

DESCUBRIR, INVENTAR Y VENDER. SISTEMAS Y POLÍTICAS DE I+D+I

GREGORIO MILLÁN BARBANY
Real Academia de Ciencias

INTRODUCCIÓN

El progreso del conocimiento científico, y de sus aplicaciones para dar satisfacción a las necesidades y aspiraciones de las gentes, se produce en el seno de un mundo complejo en el que interaccionan distintas clases de agentes, desarrollando tareas de muy diversa naturaleza, e impulsados por muy variadas motivaciones. Es lo que se llama Sistema para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, constituido en los países desarrollados por un importante conjunto de personas, instituciones, medios, organizaciones y programas, cuyo impacto potencial en el avance cultural, económico y social es hoy un factor determinante del progreso. Esto es lo que justifica sobradamente el interés que la sociedad en general debiera sentir por conocer las características, el funcionamiento, las materias y los resultados de tan relevante sistema, como una base necesaria para prestarle toda la consideración y el apoyo que su eficaz funcionamiento demanda.

Contribuir a este propósito es precisamente el objeto de los ciclos de conferencias sobre la Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica que, desde hace varios años, viene desarrollando en diversas instituciones del país la Real Academia de Ciencias. Y el tema que me propongo exponer aquí, en el marco de ese propósito general, es justamente el del propio Sistema para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, en sí mismo considerado. Para ello voy a comenzar por enunciar las funciones que desarrolla, en el seno de los diversos sectores que lo componen; las cuales responden básicamente a los tres dominios de la ciencia, la tecnología y la innovación que definen su específica naturaleza.

Muy esquemáticamente y sin dejar de reconocer la complejidad del tema, puede decirse que el objeto de la *ciencia* es el *saber*; el de la *tecnología*, el *saber hacer*, y el de la *innovación*, traducir los resultados de ambas en *productos* y *servicios* útiles a la sociedad. Mientras que las *políticas* de investigación, desarrollo e innovación tienen por misión fijar los objetivos adecuados en los tres campos, crear las condiciones apropiadas para alcanzarlos y dotarse del sistema necesario para hacerlo.

Para dar perspectiva al proceso de desarrollo de la ciencia, la tecnología y la innovación, me gustaría empezar recordando que durante el siglo que acaba de terminar han tenido lugar descubrimientos científicos y desarrollos tecnológicos asombrosos, cuyas aplicaciones han transformado de raíz las condiciones de la vida del hombre sobre la Tierra, abriendo, además, expectativas de nuevos logros que no hace mucho parecían inasequibles.

Pienso concretamente en la revolución científica provocada por la *teoría de la relatividad*, la *física cuántica*, la *teoría atómica*, los descubrimientos sobre la composición y evolución del Universo, y los hallazgos de la biología, especialmente en el ámbito de la genética; así como en los grandes desarrollos tecnológicos que han permitido incorporar innovaciones verdaderamente sensacionales en los más diversos campos de actividad.

Así ocurrió, por ejemplo, con la aviación, que nació en diciembre de 1903, dando origen a un medio de transporte enteramente nuevo. A lo largo del siglo XX hemos tenido ocasión de comprobar reiteradamente los efectos civiles y militares de este desarrollo tecnológico; basta señalar que el volumen de transporte comercial aéreo se cifra en la actualidad en 1 600 millones de pasajeros al año, sobre un total de 6 000 millones de personas que pueblan la Tierra.

En los mismos términos cabe hablar del empleo de astronaves como instrumento para la exploración y observación del espacio exterior a la Tierra, bien sean satélites artificiales, bien sondas o estaciones espaciales, que se viene produciendo desde 1957 y constituye el más importante avance tecnológico en el ámbito de la investigación astronómica desde la invención del telescopio a comienzos del siglo XVII.

Del mismo modo, la formidable explosión de las telecomunicaciones, tan características de la sociedad de la información en que vivimos, nos sorprende cada día con nuevas realizaciones, de las que Internet es un ejemplo de la máxima actualidad y aceptación. Su remoto y transitorio antecedente fue el telégrafo óptico, de 1800, que fue sustituido medio siglo más tarde por el de Morse, y cuya implantación en España desarrolló el fundador de la Escuela de Caminos y Puentes, don Agustín de Betancourt.

Asimismo, cabe citar, entre otros ejemplos, el desarrollo de la energía nuclear, de las computadoras electrónicas y de la ingeniería genética.

Por otra parte, al considerar desde más cerca la situación actual, comprobamos que los dos grandes factores que están contribuyendo decisivamente a transformar las condiciones políticas, económicas y sociales dominantes son, de un lado, el final de la guerra fría, simbolizado en la caída del muro de Berlín, cuyo primer decenio celebramos en 1999; de otro, la llamada «globalización» de las transacciones internacionales, que progresa imparablemente y con una pujanza irresistible, no exenta de dificultades y tropiezos, como el que acaba de sufrir en Seattle la Organización Mundial del Comercio.

El llamado «dividendo de la paz» ha sido el fruto esperado del primer factor, al trasladarse desde el campo militar hacia el civil las prioridades políticas de la inversión, mientras que la competitividad empresarial internacional, en gran medida por la vía de la innovación, aparece como el gran recurso para la supervivencia.

Y ocurre, por la propia naturaleza de las cosas, que la ciencia, la tecnología y la innovación avanzan al primer plano, recabando la atención y el protagonismo que les corresponde en la configuración de la nueva realidad.

Pero antes de entrar concretamente en la cuestión de los sistemas y las políticas de I+D, objeto de esta conferencia, me gustaría ilustrar el proceso del descubrimiento científico, el desarrollo tecnológico y la innovación de procesos, productos o servicios, mediante la exposición de un caso concreto que ponga de manifiesto la situación de partida, la motivación del esfuerzo, los resultados conseguidos y las derivaciones de ellos hacia otros desarrollos y aplicaciones; es decir, desde la identificación del propósito original hasta el impacto final de su completo desarrollo y explotación.

