

DATOS INTERNACIONALES DE CATALOGACIÓN

Del metal al motor : innovación y atraso en la historia de la industria metal-mecánica española / Pere Pascual Domènech y Paloma Fernández Pérez (eds.). — Bilbao : Fundación BBVA, 2007.

496 p. ; 24 cm

ISBN 978-84-96515-32-1

1. Industria metalúrgica 2. Industria del automóvil
3. Desarrollo industrial 4. España I. Pascual Domènech,
Pere II. Fernández Pérez, Paloma III. Fundación BBVA, ed.
· 338.45:621(460)«18/19»

*Del metal al motor:
Innovación y atraso en la historia de la industria metal-mecánica española*

1. Trayectorias tecnológicas de las máquinas térmicas e industria del motor en España

Rafael Rubén Amengual Matas
Universidad Politécnica de Madrid

José Patricio Saiz González
Universidad Autónoma de Madrid*

1.1. Introducción

En este trabajo se pretende analizar los diversos paradigmas y trayectorias tecnológicas relacionados con las máquinas térmicas a lo largo del siglo XIX y primeras décadas del XX para reflexionar sobre la dinámica evolutiva y lógica interna del propio proceso de innovación en el sector, sobre la participación española en el mismo y sobre el impacto específico de los avances en la termodinámica aplicada en la estructura económica nacional y en el desarrollo y caracterización de una industria del motor especializada.

Es indiscutible que la producción de trabajo mecánico útil a partir de máquinas térmicas ha sido esencial para el sostenimiento y expansión de cualquier proceso de industrialización. En ese sentido, cuatro son los grandes paradigmas tecnológicos dentro del axioma termodinámico: las máquinas alternativas de vapor, los motores de combustión interna alternativos, las turbinas de vapor y las turbinas de gas. La trayectoria dibujada por las primeras máquinas de vapor

* La realización de esta comunicación se ha beneficiado de los siguientes proyectos de investigación:

a) *Cambio tecnológico y transferencia de tecnología en España durante los siglos XIX y XX*, Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007 (Ministerio de Educación y Ciencia, Dirección General de Investigación, referencia SEJ2004-03542/ECON); b) *Patents in History: Studies in the Patterns and Institutions of Technological Change and Transfer (XV-XIX)* (2002-2008), financiado por *The British Academy*, y c) *Convenio de colaboración entre la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM) y la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) para la catalogación y estudio de los fondos históricos de patentes y marcas (1999-2005)*.

alcanzó su madurez en el siglo XIX y fue declinando al tiempo que se desarrollaban —entre 1870 y 1914— la combustión interna alternativa y las turbinas de vapor. La cuarta trayectoria, aunque hunde sus raíces en este período, no comenzó a desplegarse realmente hasta la década de los treinta del siglo XX, pues su extensión dependió de la convergencia técnica con los avances de la metalurgia y la aeronáutica. Lo cierto es que cada una de estas trayectorias abrió oportunidades tecnológicas e industriales que, en un país atrasado y dependiente como España, fueron difíciles de aprovechar. En los tres primeros paradigmas descritos los procesos de innovación nacionales fueron muy escasos durante el período estudiado —cuando no inexistentes—, pero incluso la aparición y crecimiento de un sector industrial especializado en la fabricación de motores térmicos, aunque fuese a partir de la tecnología exterior, fue, o bien muy tardío (caso de las máquinas alternativas de vapor), o bien suficientemente lento y escaso (motores de combustión interna alternativos y turbinas de vapor) como para no poderlo considerar un sector clave en el cambio estructural, por más que, durante el primer tercio del siglo XX, se desarrollaran en la Península algunos centros importantes de producción de motores.

Análizando los hitos principales en la historia tecnológica de las máquinas térmicas y estudiando en detalle todas las patentes relacionadas que se registraron en España entre 1826 y 1914 —junto con las más significativas depositadas en otros países—, se intentará reflexionar empíricamente sobre algunas de las cuestiones recurrentes en la evolución de la tecnología, como, por ejemplo, el papel de las innovaciones radicales y las incrementales en los paradigmas y trayectorias, algo que puede ayudar a comprobar la capacidad explicativa de los modelos evolutivos a la hora de entender el progreso tecnológico como un doble proceso de mutación y cambio radical y de acumulación y dependencia de las trayectorias pasadas. La idea final es arrojar luz sobre la mecánica de los procesos de cambio técnico a largo plazo, sobre las características del sistema español de innovación y sobre las causas de su escasa participación en el establecimiento y dirección de las trayectorias de los motores térmicos. Por último, también pretendemos acercarnos al origen de la industria nacional relacionada con este tipo de maquinaria antes de la Primera Guerra Mundial, para tratar de averiguar en qué medida

podieron existir capacidades y actitudes innovadoras y cuál fue su grado de dependencia tecnológica del exterior.

