tecnológico. Estos aspectos van mucho más allá de los únicamente conectados con el proceso de invención. Además, como veremos, reflejan un conjunto de fuerzas interrelacionadas que se hallan en el corazón de la relación entre los cambios tecnológicos y los logros en el funcionamiento de la economía.

### Algunas perspectivas históricas

Tomemos en consideración el láser, una innovación que es seguramente uno de los avances tecnológicos más poderosos y versátiles del siglo veinte, y que probablemente se encuentra en los primeros estadios de su trayectoria de desarrollo. La amplitud de sus usos, desde que fuera inventado hace treinta años, es verdaderamente impresionante. Incluyen la medición de precisión, los instrumentos de navegación y una herramienta fundamental de la investigación química. Es esencial para la reproducción de alta calidad de música en los discos compactos (CDs). Se ha convertido en el instrumento predilecto en una serie de procedimientos quirúrgicos, entre los cuales está la cirugía del ojo, que es extraordinariamente delicada, y en la que se utiliza para recomponer los desprendimientos de retina. En la cirugía ginecológica proporciona un método más simple y menos doloroso para extirpar ciertos tumores. Se emplea mucho en la cirugía de la vesícula biliar. Las páginas de este manuscrito se han imprimido con un láser ( impresora HP Laser jet). Se utiliza ampliamente en toda la industria, incluyendo la industria textil donde se emplea para cortar telas según los patrones, y en la metalurgia y los materiales compuestos en las que realiza funciones parecidas.

Pero quizá ninguna de las aplicaciones del láser ha tenido un impacto más profundo que el ocurrido en las telecomunicaciones, donde, junto con la fibra óptica, está revolucionando la transmisión. En 1966, el mejor cable telefónico transatlántico podía transmitir sólo 138 conversaciones simultáneas entre Europa y Norteamérica. El primer cable de fibra óptica, instalado en 1988, podía transmitir 40.000. Los cables de fibra óptica que se han instalado a principios de la década de los noventa pueden transmitir cerca de un millón y medio de conversaciones (Wriston, 1992, pp. 43-44). Y, sin embargo, sabemos que los abogados encargados de patentes en la Bell Labs no querían en un principio ni siquiera solicitar una patente para el láser, diciendo que esa invención no tenía ninguna relevancia posible para la industria telefónica. En palabras de Charles Townes, que posteriormente obtuvo un Premio Nobel por su investigación sobre el láser, “el departamento de patentes de Bell se negó en un principio a patentar nuestro amplificador u oscilador para frecuencias ópticas porque, se dijo, las ondas ópticas nunca habían tenido importancia alguna para las comunicaciones y por consiguiente la invención tenía poco que ver con los intereses del Bell System” (Townes, 1968, p. 701).

Citemos algunos ejemplos históricos importantes más en los que el tema común sea la notable falta de capacidad, al menos *desde una perspectiva posterior*, para pre-

ver los usos que se darían a nuevas tecnologías. A la Western Union, la compañía de telégrafos, se le ofreció la oportunidad de comprar la patente del teléfono de Bell de 1876 sólo por 100.000 dólares, pero la rechazó. De hecho, "La Western Union quería retirarse del campo del teléfono en 1879 a cambio de la promesa de Bell de mantenerse al margen del negocio del telégrafo." Pero si los propietarios de la tecnología de las viejas comunicaciones eran miopes, también lo era el poseedor de la patente de la nueva tecnología. La patente de Alexander Graham Bell de 1876 no mencionaba para nada una nueva tecnología. Por el contrario, llevaba el vistoso y engañoso título de "Mejoras en la Telegrafía." (Brock, 1982, p. 90)

Marconi, que inventó la radio, previó que se usaría principalmente para establecer comunicación entre dos puntos entre los cuales era imposible la comunicación por cable; por ejemplo, comunicación de un barco a otro, o de un barco a la costa (desde entonces los británicos llaman a este instrumento "inalámbrico", reflejando precisamente la primera conceptualización de Marconi). Además, en sus primeros tiempos se pensó que la radio tendría un uso potencial sólo en la comunicación privada: es decir, comunicación de un punto a otro, de forma parecida al teléfono, y en absoluto se pensó en la comunicación a un gran público de oyentes. Aunque hoy nos pueda parecer sorprendente, el inventor de la radio no pensó en ella como un instrumento para la difusión de programas. De hecho, Marconi tenía una idea del mercado para la radio que era exactamente la opuesta a la que realmente se desarrolló. Imaginaba que los usuarios de su invento serían las compañías navieras, los periódicos y las armadas. Estas necesitaban una comunicación direccional, de un punto a otro (es decir, "difusión restringida"), en lugar de la radiodifusión. Por consiguiente, la radio debía tener capacidad para transmitir a grandes distancias, pero los mensajes serían privados, no públicos (Douglas, p. 34).

El fracaso de la imaginación social era generalizado. Según una autoridad: "Cuando se propuso la radiodifusión por primera vez (...) un hombre que posteriormente llegó a ser uno de los líderes más distinguidos de la industria anunció que era muy difícil encontrar usos para la radiodifusión pública. Casi el único uso regular que se le ocurrió fue la difusión de los sermones dominicales, puesto que ésta es la única ocasión en que un hombre se dirige con regularidad a un público masivo" (Martin, 1977, p. 11).

Cuando en la segunda década del siglo XX fue factible el teléfono inalámbrico, se pensó en él exactamente en los mismos términos que en la radio. J.J. Carty, ingeniero jefe de la New York Telephone Company, afirmaba en 1915: "Los resultados de las pruebas a larga distancia demuestran con claridad que la función del teléfono inalámbrico es ante todo llegar a lugares inaccesibles donde no es posible tender cables. Actuará principalmente como una extensión del sistema por cable y como afluente del mismo" (Maclaurin, 1949, pp. 92-93).

En 1949 se pensaba que el uso potencial del ordenador sería sólo para el cálculo rápido en unos pocos contextos de investigación científica o de proceso de datos. Nada menos que Thomas Watson, Sr., que en aquel momento era presidente de IBM, recha-

zaba la idea de que existiese un amplio mercado potencial. La opinión mayoritaria antes de 1950 era que la demanda mundial estaría probablemente satisfecha con un reducido número de ordenadores (Ceruzzi, 1987, pp. 188-193).

La invención del transistor, que a buen seguro ha sido uno de los mayores inventos del siglo XX, no se anunció en la primera página del *New York Times* como cabría haber esperado cuando se hizo pública en Diciembre de 1947. Por el contrario, salió como una pequeña noticia perdida en las páginas interiores del periódico, en una columna semanal titulada "Noticias de la radio", allí se sugería que el aparato se podría utilizar para mejorar los audífonos para personas con sordera, pero nada más.