DESARROLLO DEL RADAR

El tema que me propongo exponer brevemente para esta ilustración es el del desarrollo del radar, llevado a cabo durante la Segunda Guerra Mundial para hacer frente a la terrible amenaza de los bombardeos aéreos, que ya había anticipado la guerra europea de 1914 y que la mundial de 1939 convirtió en un factor crítico de supervivencia.

Sus orígenes se sitúan a comienzos de los años treinta del siglo XX, cuando la amenaza del rearme y de otros movimientos políticos ensombrecía siniestramente el horizonte europeo y las tecnologías disponibles para la defensa antiaérea (artillería, reflectores, barreras de globos, detección acústica, patrullas permanentes de aviones de caza) no permitían establecer un sistema de defensa mínimamente eficaz.

Esta situación fue expuesta dramáticamente al país por el primer ministro británico Samuel Baldwin en noviembre de 1932, en los términos siguientes: «Creo bueno para

el hombre de la calle saber que no hay poder en la Tierra que pueda protegerle de ser bombardeado, (...) la única defensa reside en la ofensa; lo que significa que habremos de matar más mujeres y niños y hacerlo más rápidamente que el enemigo, si queremos salvarnos». Es ésta una actitud trágicamente fatalista que anticipaba, a menor escala, naturalmente, la amenaza nuclear de la doble destrucción, mutuamente asegurada, entre los bloques occidental y soviético durante los largos años de la guerra fría, que se inició en 1947, prolongándose hasta la caída del muro de Berlín, en 1989.

Contra esto, dos años más tarde, se rebelaba Winston Churchill, abogando por el rearme que, en relación con la defensa aérea, defendía su amigo el profesor de la Universidad de Oxford Frederick Lindemann, alegando que «adoptar una actitud derrotista frente a la amenaza del ataque aéreo es inexcusable, en tanto no se haya mostrado definitivamente que todos los recursos de la ciencia y la innovación han sido agotados».

Una reacción análoga, aunque a escala diferente, tuvo el presidente estadounidense Ronald Reagan al proponer en 1983, cuando ya se aproximaba el fin de la guerra fría, el desarrollo de la llamada Iniciativa de Defensa Estratégica, vulgarmente conocida como «guerra de las galaxias», para la defensa contra los posibles ataques soviéticos con misiles nucleares intercontinentales: la nueva arma que entonces había sustituido con ventaja a la amenaza de los bombarderos estratégicos.

Durante aquellos años dramáticos que precedieron a la Segunda Guerra Mundial, Gran Bretaña era el país más vulnerable a la amenaza aérea, y Londres la ciudad que más duramente había sufrido ya sus efectos durante la contienda europea. Por esta razón se afanaba, con escasa fortuna, en la búsqueda de tecnologías de neutralización, entre las que ensayó la de la detección acústica mediante el empleo de grandes espejos cóncavos de 400 m² capaces de captar el ruido y la orientación de aproximación de los bombarderos a suficiente distancia para oponerles la reacción de los cazas británicos. Este proyecto fue abandonado ante el resultado negativo de los ensayos del prototipo.

Una idea más peregrina fue la de desarrollar una especie de «rayo de la muerte»; es decir, una radiación electromagnética lo suficientemente intensa y concentrada para producir efectos letales en el agresor. En 1935, el somero análisis de esta iniciativa demostró su inviabilidad con el nivel tecnológico del momento. Sin embargo, veinticinco años más tarde se haría posible merced a la invención del láser, un dispositivo de «amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación», cuya fundamentación científica, con base en la nueva física del siglo XX a la que nos hemos referido al comienzo, es imposible desarrollar aquí, y cuya viabilidad científica había sido reconocida por Einstein en 1917. Su primera realización material fue llevada a cabo en 1960 por el científico estadounidense Teodoro H. Maiman, de los laboratorios de investigación de la Hughes Aircraft Company de California.

Maiman había llegado al láser a través de su interés por el máser, un dispositivo que opera con el mismo principio básico que aquél, pero con radiación de microondas en lugar de luz, y cuya viabilidad material había sido demostrada pocos años antes por el científico estadounidense Charles H. Townes, que recibió por ello el premio Nobel de Física en 1964, compartido con dos investigadores soviéticos.

Mientras que las aplicaciones del máser son limitadas y de carácter básicamente científico, las del láser se han diversificado extraordinariamente, así como los equipos que las producen: desde los láseres para usos militares, industriales o científicos, hasta los que se utilizan en operaciones médicas de gran precisión, en la reproducción del sonido y la imagen o, incluso, en las cajas registradoras de los supermercados, haciendo de esta tecnología un elemento cotidiano y familiar que forma parte de nuestra vida diaria.

En particular, a los dos años de la invención del láser, Maiman creó su propia compañía, la Korad Corporation, dedicada a la investigación, el desarrollo y la fabricación de láseres. Es éste un ejemplo típico norteamericano del proceso natural de transformación de los conocimientos científicos y tecnológicos en innovaciones utilizables, al servicio de las necesidades de la sociedad, mediante la reconversión del científico en empresario: una de las fórmulas que hoy se predicen en la política de la innovación.

Pero volvamos al tema que nos ocupa, el desarrollo del radar. Ante el fracaso de las tentativas propuestas y vista la apremiante necesidad de encontrar alguna solución a la más grave amenaza del bombardeo aéreo, el Ministerio del Aire británico decidió crear un comité de sabios para la «exploración científica de la defensa aérea», que se constituyó a comienzos de 1935.