1.2. Un primer esbozo de las trayectorias tecnológicas de las máquinas térmicas

Aunque existen antecedentes interesantes, como las máquinas para elevar agua de Jerónimo de Ayanz (1606)¹, Thomas Savery (1698)² y Denis Papin (1707),³ ninguna de ellas eran motores en el sentido actual del término, pues utilizaban la fuerza expansiva del vapor bien directamente sobre el líquido que se pretendía bombear, bien generando vacío para succionarlo, o bien, en el caso de Papin, sobre un pistón que se hallaba en contacto con el agua. No puede hablarse, estrictamente, de máquinas térmicas y producción de trabajo mecánico útil hasta la invención, en 1712, de la *máquina atmosférica* de Thomas Newcomen (Rolt y Allen 1977) que, aunque en origen fue también aplicada a la elevación de aguas, introducía ya un pistón independiente que, empujado por la presión atmosférica, producía el movimiento que se transmitía a un eje y de ahí a la bomba, lo que la convertía en el primer motor de vapor capaz de ser incorporado a otros usos.⁴

¹ Ayanz planteaba aplicar la presión del vapor para elevar agua de un depósito adonde llegaba por gravedad. Para más información sobre los ingenios de Ayanz, véase García Tapia (1993, 135-149); (2001, 218-234). La Real Cédula de Privilegio de invención y su transcripción pueden encontrarse en García Tapia (1990, 109-256).

² El inglés Thomas Savery obtuvo el 25 de julio de 1698 una patente titulada *Maquinaria para elevar el agua, proporcionar movimiento a los molinos, etc.* Véase *The United Kingdom Patent Office* (UKPO), Patente 356, A. D., 1698. En septiembre de 1701 Savery presentó la descripción y los dibujos. La máquina utilizaba la condensación del vapor para generar vacío y succionar agua a un depósito que luego era elevada por la presión expansiva del vapor. En Cummins (1989, 3-7) puede encontrarse más información del ingenio de Savery; sobre la construcción de la máquina, véase Buckland (1986, 1-20).

³ Aunque el francés Denis Papin planteó ya algunos de los principios en los que se basarían las máquinas de vapor alternativas, parece que no llegó a desarrollarlos en la práctica, aunque, en su propuesta de mejora de la máquina de Savery en 1707, disponía un pistón flotante sobre el agua que actuaba empujado por el vapor (v. Rolt y Allen 1977, 28-29). No consta que Papin patentase ninguno de sus ingenios.

⁴ En la máquina de Newcomen, la condensación del vapor en el cilindro producía un vacío que hacía actuar a la presión atmosférica sobre la parte superior del pistón, lo que generaba trabajo útil que se comunicaba a un eje. Newcomen nunca pudo patentar su invento por el bloqueo de la patente de Savery, con quien tuvo que negociar para explotar el ingenio.

Las mejoras patentadas por James Watt en 1769, 1775, 1781 y 1782 (Cummins 1989, 7-11), incluyendo el émbolo de doble efecto,⁵ aumentarían la eficacia del nuevo motor y lo harían realmente aplicable a nuevos propósitos. La asociación de Watt y del industrial Boulton supuso un salto cualitativo en la actividad empresarial de fabricación y venta de máquinas térmicas para otras industrias. Newcomen y Watt, por tanto, desarrollaron lo esencial del primer paradigma tecnológico a estudiar: el de las máquinas alternativas de vapor, cuya trayectoria ascendente duró más de una centuria, hasta que, en la segunda mitad del siglo XIX, comenzó la competencia de nuevos motores térmicos que marcarían su declive.

El segundo paradigma tecnológico económicamente importante dentro del axioma termodinámico es el de los motores de combustión interna alternativos. La idea básica consistió en sustituir el vapor como fluido de trabajo por una mezcla de gas inflamable y aire de manera que se pudiera producir su combustión en el interior del cilindro para generar la expansión capaz de producir el movimiento del pistón. Aunque algunos se remontan a los ensayos de Huygens y Papin para quemar pólvora dentro de un cilindro y generar vacío (Cummins 1989, 1-2; Rolt y Allen 1977, 24), los antecedentes reales de este tipo de máquinas hay que buscarlos en los motores de aire caliente diseñados por los ingleses Robert Stirling⁶ en 1816, George Cayley⁷ en 1837 y por el sueco John Ericsson⁸ a fi-