La lista de los fracasos en la anticipación de futuros usos y mercados amplios para nuevas tecnologías se podría extender casi ilimitadamente. Si quisiéramos, nos podríamos divertir indefinidamente ante la incapacidad de las generaciones pasadas para ver lo evidente, tal como hoy lo vemos. Pero eso sería una presunción equivocada. Por una serie de razones que propongo examinar, no soy particularmente optimista por lo que se refiere a nuestra capacidad de superar las incertidumbres ex ante conectadas con los usos de las nuevas tecnologías. No creo que vayan a mejorar notablemente. Si estoy en lo cierto, sería muy útil explorar qué incentivos, instituciones y políticas pueden conducir a una resolución más rápida de estas incertidumbres.

En mi opinión, gran parte de la dificultad reside en el hecho de que las nuevas tecnologías hagan habitualmente su entrada en el mundo en un estado muy primitivo. Sus empleos potenciales aparecen a lo largo de un prolongado proceso de mejoras que amplía muchísimo sus aplicaciones prácticas. Thomas Watson Sr. no estaba del todo desencaminado cuando concluía que el futuro mercado del ordenador era extremadamente limitado, *si pensamos en el ordenador que existía inmediatamente después de la Segunda Guerra Mundial*. El primer ordenador digital electrónico, el ENIAC, tenía por lo menos 18.000 válvulas de vacío y ocupaba un gran espacio (tenía más de 30 metros de largo). Cualquier aparato que requiera el funcionamiento simultáneo de 18.000 válvulas de vacío tiene que tener fama de ser poco fiable. Fracasos en la predicción era fracasos en la anticipación de la demanda de ordenadores después de que éstos fuesen mucho más pequeños, baratos y fiables, y cuando las características de sus prestaciones, en especial su velocidad de cálculo, se hubiesen multiplicado por un considerable orden de magnitud. Es decir, el fracaso era la incapacidad de anticipar la trayectoria de las mejoras futuras, y de las consecuencias económicas de aquellas mejoras.

Si el espacio lo permitiese, se podría contar la historia de la aviación comercial en términos parecidos a la de muchas otras innovaciones. Con respecto a la introducción del motor a reacción, en particular, el fracaso en anticipar la importancia de las futuras mejoras tuvo lugar incluso en los niveles científicos más eminentes. En 1940, se creó una comisión en la National Academy of Sciences para evaluar las perspectivas de desarrollo de una turbina a gas para los aviones. La comisión llegó a la conclusión de que una turbina de este tipo era carente por completo de sentido práctico puesto que pesaría 15 libras por cada caballo de fuerza desarrollado, mientras que los motores de combustión

interna existentes pesaban sólo un poco más de una libra por cada caballo desarrollado. De hecho, al cabo de un año los británicos hacían funcionar una turbina de gas que pesaba sólo cuatro décimas de libra por cada caballo de fuerza (*Technical Bulletin*, 1941, p. 10).

Este es un lugar apropiado para hacer una observación muy simple y no obstante fundamental: la mayor parte de los gastos en I+D se dedican a la mejora del producto. Según los informes anuales de McGraw-Hill hechos a lo largo de una serie de años, el grueso de I+D (alrededor del 80%) se dedica a mejorar productos que ya existen, más que a la invención de nuevos productos. Así, es incorrecto pensar que los gastos de I+D se emplean en la búsqueda de grandes innovaciones de tipo schumpeteriano. Por el contrario, hay que pensar que el grueso de esos gastos presenta una trayectoria de características fuertemente determinadas. Su objetivo principal es mejorar las prestaciones de tecnologías heredadas del pasado. Si lo pensamos bien, eso no debería sorprendernos. El teléfono existe desde hace más de cien años, pero sólo recientemente se han aumentado sus prestaciones de forma significativa con la transmisión facsímil, el correo electrónico (correo-e), el *voice mail*, la transferencia de datos, los *on-line services*, las *conference calls* y los números "800". El automóvil y el avión tienen cada uno de ellos más de 90 años, la cámara fotográfica tiene 150 años y la máquina Fourdrinier, que es el pilar principal de la industria papelera actual, se patentó durante las guerras napoleónicas. Sin duda, el proceso de mejora merece mucha mayor atención de la que sugería el frecuente recurso de Schumpeter al ridículo término de "meros imitadores." También, sin duda, un mundo en el que la mayor parte de los gastos I+D se dedican a la mejora de tecnologías que ya existen es también un mundo en el que el cambio tecnológico difícilmente se puede caracterizar como exógeno.

Hasta aquí se ha indicado, citando casos históricos importantes, que la incertidumbre juega un papel en el cambio tecnológico que va más allá de la incertidumbre asociada únicamente a la viabilidad tecnológica. Desde luego, la incertidumbre asociada a los usos potenciales del láser o del ordenador se podrían caracterizar, de manera más apropiada, como "ignorancia" más que como "incertidumbre". Es decir, en cualquier dimensión particular de la incertidumbre, aquellos que toman las decisiones carecen de acceso ni siquiera marginal a la información sobre la distribución de la probabilidad, con respecto a los resultados potenciales. ¡No es difícil demostrar que la ignorancia juega un gran papel en el proceso de cambio tecnológico! Sin embargo, en lugar de discutir acerca de las diferencias que existen entre la incertidumbre Arroviana y la Knightiana, la sección siguiente de este artículo bosquejará una serie de dimensiones importantes en las que la incertidumbre juega un papel en la proporción y la dirección de la actividad y la difusión inventivas. Tomadas en su conjunto, tenemos muy poca información, *incluso retrospectiva*, acerca de las relaciones que existen entre esas distintas dimensiones. Si existe la incertidumbre en más de una dimensión, y los que toman las decisiones no tienen información sobre la distribución *combinada* de todas las variables aleatorias relevantes, entonces no hay muchas razones para creer que es posible tomar una decisión "racional", o que habrá una inversión "óptima" bien definida, o que se adoptará una estrategia apropiada.

## Las dimensiones de la incertidumbre

¿Por qué es tan difícil prever el impacto incluso de los inventos que son factibles desde el punto de vista tecnológico? Gran parte de la literatura relevante subraya la enorme incertidumbre que acompaña a la pregunta: "¿Funcionará?". Esta es, sin duda, una fuente importante de incertidumbre, pero la fijación en el problema del funcionamiento ha servido para distraer la atención de otras varias fuentes de incertidumbre más sutiles y solapadas. Vamos ahora a tomarlas en consideración.