Y en las primeras reuniones del comité, el físico escocés Robert Watson Watt, director del departamento de radio del Laboratorio Nacional de Física, que llevaba años trabajando con éxito en la propagación de las ondas de radio y sus interferencias con la ionosfera, presentó dos famosos informes sobre la detección de aviones por métodos de radio, en los que, al descartar por inviable la idea del «rayo de la muerte», afirmaba que la investigación debía enfocarse hacia el problema, todavía difícil pero menos inseguro, de la *radio-detección*, en oposición a la *radio-destrucción*, mostrándose dispuesto a aportar cálculos numéricos y anticipando que sus resultados eran francamente favorables.

La propuesta de Watson Watt fue acogida con entusiasmo por el Comité de Defensa Aérea, organizándose a marchas forzadas un ensayo de demostración que se llevó a cabo pocas semanas después, con resultados enteramente satisfactorios. Ello permitió poner en marcha un importante programa de desarrollo, con la consiguiente aportación de recursos económicos, la creación de la organización adecuada, el reclutamiento del personal científico existente y la apelación a las tecnologías disponibles, especialmente relacionadas con el estudio de la

generación, propagación y recepción de las ondas de radio, materia sobre la que existía una considerable experiencia, acumulada durante bastantes años de trabajo.

El programa tenía por objeto el desarrollo de un prototipo de estación para la radio-detección y localización de aviones en vuelo con el tiempo suficiente para movilizar las reacciones de defensa. Los ensayos del prototipo se efectuaron satisfactoriamente a mediados de junio de 1935, lo que permitió poner en marcha la construcción e instalación de una red de estaciones distribuidas a lo largo de la costa oriental británica: el primero de los objetivos estratégicos de la nueva defensa aérea. Un programa que abrió el camino a la utilización de una nueva tecnología, cuyo desarrollo en busca de nuevas y más eficaces aplicaciones civiles y militares, como ha ocurrido en el caso del láser, se ha prolongado hasta nuestros días, y cuya importancia en la evolución de la Segunda Guerra Mundial fue tal, que se ha dicho, no sin fundamento, que si bien la bomba atómica terminó la guerra, quien la ganó realmente fue el radar.

La contribución de Watson Watt a la nueva tecnología fue tan significativa que se le consideró el padre del invento, recibiendo por ello del gobierno de Su Majestad británica, en 1942, el título de «caballero» y, en 1951, un importante premio económico, que hubo de compartir con sus colegas de investigación; premio cuya cuantía y reparto fueron objeto de prolongados y pintorescos debates con el jurado de adjudicación, que se prolongaron a lo largo de varios días de sesiones.

Y, sin embargo, hay que decir que la idea del radar ni fue enteramente nueva ni exclusivamente británica. No se puede considerar enteramente nueva porque existían diversos antecedentes sobre su posible utilización, entre los que destacan las investigaciones del famoso científico, inventor y empresario italiano Guglielmo Marconi, inventor de la radiotelegrafía, quien, en 1901, demostró que las ondas de radio se propagan mucho más allá de lo que permitiría la curvatura de la Tierra si sólo lo hiciesen en línea recta, lo que le valió el premio Nobel de Física de 1909 y el título de marqués.

Efectivamente, durante una reunión conjunta de los institutos de Ingenieros Eléctricos y de Radio, celebrada en Nueva York en 1922, Marconi, en su discurso como invitado de honor de tan solemne acontecimiento, explicó que le parecía posible diseñar «un aparato mediante el cual un barco podría radiar un haz divergente de rayos en cualquier dirección deseada, de tal modo que si los rayos incidían sobre una superficie metálica, tal como otro barco, serían reflejados por éste y retornarían a un receptor situado en la nave emisora, revelando inmediatamente, por consiguiente, la presencia y orientación de la otra nave, con independencia de las condiciones de visibilidad del momento». Esta sugerencia fue confirmada experimentalmente ese mismo año en el laboratorio norteamericano de Investigación Naval de Anacosta, sin que ello significase, no obstante, el lanzamiento de un programa significativo de I+D sobre la materia en Estados Unidos.

Por lo que respecta a la exclusividad del programa británico, tampoco ocurría así a mediados de los años treinta, porque simultáneamente se estaban llevando a cabo trabajos de investigación y desarrollo sobre la materia en otros países; concretamente, en el citado laboratorio de Investigación Naval de Estados Unidos, así como en Francia y en Alemania. En este último país, como en Inglaterra, se desarrolló e instaló una red continental de estaciones de alerta temprana llamada *Freia*, en memoria de la diosa de la guerra del mismo nombre de la mitología nórdica.

Y me parece curioso señalar que Alemania tardó años en descubrir, ya empezada la guerra, la función de alerta temprana de las estaciones de la red británica, a pesar de resultar bien visibles por las altas torres para la instalación de las antenas y por el extraordinario servicio de intercepción de la defensa aérea que estaban prestando.

Por otra parte, no resulta sorprendente la simultaneidad de investigaciones paralelas en varios países sobre esta y otras muchas cuestiones; circunstancia que se repite cuando el nivel de conocimientos y expectativas de negocio en un área científica o tecnológica determinada atrae inevitablemente la atención de diversos grupos de trabajo hacia las mismas. Es precisamente esto lo que está ocurriendo en diversos países, incluido el nuestro, con temas de tanta actualidad como la biología, las telecomunicaciones, la informática o los nuevos materiales.