1. No se trata sólo de que las nuevas tecnologías vengan al mundo en un estado muy primitivo; a menudo vienen con unas propiedades y características cuya utilidad no se puede apreciar de inmediato. Es intrínsecamente difícil identificar usos para las nuevas tecnologías. El láser (*Light Amplification by Stimulated Emission and Radiation*) representa, a un cierto nivel, simplemente un rayo de luz formado por la excitación de átomos en elevados niveles de energía. Se ha descubierto que la acción del láser puede darse con un amplio abanico de materiales que incluye gases, líquidos y sólidos. Los usos a los cuales se ha aplicado esta capacidad han ido creciendo durante treinta años, como se ha indicado antes, y sin duda continuarán creciendo durante mucho tiempo, al igual que costó muchas décadas explorar los posibles usos de la electricidad después de que Faraday descubriese los principios de la inducción electromagnética en 1831.<sup>1</sup>

Un aspecto esencial tanto de la electricidad como del láser es que ni representaron una clara sustitución de algo que ya existiera, ni tuvieron un antecedente definido con claridad. Más bien, cada uno fue un fenómeno descubierto de forma completamente nueva como resultado de la investigación científica pura.<sup>2</sup>

En el terreno de los diagnósticos médicos ha ocurrido con frecuencia que, tras el desarrollo de alguna nueva tecnología de exploración, ha costado mucho tiempo aprender cómo traducir la nueva capacidad de observación en términos clínicamente útiles. Este ha sido el caso con respecto a los *scanners* CAT, las imágenes hechas a partir de la resonancia magnética y, más recientemente, las ecocardiografías. A menudo ha sido necesario dedicar mucho tiempo de investigación adicional antes de que fuera posible hacer una interpretación fiable y provechosa, desde el punto de vista clínico, de lo que se visualizaba en la diagnosis de una enfermedad en el corazón, los pulmones o el cerebro.

Este es actualmente el caso con respecto al PET (*positron emission tomography*). Las exploraciones PET son instrumentos poderosos para proporcionar un análisis

1. Consta que un escéptico miembro del Parlamento se dirigió al laboratorio de Faraday poco después de su descubrimiento de la inducción electromagnética y le preguntó, en un tono más bien desdefioso, para qué servía. Se dice que Faraday contestó: "Señor, no sé muy bien para qué sirve, pero estoy seguro de una cosa: algún día lo gravará usted con un impuesto".

2. De hecho, en 1916, Einstein había desarrollado la ciencia pura que subyace a la acción del láser en un artículo sobre la emisión estimulada. Desde el punto de vista de la historia de la ciencia, se podría decir que no había "nada nuevo" cuando se desarrolló la tecnología del láser 45 años después, aunque en realidad se concedió un Premio Nobel por este logro. Desde el punto de vista del cambio tecnológico y su impacto económico y social, el desarrollo del láser fue, desde luego, un gran acontecimiento.

cuantitativo de ciertas funciones fisiológicas, a diferencia de las CAT y MRI, que son valiosas para la observación anatómica. De modo que tiene un gran potencial para dar información útil acerca de la eficacia, por ejemplo, de la terapia con fármacos para el tratamiento de diversas enfermedades, como los tumores cerebrales. Pero, dejando de lado el inmenso coste de esta tecnología, su aplicación clínica en campos como la neurología, la cardiología y la oncología se ha visto limitada hasta hoy por las continuas dificultades para traducir las observaciones y las mediciones de las funciones fisiológicas en interpretaciones clínicas concretas significativas.

En el campo de la innovación médica que está naciendo en la actualidad hay un punto de conexión con lo anterior. La complejidad intrínseca del cuerpo humano y, quizá con la misma importancia, la *heterogeneidad* de los cuerpos humanos, ha vuelto extremadamente difícil establecer relaciones de causa efecto, incluso en el caso de medicaciones que se han utilizado ampliamente durante largos períodos de tiempo. La aspirina (ácido acetilsalicílico) es probablemente el fármaco más utilizado del mundo, se ha usado durante casi un siglo, pero sólo en los últimos dos años se ha probado su eficacia en la reducción de la incidencia de los ataques cardíacos, como consecuencia de sus propiedades anticoagulantes.

Aunque haya recibido mucha más atención el descubrimiento de efectos secundarios negativos; hallar nuevos e inesperados usos beneficiosos para viejos productos farmacéuticos es una experiencia común y a menudo accidental. Otro caso notable en este sentido han sido las aplicaciones de fármacos *adrenergic beta-blocking*, una de las innovaciones médicas más importantes de nuestros tiempos. Estos compuestos se introdujeron originalmente para el tratamiento de dos indicios cardiovasculares, las arritmias y la angina de pecho. Hoy se utilizan en el tratamiento de más de veinte estados diferentes, en gran medida como resultado de nuevos usos descubiertos después de que se introdujeran en cardiología. Estos usos incluyen indicaciones no cardíacas como la hemorragia gastrointestinal, la hipertensión y el alcoholismo (Gelijns, 1991, pp. 121 y 269). Se podrían contar experiencias parecidas con respecto al AZT (que actualmente se emplea en el tratamiento de los pacientes de SIDA), los contraceptivos orales, el RU-486, al *streptokynase*, el *alpha interferon* y el *prozac*. De forma más general, la extensión de los usos "fuera de programa" de muchos fármacos es un buen indicio de la omnipresencia de la incertidumbre ex ante en la innovación médica.

2. Segundo, el impacto de una innovación depende, no sólo de las mejoras de la invención, sino también de las mejoras que tienen lugar en invenciones *complementarias*. Para que los abogados de la Bell Labs hubiesen tenido algún atisbo de la importancia del láser para la comunicación telefónica, habría sido necesario algún conocimiento de la tecnología de la fibra óptica y de las formas en que ambos –láser y fibra óptica– se podían combinar. Hoy en día la transmisión telefónica se está transformado gracias al potencial *combinado* de esas dos tecnologías. De hecho, las fibras ópticas existían, en una forma bastante primitiva a principios de la década de los sesenta, cuando se desarrollaron los primeros láseres, pero no en una forma que se pudiese

adaptar a las necesidades de la transmisión telefónica. En realidad, es interesante observar que un libro excelente sobre la industria de las telecomunicaciones, publicado en fecha tan reciente como 1981, no da ningún tipo de tratamiento a esta nueva tecnología de la fibra óptica (Brock, 1982). Como ocurre a menudo, fueron necesarios varios años para que se pusieran de manifiesto algunas de las atractivas propiedades de la tecnología de la fibra óptica: la ausencia de interferencia electromagnética, la conservación del calor y la electricidad y la enorme expansión en banda ancha que proporciona la fibra óptica; siendo la última característica una consecuencia del hecho de que el espectro de la luz sea mil veces más amplio que el de la radio.