Así ocurrió durante el siglo XIX en relación con la electricidad y el magnetismo. Al comienzo de ese siglo eran simplemente dos curiosos fenómenos físicos independientes, conocidos desde hacía mucho tiempo, pero que, por diversas razones, atrajeron simultáneamente la atención de numerosos y eminentes investigadores de diversos países, cuyos trabajos permitieron descubrir las leyes que gobiernan el comportamiento e interacción de tales fenómenos y disponer de la teoría completa del electromagnetismo, base y fundamento de los nuevos desarrollos tecnológicos que han cambiado decisivamente las condiciones de la vida sobre la Tierra.

Basta recordar, por ejemplo, entre otros muchos, los nombres y las contribuciones científicas de investigadores tan famosos como el italiano Alejandro Volta, inventor, en 1800, de la pila que lleva su nombre, primer y elemental generador de una corriente eléctrica; el danés Hans Christian Oersted, que, en 1819, descubrió casualmente la desviación de una aguja imantada por la proximidad de una corriente eléctrica: primera demostración de la relación existente entre la electricidad y el magnetismo, que puede considerarse como el origen de la ciencia del electromagnetismo; y Michael Faraday, uno de los diez hijos de un humilde herrero londinense, autodidacto, descubridor del benceno, de las leyes de la electrolisis y de la inducción electromagnética, que le condujo en 1831 a la invención del primer generador de electricidad, seguramente el descubrimiento eléctrico individual más grande de la historia al permitir la generación abundante y barata de corriente eléctrica, y cuyo desarrollo tecnológico y empresarial ocupó más de medio siglo.

La figura más emblemática, popular y prolífica del largo y fecundo proceso de electrificación de la humanidad fue el célebre inventor estadounidense Thomas Alba Edison, que, a lo largo de sus ochenta y cuatro años de vida, registró más de un millar de patentes sobre infinidad de inventos relacionados con el telégrafo, el teléfono, el gramófono, el cinematógrafo, la producción de electricidad y la iluminación eléctrica. Esto le valió el calificativo de *Mago de Menlo Park*, el lugar de Nueva Jersey donde, en 1876, fundó el primer laboratorio de investigación industrial del mundo, del que salieron la mayor parte de sus invenciones. Construyó en Nueva York la primera central eléctrica del mundo y dotó a los hogares de la primera bombilla de iluminación.

El matemático precoz y físico escocés James Clerk Maxwell, creador con Boltzmann de la teoría cinética de los gases, fue quien, a partir de 1864, dio forma matemática completa a la teoría del electromagnetismo, descubriendo teóricamente la existencia de ondas electromagnéticas que se propagan en el espacio a la velocidad de la luz. Esto unificó la naturaleza de ambos fenómenos, confirmada pocos años después por los experimentos de Augusto Righi, en Italia, al demostrar que las ondas electromagnéticas estaban sujetas a los mismos fenómenos de reflexión, refracción, polarización e interferencias que la luz.

El físico alemán Heinrich Rudolf Hertz confirmó experimentalmente en 1886, mediante la generación de descargas eléctricas, la existencia de las ondas electromagnéticas predichas por la teoría de Maxwell, radiaciones que, por ello, se denominan ondas hertzianas.

Finalmente, Marconi, ya mencionado, ha sido merecidamente considerado el padre de las comunicaciones por radio, gozando en vida de una enorme popularidad.

Por otra parte, el nombre de Edison, que falleció en 1931, está también relacionado con la otra rama de la ciencia y la tecnología vinculada al electromagnetismo: la llamada electrónica, que estudia el movimiento de los electrones y su control para fines útiles. En efecto, durante las investigaciones llevadas a cabo en Menlo Park para mejorar la iluminación de las bombillas de filamento incandescente, se descubrió el llamado «efecto Edison», que está en la base del funcionamiento de las válvulas de radio, inventadas años después. Y en 1897, el físico británico Joseph J. Thomson, de la Universidad de Cambridge, explicó este y otros fenómenos por el movimiento de partículas elementales de electricidad negativa, a las que se dio el nombre de «electrones». Su descubrimiento, que dio lugar al nacimiento de la nueva ciencia electrónica, valió a Thomson el premio Nobel de Física en 1906.

En el siglo XX, la electrónica, como en el XIX el electromagnetismo, ha dado lugar a una verdadera revolución en las condiciones de vida, de tal magnitud que, desde hace quince años, la industria electrónica es el mayor sector industrial de Estados Unidos, Japón y los países avanzados de Europa occidental.

Volviendo a la situación de los años treinta donde habíamos empezado, y al tema de la invención y desarrollo

del radar, hay que decir que la idea del invento es bien sencilla y su comprensión no necesita por ello de ninguna preparación especial. El principio en el que se basa es el mismo del eco acústico; es decir, la captación del sonido reflejado por un cuerpo duro en la atmósfera o bien por el mar, como ocurre con el sonar, propuesto inicialmente para detectar icebergs, empleado desde 1916, durante la guerra europea, para la lucha antisubmarina, y utilizado además, posteriormente, en aplicaciones civiles como la navegación o la localización de bancos de pesca.

Lo que ocurre en el caso del radar es que las ondas que se utilizan son las electromagnéticas de la radio, cuya velocidad de propagación es de 300 000 km por segundo, frente a los cientos de metros de las acústicas; es decir, un millón de veces más rápidas y mucho más difíciles de generar y recibir que éstas. Esto, naturalmente, plantea problemas tecnológicos de difícil resolución; por ejemplo, en el radar hay que operar con tiempos de microsegundos, puesto que las ondas hertzianas recorren 300 m en una millonésima de segundo.

El procedimiento básico de operación de un radar consiste en transmitir un breve impulso de ondas a través de una antena orientable y recibir, normalmente a través de la misma antena, las ondas reflejadas por lo que suele llamarse el «blanco», por ejemplo, un avión. Así pues, el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción, generalmente unos microsegundos, da la distancia del blanco, mientras que la orientación de la antena proporciona su dirección, que debe registrarse en acimut y altura. Todo esto, junto con otras muchas informaciones, se registra en una pantalla de rayos catódicos.