La cuestión es que el impacto del invento A dependerá a menudo de la invención B, y *la invención B puede que no exista todavía*. Pero quizá una formulación más útil consista en decir que los inventos dan lugar a menudo a la búsqueda de invenciones complementarias. Un impacto importante del invento A es *aumentar la demanda* del invento B. El precio decreciente de la electricidad, después de la introducción de la dinamo a principios de la década de 1880, estimuló la búsqueda de tecnologías que permitiesen explotar esta forma peculiar de energía. Pero el arco temporal a lo largo del cual se pudieron desarrollar estas innovaciones complementarias resultó ser muy variado. La búsqueda dio lugar de forma casi instantánea a una naciente industria electroquímica que empleaba técnicas electrolíticas (aluminio), pero se necesitó mucho más tiempo antes de que se desarrollara el motor eléctrico complementario que llegaría a ser omnipresente en el siglo XX. De forma parecida, una razón fundamental de las modestas perspectivas futuras que se preveían para el ordenador a finales de la década de los cuarenta era que los transistores no se habían incorporado todavía a los ordenadores del momento. La introducción en los ordenadores del transistor, y más tarde de los circuitos integrados, fueron desde luego acontecimientos decisivos que transformaron esta industria. Ciertamente, en uno de los logros tecnológicos más notables del siglo XX, el circuito integrado *se convirtió* finalmente en un ordenador, con el advenimiento del microprocesador en 1970. Hoy el mundo sería un lugar muy diferente si los ordenadores se hicieran todavía con válvulas de vacío.

Es posible que el fracaso aparente de la tecnología de los ordenadores en elevar durante las dos últimas décadas el nivel de crecimiento de la productividad en los Estados Unidos, por encima de sus recientes niveles casi catastróficos, tenga mucho que ver con la necesidad de desarrollar tecnologías complementarias. Robert Solow ha observado que hoy día encontramos ordenadores por todas partes excepto en las estadísticas de productividad. Pero el hecho de que las innovaciones verdaderamente importantes tarden mucho tiempo en ser absorbidas parece ser un fenómeno típico. La experiencia histórica con respecto a la introducción de la electricidad ofrece muchos paralelos en el tiempo. Si fechamos el inicio de la era eléctrica a principios de la década de 1880 (dinamos), pasaron 40 años completos —hasta la década de 1920— antes de que la electrificación de las fábricas se empezase a manifestar en términos de un sensible crecimiento de la productividad sometida a medición (Du Boff, 1987; Devine, 1983; Schurr, 1990).

Los nuevos regímenes tecnológicos fundamentales tardan muchos años antes de reemplazar la tecnología establecida. Este retraso se debe, en parte, a la necesidad de desarrollar numerosos componentes de un sistema tecnológico más amplio, tema que trataremos más adelante. La reestructuración de una fábrica en torno a una fuente de energía eléctrica, en lugar de la antigua máquina de vapor o la energía hidráulica, exigía por lo común un nuevo diseño y una reestructuración de las instalaciones de la fábrica. Representaba, entre otras cosas, una revolución de los principios de la organización fabril. En la actualidad, la disposición de la maquinaria en la fábrica es mucho más flexible que la que había con las antiguas fuentes de energía. Aprender cómo explotar de forma óptima una fuente de energía nueva y muy versátil, con métodos de transmisión de la energía completamente distintos dentro de la planta, suponía décadas de experimentación y aprendizaje. Del mismo modo, estas innovaciones tecnológicas requieren con frecuencia cambios organizativos importantes.

Además, las empresas que habían hecho enormes inversiones en plantas fabriles que tenían todavía por delante una vida productiva larga estaban, naturalmente, poco dispuestas a desechar unas instalaciones que eran aún perfectamente utilizables. Como consecuencia, si preguntamos quiénes adoptaron primero la electricidad en los primeros veinte años del siglo XX, veremos que fueron principalmente nuevas industrias que construían por primera vez sus instalaciones de producción, es decir, productores de "...tabaco, metalistería, equipamiento de transporte y maquinaria eléctrica misma." En las industrias más antiguas y consolidadas, la introducción de la energía eléctrica tuvo que esperar a la "...depreciación física de las estructuras fabriles duraderas," y la "obsolescencia de las plantas industriales más añejas situadas en el centro de las áreas urbanas." (David, 1990, p. 357).

En general se puede decir que una tecnología radicalmente nueva como la de los ordenadores debe tener necesariamente un largo período de gestación antes de que sus características y oportunidades se entiendan bien y se puedan explotar concienzudamente. En 1910, sólo un 25% de las fábricas de los Estados Unidos utilizaban energía eléctrica. Pero veinte años más tarde –en 1930– había aumentado al 75%. La historia nos indica que no deberíamos sorprendernos demasiado. Aun situando el inicio del ordenador moderno –una tecnología de un alcance global mucho más complejo que el de la electricidad– en la invención del microprocesador en 1970, todavía no hace un cuarto de siglo que estamos en la era del ordenador. Antes de que la energía eléctrica llegase a jugar un papel preponderante en la industria, pasaron unos cuarenta años. La historia nos dice con firmeza que las revoluciones tecnológicas nunca se han hecho de la noche a la mañana. (Si esto es verdad, debería ser una fuente de optimismo. ¡Quizá tengamos todavía por delante los grandes beneficios económicos del ordenador!)

3. Un tema estrechamente vinculado a éste sería que las innovaciones tecnológicas importantes constituyen a menudo *sistemas* tecnológicos completamente nuevos. Pero es extremadamente difícil conceptualizar un sistema nuevo por completo. De modo que, probablemente, el pensar en las nuevas tecnologías se puede ver muy seriamente obstaculizado por la tendencia a pensar en ellas en los términos de las viejas tec-

nologías que a la larga van a reemplazar. Una y otra vez encontramos que los contemporáneos de una nueva tecnología pensaron en ella como un mero suplemento que corregiría ciertas limitaciones intrínsecas de una tecnología existente. En las décadas de 1830 y 1840, se pensó en las líneas férreas simplemente como ramales tributarios del sistema de canales existente, que se construirían en los lugares donde el terreno había convertido los canales en algo poco práctico (Fogel, 1964). Esta es, precisamente, la misma dificultad que encontró la radio. De forma parecida, el teléfono se ideó en su origen principalmente como un instrumento de negocios, como el telégrafo, que se utilizaría para intercambiar mensajes muy específicos, como por ejemplo los términos de un futuro acuerdo contractual. Esto puede explicar, desde luego, por qué la patente del teléfono de Bell llevaba, como antes se ha dicho, el título ‘Mejoras en la Telegrafía’.