La gran ventaja del radar consiste en hacer visibles y localizar los blancos a distancias y bajo condiciones meteorológicas ópticamente inasequibles. Por otra parte, y como suele ocurrir en situaciones semejantes, se entró rápidamente en un proceso de desarrollo para mejorar sus prestaciones y diversificar sus aplicaciones; por ejemplo, la de determinar la velocidad de aproximación del blanco, aprovechando el llamado «efecto Doppler», que el físico austriaco del mismo nombre había descubierto y explicado para el sonido a mediados del siglo XIX y que también se produce para las ondas electromagnéticas. El físico francés Armand Hippolyte Louis Fizeau había aplicado con éxito este efecto, en 1848, a las ondas luminosas, lo que tuvo importantes aplicaciones en astronomía, al explicar el desplazamiento del espectro de las estrellas hacia el rojo o hacia el violeta, respectivamente, según se alejasen o acercasen a la Tierra.

Otro requerimiento importante por razones de concentración de la energía radiada y de precisión de las observaciones registradas fue el de utilizar ondas de longitud centimétrica en lugar de las de decenas o centenares de metros empleadas en la radiodifusión. Esto significaba operar en el nuevo dominio tecnológico de las llamadas microondas, terreno hoy familiar hasta en las cocinas de muchos hogares, en el que Inglaterra consiguió en el otoño de 1940 —ya empezada la Segunda Guerra Mundial y

con las incursiones aeronáuticas alemanas en marcha— una posición de ventaja, mediante el sensacional invento de un generador de ondas de 10 cm de longitud y de gran potencia, el llamado «magnetrón», desarrollado empíricamente por los físicos de la Universidad de Birmingham John Randall, que recibió por ello un título de nobleza, y Harry Boot.

Por otro lado, la evolución de los acontecimientos puso de manifiesto que Gran Bretaña no podía hacer frente por sí sola a la demanda tecnológica e industrial necesarias para enfrentarse con éxito a la marcha de la guerra. Esta situación le movió a proponer a Estados Unidos un amplio programa de colaboración, que resultó extraordinariamente fecundo para el desarrollo del radar, instrumento decisivo para el triunfo de la llamada «batalla de Inglaterra», cuyo resultado obligó a Hitler a desistir del desembarco previsto para ese mismo año.

La colaboración entre Estados Unidos y Gran Bretaña para el desarrollo de radar, con base en el magnetrón británico y bajo la angustiosa presión de los miles de muertos causados por los bombardeos aéreos alemanes, desencadenó un frenético esfuerzo tecnológico, análogo al que se había producido pocos años antes en Inglaterra al lanzarse el programa del radar. Una de las más espectaculares manifestaciones de ese esfuerzo fue la creación y dotación a marchas forzadas, en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), del llamado Laboratorio de Radiación, en el marco del Comité Nacional de Investigación para la Defensa (NDRC), instituido pocos meses antes por el presidente Roosevelt ante la creciente evidencia de la inevitable participación de Estados Unidos en el conflicto.

La creación del comité y, consiguientemente, del Laboratorio de Radiación fue el resultado de la feliz iniciativa de un eminente ingeniero eléctrico del MIT, Vannevar Bush, con larga y reconocida experiencia en cuestiones de investigación científica y desarrollo tecnológico, cuyo origen se remontaba a la Primera Guerra Mundial, cuando llevó a cabo investigaciones científicas sobre la detección submarina para la Marina estadounidense. Posteriormente fue profesor en el MIT, donde desarrolló el llamado «análizador diferencial», primera calculadora analógica para la integración de sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias, de la que se construyeron diversos modelos en Estados Unidos y en Gran Bretaña.

El NDRC era, en efecto, una oficina civil de asesoramiento y consulta en materias de I+D para la defensa, bajo la presidencia de Vannevar Bush, con acceso directo a la Casa Blanca.

Pero la evolución de los acontecimientos, con la consiguiente preparación norteamericana para la guerra, hizo recomendable la creación, poco después, de una Agencia Federal Civil para coordinar e impulsar el esfuerzo científico y tecnológico del país para la defensa: la llamada Oficina de Investigación Científica y Desarrollo (OSRD), también bajo la presidencia de Vannevar Bush, pero ahora con capacidad administrativa para obtener directamente del Congreso recursos presupuestarios, así como para rea-

lizar desarrollos tecnológicos hasta el nivel de prototipos; es decir, con una capacidad de gestión muy superior a la del comité, que pasó a depender de la agencia. El papel desempeñado por la Oficina de Investigación Científica y Desarrollo fue fundamental para el esfuerzo científico y tecnológico de guerra y, al terminar la contienda, el Laboratorio de Radiación contaba con una plantilla de cerca de cuatro mil personas y con dos ramas anejas al mismo: una en Gran Bretaña y otra en Australia.

El éxito del radar y el acierto de Vannevar Bush en la promoción y gestión de la I+D civil para la defensa durante los duros años de la guerra, le convirtieron en la primera y más influyente autoridad del país sobre la política científica y tecnológica. Por ello, al aproximarse el final de la contienda, el presidente Roosevelt le encargó la elaboración de un informe sobre la política de I+D para la paz. Fue el célebre documento titulado «Ciencia: la frontera interminable», que recibió el nuevo presidente Harry Truman, recién fallecido Roosevelt. El informe de Vannevar Bush sirvió de base para un duro y acalorado debate sobre la nueva política de I+D, que condujo a la creación de la Fundación Nacional de Ciencias (NSF), de la NASA y de otros diversos organismos.