Es característico de un sistema que las mejoras de las prestaciones en una parte de él tengan una importancia limitada, sin mejoras simultáneas en otras partes. En este sentido, se pueden pensar los sistemas tecnológicos como racimos compuestos de invenciones complementarias. Las mejoras en la generación de energía sólo pueden tener un impacto limitado en el coste del suministro de electricidad, hasta que se hagan mejoras en la red de transmisión y en el coste de transporte de la electricidad a largas distancias. Esta necesidad de innovaciones adicionales en las actividades complementarias es una razón importante de que incluso de los avances decisivos se derive sólo una curva de productividad que aumenta con lentitud. Por lo tanto, dentro de los sistemas tecnológicos los grandes aumentos de la productividad pocas veces provienen de una sola innovación tecnológica, por muy importante que ésta sea en apariencia. A la vez que los efectos *acumulativos* de un gran número de mejoras dentro de un sistema tecnológico pueden ser inmensos con el tiempo.

4. Una razón adicional, muy importante desde el punto de vista histórico, por la cual ha sido tan difícil prever los usos de una nueva tecnología es que muchos inventos importantes tuvieron sus orígenes en el intento de resolver problemas muy específicos y a menudo definidos en términos muy estrechos. No obstante, ocurre a menudo que una vez se ha encontrado una solución, ésta resulta tener aplicaciones importantes en contextos totalmente inesperados. Es decir, gran parte del impacto de las nuevas tecnologías tiene lugar a través de flujos intersectoriales. Las invenciones tienen historias de vida muy inesperadas (Rosenberg, 1976, cap. 1).

La máquina de vapor, por ejemplo, se inventó expresamente en el siglo XVIII como un aparato para bombear el agua de las minas inundadas. En realidad, durante largo tiempo se consideró que era exclusivamente una bomba. Una serie de mejoras sucesivas la convirtieron más tarde en una fuente de energía posible para las fábricas textiles, las herrerías y un abanico creciente de establecimientos industriales. A lo largo de los primeros años del siglo XIX la máquina de vapor llegó a ser una fuente de energía generalizable y tuvo importantes aplicaciones en el transporte: ferrocarril, buques y navíos a vapor. De hecho, antes de la Guerra Civil, en los Estados Unidos el uso principal de la máquina de vapor no se daba en la industria, sino en el transporte. Más avanzado el siglo XIX, la máquina de vapor se utilizó durante un tiempo para producir

una nueva fuente de energía incluso más generalizable –la electricidad– que, a su vez, satisfacía innumerables usos finales a los que no se podía aplicar directamente la máquina de vapor. Finalmente, la turbina de vapor desplazó a la máquina de vapor en la generación de energía eléctrica, y las características específicas de la electricidad –la facilidad de transmisión a distancias largas, la capacidad de proporcionar energía en unidades “fraccionadas”, y la flexibilidad mucho mayor del equipamiento movido por energía eléctrica– anunciaron el fin de la misma máquina de vapor.

Las innovaciones importantes, como la máquina de vapor, una vez consolidadas tienen el efecto de inducir otras innovaciones e inversiones más allá de una amplia frontera. Ciertamente, la capacidad de inducir tales innovaciones e inversiones adicionales es una definición razonablemente buena de lo que constituye una innovación importante. Es una forma útil de distinguir entre los avances tecnológicos que son simplemente investidos de gran notoriedad, y los avances que tienen potencial para un impacto económico importante. Pero esto pone también de manifiesto las dificultades de *previsión* del impacto final, puesto que va a depender de las dimensiones y la dirección de esas innovaciones complementarias futuras y las inversiones asociadas a ellas.

La historia de la máquina de vapor la conformaron fuerzas que difícilmente podían prever los inventores británicos que trabajaban para sacar el agua de unas minas de carbón, cada vez más inundadas, en el siglo XVIII. Sin embargo, la misma existencia de la máquina de vapor sirvió como estímulo poderoso para otras invenciones, cuando se comprendieron por completo sus principios de funcionamiento.

He insistido en observar que las innovaciones surgen a menudo como soluciones a problemas muy específicos de una industria concreta, y que el flujo interindustrial posterior es forzosamente muy incierto. Esto se debe a que es particularmente difícil anticipar los usos de una nueva tecnología en un contexto industrial completamente diferente. No obstante, en algunos casos una nueva capacidad tecnológica puede tener múltiples puntos de impacto en otra industria.

Tomemos por ejemplo el impacto del ordenador en la industria del transporte aéreo. Me atrevería a decir que las mudables prestaciones del transporte aéreo comercial se han visto por lo menos tan afectadas por la aplicación del ordenador a nuevos usos en esta industria, como por el gasto en I + D que ha tenido lugar dentro de la misma industria.

a. Hoy día los superordenadores realizan buena parte de la investigación aerodinámica fundamental, incluyendo buena parte –aunque no toda– de la investigación que con anterioridad tenía lugar en los túncles de viento.

b. Los ordenadores han sido una fuente principal de reducción de costes en el diseño de componentes específicos de los aviones, como las alas. Jugaron un papel importante en el diseño de las alas de los Boeings 747, 757, 767, y también del Airbus 310.

c. Los ordenadores son hoy responsables de la mayor parte de la actividad que tiene lugar en la carlinga, que incluye por supuesto el piloto automático.

d. Los ordenadores, junto con los satélites meteorológicos, que determinan de forma rutinaria la localización móvil de la altitud de las corrientes a chorro de altura, se utilizan hoy ampliamente para determinar las rutas óptimas de vuelo. El ahorro de combustible de la industria mundial de aerolíneas comerciales probablemente supere con mucho el billón de dólares al año. (Adviértase que éste es todavía otro ejemplo importante del impacto económico de una tecnología, el ordenador, que depende de otra tecnología complementaria que se desarrolló muchos años más tarde, los satélites meteorológicos).

e. Los ordenadores y las redes de ordenadores se hallan en el centro del actual sistema mundial de billetes y reservas.

f. La simulación en ordenador es hoy el método de instrucción preferido para enseñar a volar a los neófitos.

g. El ordenador, junto con el radar, se ha convertido en un elemento absolutamente central para el funcionamiento del sistema de control del tráfico aéreo, que sería difícil de concebir sin él.

Una consecuencia importante de esta discusión es que el gasto en I + D tiende a concentrarse mucho en un pequeño número de industrias. No obstante, cada una de esas pocas industrias se deben ver como el lugar de actividad investigadora que genera nuevas tecnologías que se pueden difundir ampliamente por toda la economía. Históricamente, un pequeño número de industrias han jugado este papel de formas particularmente cruciales: la máquina de vapor, la electricidad, las máquinas herramientas, los ordenadores, los transistores, etc. Esto refuerza la anterior sugerencia de que incluso podemos *definir* una innovación fundamental –o decisiva– como la que establece un nuevo marco para el diseño de innovaciones adicionales. En este sentido, las innovaciones adicionales son los complementos naturales de las innovaciones decisivas. Las innovaciones decisivas, a su vez, han puesto a menudo las bases para la emergencia de industrias completamente nuevas.