Entre 1939 y 1955, Vannevar Bush fue presidente de la famosa Institución Carnegie de Washington, creada en 1902 por el gran filántropo y famoso magnate del acero Andrew Carnegie, quien, en 1911, creó también la Corporación Carnegie de Nueva York, generosamente dotada y consagrada a promover el avance de la civilización.

En 1988, a los cuatro años del fallecimiento de Vannevar Bush, la Corporación Carnegie creó la Comisión Carnegie sobre la Ciencia, la Tecnología y el Gobierno, para «ayudar a que las instituciones gubernamentales respondan a los avances sin precedentes de la ciencia y la tecnología que están transformando el mundo». Este propósito responde muy bien a las aspiraciones de Bush y es llevado a cabo por la comisión mediante la elaboración de informes, seminarios y otras actividades de gran interés para la instrumentación de las políticas de I+D.

Un factor decisivo para el éxito del Laboratorio de Radiación y, en general, de la política tecnológica de defensa, fue el del reclutamiento de su personal entre los científicos e ingenieros más eminentes de todos los centros del país, muchos de los cuales no dudaron en cambiar sobre la marcha de tarea y residencia, en el ambiente de movilización patriótica del momento, para consagrar su trabajo, bajo condiciones imprecisas y con estrictos requerimientos de confidencialidad, al nuevo dominio en desarrollo de la microelectrónica.

Un ejemplo especialmente distinguido de ese esfuerzo de reclutamiento fue el del profesor Ernest O. Lawrence, físico de la Universidad de California, en Berkeley, e inventor del ciclotrón, por lo que había sido galardonado con el premio Nobel de Física un año antes (1939). Lawrence incorporó al proyecto a otro físico eminente de su misma especialidad, el profesor Lee Dubridge, con grandes do-

tes de organizador, que dirigió el Laboratorio de Radiación desde su creación a lo largo de todo el proceso.

En el transcurso de los años, hasta una decena de empleados y colaboradores del Laboratorio fueron galardonados con otros tantos premios Nobel por diversas contribuciones científicas.

En cuanto a los programas de trabajo más urgentes para el nuevo Laboratorio, la misión inglesa señaló como prioridad absoluta el desarrollo de un radar de intercepción a bordo de un avión de combate nocturno, para hacer frente cuanto antes a los devastadores ataques de la Luftwaffe sobre Londres y otras ciudades. Este y otros muchos desarrollos y aplicaciones se vieron satisfechos a lo largo de los años; entre ellos cabe mencionar su utilización para el seguimiento automático y la dirección de tiro de las baterías antiaéreas o para la lucha antisubmarina, otra de las amenazas críticas de la guerra.

Acabada la contienda, prosiguió el desarrollo del radar, como continúa hoy, en sus aplicaciones militares, por ejemplo, para el guiado de misiles. En las civiles es un instrumento indispensable para el tráfico aéreo, tanto en los aeropuertos como en los aviones comerciales, normalmente dotados de radares de medición de distancias, de alerta y prevención de colisiones con otras aeronaves, de meteorología, de medición de altura de vuelo, etc. Una utilización especial bastante impopular, implantada con éxito desde hace años, es el control de velocidad en la circulación por carretera. Finalmente, la utilización del radar, que en 1946 reflejó en la Luna una emisión terrestre, está muy extendida para la exploración terrestre y espacial, mediante la técnica llamada de «apertura sintética», que proporciona la topografía y otras informaciones de los planetas y de la propia Tierra.

Por cierto que la eficacia del radar dio lugar a la investigación y el desarrollo de las nuevas tecnologías llamadas de «furtividad» (*Stealth*), de las que Estados Unidos dispone prácticamente en exclusiva y que pretenden hacer poco menos que invisibles a los «ojos» del radar a algunos aviones y misiles.

Se trata de una tecnología complicada y difícil que combina técnicas de reflexión geométrica y de absorción de las radiaciones electromagnéticas del radar. Su realización práctica más espectacular es el famoso avión norteamericano de ataque Lockheed F-117A, que ha hecho célebre la guerra del Golfo y cuya imagen parece más bien un ejercicio de papiroflexia que un vehículo de la más avanzada tecnología.

Para terminar esta exposición sobre el radar, me gustaría mencionar uno de los inventos electrónicos más trascendentales de la posguerra, el del transistor, llevado a cabo en 1948 por el físico estadounidense William Bradford Shockley, de los laboratorios de la Bell Telephone, que había participado muy activamente en el programa del radar durante los años de la Segunda Guerra Mundial. El descubrimiento del transistor le valió a Shockley el premio Nobel de Física en 1956, que compartió con sus colaboradores Bardeen y Brattain. Sustituyó a las clásicas válvu-

las de la radiodifusión, inaugurando la época del silicio y otros semiconductores, es decir, de los dispositivos de «estado sólido», una de las nuevas tecnologías más significativas de los avances científicos del siglo XX.

LOS AGENTES DEL SISTEMA DE I+D+I

En los países con un sistema establecido para la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación (I+D+I), tales actividades transcurren en el seno de un conjunto de instituciones públicas y privadas como las citadas a continuación.

En primer lugar, es necesario mencionar a las universidades y centros equivalentes de enseñanza científica y técnica superior, donde a la función docente se añade la investigadora según el modelo histórico inicialmente desarrollado en Alemania.

En segundo lugar, destacan los centros dedicados exclusivamente a la investigación básica y aplicada, aunque eventualmente puedan desarrollar alguna labor docente, organizados en institutos especializados por ramas científicas y tecnológicas y compartidos o no con otras entidades. Es el caso español del CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), creado al terminar la guerra civil y semejante a los de otros países como Francia o Italia. El CSIC, de naturaleza interdisciplinar, es el mayor organismo público de investigación español y cuenta con más de un centenar de centros distribuidos por todo el país, en los que trabajan 8 000 profesionales, con un presupuesto anual del orden de los 60 000 millones de pesetas.

En tercer lugar se encuentran otros organismos públicos sectoriales, creados por exigencias científicas, tecnológicas o de asistencia técnica de la especialidad correspondiente. En España tal es el caso, por ejemplo, del INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial Esteban Terradas), creado en 1942 para el sector aeronáutico, al que se incorporó el espacial durante los años sesenta, o el CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas), que procede de la transformación en 1986 de la inicial Junta de Energía Nuclear, creada en 1951. Otros organismos son el CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) o el Canal de Experiencias Hidrodinámicas del Pardo, para tecnologías relacionadas con la ingeniería naval, entre otros muchos. Estos organismos sectoriales frecuentemente tienen, entre sus justificaciones, la de exigir la dotación de instalaciones altamente especializadas y muy costosas. Es el caso, por ejemplo, de la NASA estadounidense para la aviación y el espacio, bien conocida en todo el mundo, o el internacional del CERN (Consejo Europeo para la Investigación Nuclear) para las investigaciones en física de altas energías.

Finalmente, está el mundo empresarial, que participa en el proceso bien directamente, mediante sus propios centros, laboratorios o departamentos industriales, bien ex-

ternamente, a través de organizaciones técnicas cooperativas sectoriales o por adquisición de tecnología, ya sea de forma directa o incorporada a determinados productos. Es este un mundo muy complejo y diverso, al que corresponde, casi en su totalidad, la difícil responsabilidad de la innovación.

No pueden dejarse de mencionar otras muchas entidades que de algún modo contribuyen al proceso, como son, por ejemplo, algunas fundaciones, algunas tareas de las Academias, etc.

LA EVALUACIÓN INTERNACIONAL DE LOS SISTEMAS DE I+D+I

Desde hace varias décadas está en curso un esfuerzo internacional, del que son un excelente ejemplo las publicaciones periódicas de la OCDE (Organización de Cooperación y Desarrollo Económico), para desarrollar una metodología que permita medir y comparar la dimensión, características y resultados de los diversos sistemas para la ciencia, la tecnología y la innovación. Esto hace posible evaluar con cierta precisión la situación y tendencias relativas de un determinado sistema.

Así, se comprueba, por ejemplo, que el esfuerzo económico de la Unión Europea es apreciablemente menor que el de Estados Unidos y Japón y que, dentro de ella, la aportación española es escasamente la mitad de la que comparativamente le correspondería, a pesar del importante incremento que ha experimentado nuestra capacidad de I+D durante la última década, especialmente en su vertiente científica.

Asimismo, se ha puesto de manifiesto que la capacidad europea de innovación es sensiblemente inferior a la de los dos países citados con anterioridad —lo que suele llamarse la «paradoja europea»—, y que la española es claramente menor que aquélla. Esta situación es motivo de honda preocupación en la Unión Europea, que recientemente ha publicado un *Libro Verde* sobre el tema, uno de los puntos más críticos y difíciles de impulsar con éxito de las futuras políticas de I+D+I.

Creo poder decir que la entidad española que de forma más sistemática analiza la situación en su conjunto, aunque desde una perspectiva predominantemente empresarial, es la Fundación COTEC para la Innovación Tecnológica, cuyos informes anuales y otras publicaciones contienen valiosísima información. En particular, los dos datos que permiten medir y comparar la magnitud y el «peso» de un sistema de I+D son: la cuantía de los recursos económicos públicos y privados que se dedican anualmente a estas tareas —medida en porcentaje del PIB—, y el número de profesionales o de investigadores que trabajan en ellas —medidos en relación con la población activa—. Por ejemplo, como se ha indicado, Estados Unidos y Japón ocupan la primera posición en el esfuerzo económico para I+D, con un nivel anual de gastos muy próximo al 3 % del PIB; la Unión Europea ocupa la segunda, con

un nivel medio muy próximo al 2%, y España, como Italia, la tercera, con un 1% aproximadamente.

Análogamente, en cuanto a los recursos humanos, los investigadores de la Unión Europea son el 5% de su población activa, relación que se reduce al 3% en el caso español. En términos absolutos, esto significa que España consagra anualmente unos 800 000 millones de pesetas a las tareas de I+D, y que los investigadores dedicados a las mismas ascienden a 54 000.

EL SISTEMA ESPAÑOL

Una primera conclusión de estos datos es que el tamaño español del sistema de I+D es pequeño, lo que exige un esfuerzo de desarrollo importante, que ha de ser, además, sostenido, porque se trata de un problema cuyo remedio no puede conseguirse mediante saltos a corto plazo.

Otro dato también muy significativo es el del reparto de gastos entre el sector público, es decir, las administraciones, y el sector privado, o sea, las empresas. Así, mientras que en la Unión Europea cerca de los dos tercios de los gastos de I+D proceden del sector privado, en España no llegan a la mitad. De igual forma se comprueba que en España el porcentaje de investigadores que trabajan en el sector público (universidades y centros) es muy superior al de los que lo hacen en el sector privado (empresas), a diferencia de lo que ocurre en otros países avanzados.

Todo esto evidencia que el sistema español, además de insuficiente, adolece de serios desequilibrios entre los sectores público y privado que guardan relación con la «paradoja de la innovación» a la que hemos hecho referencia anteriormente.

La política española para la ciencia, la tecnología y la innovación está regulada desde 1986 por la llamada Ley de la Ciencia, que define los objetivos de la política de I+D y crea para conseguirlos el instrumento fundamental del Plan Nacional Plurianual, introducido en 1988. Su cuarta edición, de cuatro años de duración, ha entrado en vigor en 2000.