5. La última condición es bastante menos precisa que las demás, pero creo que no es menos importante. A saber, el impacto final de alguna capacidad tecnológica nueva no es sólo una cuestión de viabilidad técnica o de prestación técnica mejorada; más bien es una cuestión de identificar ciertas categorías específicas de necesidades humanas, y de satisfacerlas de formas nuevas o con costes asequibles. Las nuevas tecnologías tienen que superar una prueba económica, no sólo una tecnológica. Así, el Concorde es un éxito espectacular en términos de prestaciones de vuelo, pero ha demostrado ser un desastre financiero que ha costado varios billones de dólares a los contribuyentes británicos y franceses.

Por último, lo que se pide a menudo no es sólo pericia técnica, sino un ejercicio de la imaginación. Comprender las bases técnicas de la comunicación sin cable, como hizo Marconi, era una cuestión muy diferente de anticipar cómo se podía utilizar el aparato para ampliar la experiencia humana. A Marconi no se le ocurrió nada de eso. En cambio, David Sarnoff, un inmigrante ruso sin educación, tuvo una vívida visión de cómo se podía usar la nueva tecnología para transmitir noticias, música y otras formas de distracción e información a cada hogar (y con el tiempo automóvil) del país. Sar-

noff, en resumen, captó las posibilidades comerciales de la nueva tecnología. Desde luego, la visión de Sarnoff fue la que finalmente prevaleció durante su dirección de la RCA después de la Primera Guerra Mundial (Bilby, 1985).

De forma parecida, Howard Aiken, un profesor de Física de Harvard que fue un gran pionero en el primer desarrollo del ordenador, continuó pensando en él en el estrecho contexto donde había tenido lugar su primer desarrollo; es decir, puramente como un aparato para resolver problemas científicos esotéricos. En fecha tan tardía como 1956 afirmaba: "...si alguna vez resultase que la lógica básica de una máquina diseñada para la solución numérica de ecuaciones diferenciales coincidiese con la lógica de una máquina pensada para hacer las facturas de unos grandes almacenes, lo consideraría la más pasmosa coincidencia que jamás haya encontrado" (Ceruzzi, 1987, p. 197). Esto es precisamente lo que ocurrió, pero difícilmente fue una coincidencia. Una tecnología que en su origen se había pensado con un objetivo específico —la solución numérica de grandes series de ecuaciones diferenciales— se pudo rediseñar con facilidad para resolver problemas en contextos por completo diferentes, como el de hacer facturas para grandes almacenes. Pero esto, evidentemente, no era evidente!

Lo esencial, por supuesto, es que el cambio social o el impacto económico no es algo que se pueda extrapolar a partir de un fragmento de *hardware*. Hay que pensar las nuevas tecnologías más bien como bloques de construcción. Su impacto final dependerá de lo que se diseñe y se construya posteriormente con ellas. Las nuevas tecnologías son potenciales no realizados que pueden adoptar un gran número de formas definitivas. Las formas que tomen realmente dependerá de la capacidad de visualizar cómo se podrían emplear *en contextos nuevos*. El desarrollo que hizo Sony de los *walkman* es un ejemplo brillante de cómo una capacidad tecnológica que ya existía, y que incluía baterías, cintas magnéticas y auriculares, se podía recombinar para crear un producto completamente nuevo que podía proporcionar distracción en contextos en los que antes no se podía dar —en los que, desde luego, nadie había antes ni siquiera *pensado* en proporcionarla; por ejemplo, a los corredores o a los paseantes. Con seguridad el producto exigió una buena dosis de ingeniería para diseñar de nuevo los componentes que ya existían, pero el avance realmente decisivo lo hizo Akio Morita al identificar una oportunidad en el mercado que no había sido previamente percibida.

Aunque muchos americanos siguen creyendo que el vídeo (VCR) fue una invención americana, ésta es una opinión simplemente insostenible. Los pioneros americanos en este terreno, RCA y Ampex, lo abandonaron mucho antes de que se desarrollara un producto utilizable. Matsushita y Sony, por otra parte, hicieron miles de pequeñas mejoras en el diseño y la fabricación después de que los americanos hubiesen dejado el campo. Estos progresos estuvieron estrechamente conectados con otro aspecto. Un paso adelante decisivo hacia el desarrollo del VCR fue el darse cuenta de que existía un mercado de masas potencial en los hogares, si se podían aumentar ciertas prestaciones características del producto, en especial su capacidad de almacenaje. Aunque la idea americana inicial del VCR había sido la de un bien primordial para ser utilizado en las

estaciones de televisión, algunos de los partícipes, tanto americanos como japoneses, advirtieron las posibilidades de un mercado doméstico mucho mayor. La diferencia fundamental parece haber sido la confianza japonesa, que se basaba en su experiencia de fabricación, de que se podían alcanzar las reducciones de costes necesarias y las mejoras en las prestaciones. La rápida transformación del VCR en uno de los mayores productos de exportación japoneses fue, por lo tanto, un logro tanto de la imaginación como de la justificada confianza en las capacidades de su ingeniería (Rosenbloom y Cusumano, 1987).

La limitada visión que en un momento tuvieron los americanos con respecto al potencial del VCR tiene algunos paralelismos con el desdén de los fabricantes de ordenadores de estructura voluminosa hacia los ordenadores personales, cuando éstos empezaron a aparecer hace unos quince años. En aquel momento estaba de moda despreciar el PC como un simple “juguete para chapuceros”, sin porvenir real en el mundo de los negocios, y por consiguiente sin constituir una amenaza real al futuro económico de los ordenadores de gran tamaño (New York Times, 1994).

### **Resucitar las Viejas Tecnologías o Matarlas**

Mi análisis se ha centrado en las dificultades para la explotación de nuevas tecnologías. Pero es evidente que en las sociedades altamente competitivas en las que se dan fuertes incentivos a la innovación, éstas son aplicables tanto a mejorar las *viejas* tecnologías como a inventar nuevas. En realidad, las innovaciones a menudo parecen inducir respuestas enérgicas e imaginativas por parte de las empresas que se encuentran confrontadas con sustitutos cercanos a sus productos tradicionales. Es bastante frecuente encontrar que la presión competitiva que resulta de una nueva tecnología conduce a una mejora acelerada de la tecnología vieja. Algunas de las mejoras más importantes de los veleros de madera tuvieron lugar entre 1850 y 1880, es decir, inmediatamente *después* de la introducción del barco de vapor con casco de hierro y las máquinas de vapor complejas que desplazarían a los veleros a principios del siglo XX. Entre estas mejoras encontramos un nuevo diseño del casco que permitía alcanzar mayor velocidad, más capacidad de carga en relación al tonelaje del barco y, por encima de todo, la introducción de maquinaria que ahorra trabajo de modo que las necesidades de tripulación quedaban reducidas por lo menos a las dos terceras partes. De forma parecida, las mayores mejoras introducidas en la lámpara de gas, que se utilizaba para la iluminación de interiores, tuvieron lugar un poco *después* de la introducción de la bombilla eléctrica de luz incandescente (Rosenberg, 1976, cap. 11).

Una de las características fundamentales de la industria de las telecomunicaciones en la posguerra es que la investigación ha aumentado las capacidades del sistema de transmisión *ya instalado*, además de conducir hacia el desarrollo de tecnologías nuevas y más productivas. Cada sistema de transmisión importante –un par de alambres, los cables coaxiales, las microondas, los satélites, la fibra óptica– ha sido sometido a

grandes mejoras posteriores relativas a la capacidad de transmisión de mensajes, a menudo sólo con modificaciones relativamente menores de la tecnología de transmisión existente. En algunos casos, se han dado aumentos de un cierto orden de magnitud de la capacidad de transmisión de mensajes de un canal ya existente, como un cable coaxial de 3/8 de pulgada, y tal aumento de productividad ha llevado a posponer la introducción de nuevas generaciones de tecnologías de transmisión. Por ejemplo, el *time-division multiplexing* permitió que un par de cables transportaran 24 o más canales de voz, en lugar del único canal que originalmente transportaban. En la tecnología de la fibra óptica se observa el mismo modelo. Cuando la AT&T inició las pruebas en el campo de la fibra óptica a mediados de la década de los setenta, la información se transmitía a 45 megabytes por segundo. A principios de la década de 1990, la media para los nuevos cables de fibra había alcanzado los 565 megabytes por segundo, con una predicción de capacidad fiable de 1000 megabytes por segundo en un futuro próximo.

Pero no sólo ocurre que la introducción de nuevas tecnologías tenga que aguardar con frecuencia a que estén disponibles tecnologías complementarias, y que entretanto las tecnologías existentes puedan alcanzar un vigor competitivo renovado por medio de mejoras continuadas. Las nuevas tecnologías también pueden resultar ser sustitutos más que complementos de las que ya existen, recortando de este modo drásticamente la expectativa de vida de tecnologías que en un momento parecían garantizar expectativas claras de alza. Las perspectivas futuras de los satélites de comunicación decayeron de forma completamente inesperada durante la década de 1980 con la introducción de la fibra óptica y la expansión inmensa y fiable de la capacidad de transporte de canales que aportaba. Por el contrario, la fibra óptica, cuya primera aplicación importante se dio en los diagnósticos médicos a principios de la década de 1960, puede estar hoy aproximándose al principio del fin de su vida útil. Los endoscopios de fibra óptica han hecho posible una mejora inmensa en las técnicas de intervención mínima para visualizar el tránsito gastrointestinal. Recientemente, nuevos sensores del reino de la electrónica, *charged couple devices* (CCDs), han empezado a proporcionar imágenes de una calidad de resolución y un grado de detalle que posiblemente los aparatos de fibra óptica no podrían dar. El *scanner* CT, con seguridad uno de los grandes avances del siglo XX para el diagnóstico, está dejando paso al MRI que tiene una capacidad de diagnóstico todavía mayor. Las incertidumbres de este tipo transmiten un gran elemento de riesgo a las inversiones a largo plazo en nuevas tecnologías caras. El proceso de competencia que finalmente resuelve estas incertidumbres no es la competencia de manual tradicional entre productores de un producto homogéneo que buscan ofrecer el mismo producto al mercado a un coste menor. Es, más bien, una competencia entre diferentes tecnologías, un proceso que Schumpeter describía de manera apropiada como "destrucción creativa". Así, no es una paradoja decir que una de las grandes incertidumbres a la que se deben enfrentar las nuevas tecnologías es la invención de otras todavía más nuevas.

El avance simultáneo de la nueva tecnología, junto con la sustancial mejora de la vieja tecnología, subraya la omnipresente incertidumbre con la que se encuentran los

que toman decisiones en la industria, en un mundo de cambio tecnológico rápido. Se debería ser muy optimista, y también ingenuo, para pensar que se puede desarrollar algún paradigma intelectual que maneje todas las variables relevantes con esmero y sistematicidad. Pero quizá sea verosímil creer que un análisis más riguroso de los temas que aquí se han planteado pueda conducir a una mejora considerable en nuestra forma de pensar el proceso de innovación.

Podemos volver ahora a la observación anterior: la falta de conocimiento acerca de la relación entre esas distintas dimensiones de la incertidumbre, nos impide entender el efecto total de la misma sobre el cambio tecnológico. Por ejemplo, dos dimensiones de la incertidumbre tratadas con anterioridad tienen que ver con el refinamiento de tecnologías complementarias, y con el potencial de cualquier tecnología de constituir el núcleo de un nuevo sistema tecnológico. Incluso en el nivel más simple es difícil precisar sobre la interacción entre esos efectos diferentes. La existencia y el perfeccionamiento de tecnologías complementarias puede ejercer un efecto coactivo y conservador, obligando a la tecnología nueva a situarse dentro del "sistema" actual. Por otra parte, no obstante, las tecnologías complementarias pueden ser exactamente lo que se necesita para la realización práctica de un *sistema completamente nuevo*. Mi posición es no decantarse por una u otra resolución de esa alternativa; por el contrario, es argumentar que un programa de investigación que descuide estas interacciones puede olvidar una parte muy importante de cómo la incertidumbre ha conformado el incremento y la dirección del cambio tecnológico y, por extensión, la experiencia histórica del crecimiento.

### Observaciones finales

No tengo intención de ofrecer recomendaciones políticas. Sin embargo, quisiera permitirme algunas observaciones finales.

En la actualidad se exhorta a la comunidad investigadora a que despliegue la bandera de la "relevancia" para las necesidades sociales y económicas. El lastre de mucho de lo que aquí se ha dicho es que, con frecuencia, simplemente no *sabemos* qué nuevos hallazgos pueden llegar a ser relevantes, o a qué *campo* de la actividad humana se puede finalmente aplicar esa relevancia. Ciertamente, he estado aventurando la afirmación general de que la incertidumbre omnipresente no sólo caracteriza la investigación básica, donde ésto en general se reconoce, sino que ocurre lo mismo en la esfera del diseño del producto y del progreso del mismo; es decir, la D de I + D. En consecuencia, cualquier compromiso previo con cualquier proyecto tecnológico específico a gran escala, opuesto a una aproximación secuencial de la toma de decisiones más limitada, es probablemente arriesgado; es decir, antieconómico. Las pruebas para esta afirmación son abundantes en los proyectos patrocinados por los gobiernos, como la obtención de armas, el programa espacial, la investigación para el desarrollo de un corazón artificial y los combustibles sintéticos.