Una importante carencia de nuestro sistema de I+D, que se ha ido evidenciando a medida que se avanzaba en la elaboración, aplicación y análisis de los sucesivos planes nacionales, ha sido la manifiesta insuficiencia de la coordinación entre las administraciones, las políticas, los programas y los agentes públicos y privados del sistema. Es este un requisito indispensable para poder hacer efectivos los ambiciosos objetivos de la Ley de la Ciencia.

Para ello, entre las posibles acciones a aplicar se ha reconocido, con muy amplia coincidencia de opiniones, la necesidad de situar al más alto nivel posible los órganos políticos de definición y control, habida cuenta de la variedad de administraciones, departamentos y otras entidades con responsabilidades en I+D, cuyas actividades se trata de coordinar.

Una solución transitoria a tan delicado problema ha sido la creación en enero de 1998, en la presidencia del Go-

bierno, de la Oficina de Ciencia y Tecnología (OCYT) para el ejercicio de las funciones de planificación, seguimiento y evaluación de las líneas prioritarias de la política de investigación científica, desarrollo e innovación tecnológica. Al mismo tiempo, el presidente del Gobierno asumía la presidencia de la CICYT (Comisión Interministerial para la Ciencia y la Tecnología), órgano supremo de la política de I+D, creado por la Ley de la Ciencia, que venía presidiendo, desde 1986, el ministro de Educación y Ciencia.

Recientemente, la Administración ha creado un nuevo Ministerio de Ciencia y Tecnología, cuya dudosa eficacia para hacer frente a las graves carencias del sistema español está por acreditar.

La nueva organización emprendió con gran decisión y acierto sus tareas y el país pudo captar en repetidas oportunidades la firme decisión del Gobierno de convertir la I+D+I en uno de los pilares de su programa, cuya expresión más concreta y manifiesta es el contenido del nuevo Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica, aprobado por el Consejo de Ministros en su reunión del 12 de noviembre de 1999.

En definitiva, un aspecto fundamental de la nueva política de I+D+I que se propone desarrollar el Gobierno a través del nuevo Plan Nacional es la de promocionar la más activa participación empresarial, mediante la adopción y el refuerzo de un conjunto de acciones que estimulen el desarrollo de una decidida estrategia de innovación: el único y más difícil instrumento que, al final de la cadena del proceso, transforma los frutos de la investigación y el desarrollo en realizaciones de utilidad económica y social.

LA COOPERACIÓN INTERNACIONAL

Para terminar esta exposición desearía señalar que una dimensión muy importante de las actuales políticas de I+D+I es la de la cooperación internacional, que permite abordar conjuntamente programas individualmente inasequibles para muchos de los participantes.

El ejemplo más general y próximo es el de los llamados Programas Marco de la Unión Europea, cuya quinta edición está vigente en la actualidad. España participa activamente en numerosos proyectos del programa, a los que se concurre desde diversas universidades, centros de I+D y empresas, en colaboración con entidades homólogas de otros países de la Unión.

Una organización sectorial de I+D muy importante, de la que España forma parte desde su creación, es la llamada ESA (Agencia Europea del Espacio), cuyas realizaciones, tanto en cuanto a lanzadores como a satélites y otros vehículos espaciales, son objeto de frecuentes noticias en los medios de difusión.

Existen otras numerosas entidades cooperativas internacionales, como el CERN, ya mencionado.

Por último, en el campo de la seguridad y la defensa, cuya estructura europea comienza a diseñarse, existen desde hace

años programas cooperativos de desarrollo de nuevos sistemas de armas, entre los que uno de los más importantes y actuales es el nuevo avión europeo de combate Eurojet, en el que participan Gran Bretaña, Alemania, Italia y España.

BIBLIOGRAFÍA

- BUDERY, R., *The Invention that Changed the World*, Abacus, Londres, 1996.
- COMISIÓN DE LA UE, *Libro Verde de la Innovación*, Bruselas, 1995.
- COMISIÓN INTERMINISTERIAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA, *Indicadores del Sistema español de Ciencia y Tecnología*, Oficina de Ciencia y Tecnología, 1999.
- —, *Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica. 2000-2003*, Oficina de Ciencia y Tecnología, 1999.
- COTEC, *El Sistema español de Innovación. Diagnósticos y recomendaciones*, Libro Blanco, 1998.
- GONZÁLEZ BERNALDO DE QUIRÓS, J., «RADAR y sensores», *Tecnología Aeronáutica*, Real Academia de Ciencias, Madrid, 1990.
- HALL, P. S., GARLAND-COLLINS, T. K., PICTON, R. S., y LEE, R. G., *RADAR*, Brassey's Ltd., 1991.
- HECHT, J., y TERESI, D., *El Rayo LASER*, Argos Vergara, Barcelona, 1982.
- KOCH, W. E., *The Creative Engineer. The Art of Inventing*, Plenum Press, Nueva York, 1978.
- «Ley de fomento y coordinación general de la Investigación Científica y Técnica», *BOE* de 18 de abril de 1986.
- MOWERY, D. C., y ROSEMBERG, N., *Paths of Innovation*, Cambridge University Press, 1998.
- OCDE, *Manual de Frascati. La mesure des activités scientifiques et technologiques*, París, 1994.
- —, *Politique scientifique et technologique. Bilan et perspectives*, París, 1994.
- OLLERO, A., LUQUE, A., y MILLÁN, G., *Ciencia y tecnología en España: bases para una política*, FAES, Madrid, 1998.
- TOOMAY, J. C., *Radar Principles for the Non-Specialist*, Lifetime Learning Publications, Estados Unidos, 1982.