La omnipresencia de la incertidumbre indica que el gobierno debería resistir por lo común la tentación de jugar el papel de paladín de cualquier alternativa tecnológica, sea la energía nuclear, o cualquier foco muy concentrado de apoyo a la investigación, como la Guerra al Cáncer. Más bien estaría lleno de sentido gestionar una cartera de investigación deliberadamente diversificada, una cartera que pueda iluminar un abanico de alternativas en el caso de que se produjera una reordenación de las prioridades sociales y económicas, o el fracaso inesperado de cualquier línea individual de investigación importante. La política gubernamental debería abrir muchas ventanas y dar incentivos financieros al sector privado para la exploración del paisaje tecnológico que sólo se puede distinguir vagamente desde aquellas ventanas. Por tanto, mi crítica a la política energética del gobierno federal posterior a la guerra no es que se comprometiera de forma principal con la energía nuclear, que posteriormente resultó ser un problema galopante. Una crítica más apropiada se dirige a que la testarudez de centrarse en la energía nuclear condujo al descuido comparativo de otras muchas alternativas, que no sólo incluyen las fuentes de energía alternativas, sino las mejoras en la eficiencia de utilización de la energía.

La situación con respecto al sector privado es obviamente diferente. De las empresas privadas se espera normalmente que distribuyan sus fondos I + D de formas que resulten relevantes. Las empresas privadas son muy conscientes de que se enfrentan a enormes incertidumbres en el mercado, y son capaces de hacer sus propias valoraciones colocando sus "apuestas" de acuerdo con ellas. Las malas apuestas son, por supuesto, comunes; tan comunes que podemos tener la tentación de concluir que la forma en que las empresas que compiten persiguen las innovaciones es un proceso muy antieconómico. Esta caracterización sería adecuada si no fuera por un único aspecto: la incertidumbre. En realidad, una virtud considerable del mercado es que, frente a una enorme incertidumbre *ex ante* que tiene que ver con los usos de nuevas capacidades tecnológicas, motiva la exploración de una amplia variedad de caminos alternativos. Esto es particularmente deseable en las primeras etapas, en las que las incertidumbres son especialmente elevadas y en las que los individuos con opiniones diferentes (basadas a menudo en su distinto acceso a la información) necesitan animarse a seguir sus propios presentimientos o intuiciones. Y es importante que este aspecto se subraye de manera más taxativa: el logro del progreso tecnológico, frente a las numerosas incertidumbres, *exige* esas diferencias de opinión *ex ante*.

Para acabar, otra virtud considerable del mercado es que también da incentivos fuertes para cerrar, de forma rápida y no sentimental, las direcciones de investigación cuyas perspectivas, que en un momento fueron halagüeñas, se han debilitado de manera inesperada porque se dispone de nuevos datos, por algún cambio en el entorno económico o por una reestructuración de las prioridades sociales o políticas. Para un país que mantiene en la actualidad más de 700 laboratorios federales con un presupuesto total anual de más de 23 billones de dólares, más de la mitad de los cuales se destinan al desarrollo de armas u otros fines relacionados con la defensa, ésta no es una virtud pequeña.

*Traducción al castellano de ELENA GRAU*

## BIBLIOGRAFÍA

- BILBY, Kenneth (1985), *The General: David Sarnoff and the Rise of the Communications Industry*, Nueva York, Harper and Row.
- BROCK, Gerald W. (1982), *The Telecommunications Industry*, Cambridge, Harvard University Press.
- CERUZZI, Paul (1987), "An Unforeseen Revolution: Computers and Expectations, 1935-1985," pp. 188-193, in Joseph J. Corn (comp.), *Imagining Tomorrow*, Boston, MIT Press.
- DAVID, Paul (1990), "The Dynamo and the Computer: An Historical Perspective on the Modern Productivity Paradox," *American Economic Review Papers and Proceedings*.
- DEVINE, Warren, Jr. (1983), "From Shafts to Wires: Historical Perspectives on Electrification," *Journal of Economic History*.
- DOUGLAS, Susan (1987), *Inventing American Broadcasting, 1899-1922*, Baltimore, The Johns Hopkins University Press.
- DU BOFF, Richard (1967), "The Introduction of Electric Power in American Manufacturing," *Economic History Review*.
- FOGEL, Robert (1964), *Railroads and American Economic Growth*, Baltimore, The Johns Hopkins University Press.
- GELIJNS, Annetine (1991), *Innovation in Clinical Practice*, Washington, D.C., National Academy Press.
- MACLAURIN, W. Rupert (1949), *Invention and Innovation in the Radio Industry*, Nueva York, The Macmillan Company.
- MARTIN, James (1977), *Future Developments in Telecommunications*, Englewood-Cliffs, N.J., Prentice Hall.
- New York Times*, 20 de abril de 1994, p. C1.
- ROSENBERG, Nathan (1976), "Technological Change in the Machina Tool Industry", capítulo 1 en Nathan Rosenberg, *Perspectives on Technology*, Nueva York, Cambridge University Press.
- (1976), "Factors Affecting the Diffusion of Technology," capítulo 7 en Nathan Rosenberg, *Perspectives on Technology*, Nueva York, Cambridge University Press.
- ROSENBLOOM, Richard y Michael CUSUMANO (1987), "Technological Pioneering and Competitive Advantage: The Birth of the VCR Industry", *California Management Review*.
- SCHURR, Sam, et al. (1990), *Electricity in the American Economy*, Nueva York, Greenwood Press.
- TECHNICAL BULLETIN N° 2, U.S. Navy, Bureau of Ships, January 1941. Citado en James MARTIN (1977), *Future Developments in Telecommunications*, Englewood-Cliffs, N.J., Prentice-Hall, p. 11.
- TOWNES, Charles (1968), "Quantum Mechanics and Surprise in the Development of Technology," *Science*, February 16.
- WRISTON, Walter B. (1992), *The Twilight of Sovereignty*, Nueva York, Charles Scribner's Sons.



## *Uncertainty and Technological Change*

### ABSTRACT

*There is now widespread agreement that technological change is a main determinant—perhaps the main determinant—of long-term economic growth. In spite of this fact, the process that generates new technologies, and the uses to which they are eventually put, are poorly understood. Economic theorists typically build models involving “rational” decisionmaking in which no uncertainties exist. These models are not very useful because uncertainty is the central aspect of technological change. This paper adopts an historical approach and argues that history can provide important insights into the causes and consequences of technological change, of a kind that are unlikely to be realized by model-building exercises alone.*