⁵ UKPO, Patente 913 A. D., 1769 y adición de 1775 con las que protegió *Un nuevo método para disminuir el consumo de vapor y combustible en máquinas térmicas*, reclamando como novedades principales el aislamiento del cilindro, la utilización de condensadores refrigerados independientes y el empleo de lubricantes grasos. En sus patentes británicas (UKPO), 1.306 A. D., 1781, *Mejoras en máquinas de vapor* y 1.321 A. D., 1782 *Mejoras en máquinas de vapor para elevar agua y otros usos*, describe el empleo del famoso émbolo de doble efecto, que tanta importancia tendría en el rendimiento de la máquina y en la aplicación eficiente del motor de vapor a actividades industriales y de transporte. Sobre el funcionamiento de los ingenios de Watt puede verse la página web asociada a *The American Society of Mechanical Engineers*.

⁶ UKPO, Patente 4.081 A. D., 1816 titulada *Máquina de vapor y ahorro de combustible* que, en realidad, era un motor basado en un ciclo cerrado de aire con combustión externa.

⁷ Cayley describió su idea en 1807 y la patentó 30 años después en el Reino Unido. Se trataba de insuflar aire caliente a una cámara de combustión, donde recogía productos de la misma, y conducirlo, después, a un cilindro donde se expansionaba para mover un émbolo y producir trabajo.

⁸ Ericsson residió en Estados Unidos, donde ideó su motor que utilizaba aire caliente que se expandía dentro del cilindro en vez de vapor. El sistema está descrito en *The United*

nales de la década de 1850, y, sobre todo, en el motor de gas del belga Jean Joseph Etienne Lenoir,⁹ que fue inventado en 1860 y que ya era una verdadera máquina de combustión interna, aunque sin compresión previa (sobre estos autores v. Cummins 1989, 15-26 y 106-112, y Day 1980, 232-240). En 1824 Sadi Carnot había desarrollado y publicado los principios teóricos de la termodinámica aplicada moderna y en 1862 se registró en Francia una curiosa patente por parte del ingeniero Alphonse Eugène Beau de Rochas que, aunque casi no tenía planos ni dio lugar a ninguna máquina, describía en detalle la teoría del ciclo de cuatro tiempos y la necesidad de la compresión previa (incluso hasta la autoinflamación).¹⁰ Pero serían los alemanes Nicolaus August Otto y sus socios en la empresa *Gasmotorenfabrik Deutz AG*, Eugene Langen, Gottlieb Daimler y Wilhelm Maybach quienes, tras registrar en 1876 en varios países¹¹ una patente por una *Máquina perfeccionada para gas*, construyeran y comenzaran la fabricación general del primer motor de

States Patent and Trademark Office (USPTO), Patente 22.281 de 1858 y en Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM), Privilegio 1.907 por una *Máquina de calórico que reemplaza en muchos casos a las de vapor* (1859) y Privilegio 2.181 por *Máquina calórica de Ericsson mejorada* (1861).

⁹ Lenoir desarrolló sus trabajos en Francia. En 1860 registró en España (OEPM, Privilegio 2.140) un *Motor de aire dilatado con la combustión de los gases por medio de la electricidad*, el mismo que protegió también en Estados Unidos (USPTO, Patente 31.722). El motor usaba una mezcla de aire y gas que se introducía en un cilindro con un émbolo de doble efecto donde se quemaba a presión atmosférica y sin compresión previa por medio de la chispa eléctrica de una bujía.

¹⁰ *Institute Nationale de la Propriété Industrielle* (INPI), Patente 52.593. La patente de Beau de Rochas, que parece que no fue registrada en ningún otro país, no tiene desperdicio. Se trata de 151 páginas en las que se diserta sobre cuestiones como a) *perfeccionamientos de las condiciones prácticas de mayor utilización del calor y, en general, de la fuerza motriz, con aplicación al ferrocarril y a la navegación*; b) *nuevas investigaciones sobre las condiciones prácticas del uso del calor y, en general, de la fuerza motriz*; c) *máquinas locomotoras con gran presión y gran adherencia*, y d) *la tracción de los buques basada sobre el principio de la adherencia*; todo ello aderezado con reflexiones sobre «el misterio de las fuentes del Nilo», «la trata de negros» o «el marfil». Sin embargo, en el segundo capítulo describe un *Motor mixto a vapor o a gas. Dispositivo con compresión previa*, en el que intuye claramente cuestiones tan importantes como la adiabaticidad del motor y la necesidad del máximo aprovechamiento posible de la presión en el cilindro, condiciones que consigue mediante cuatro acciones dentro de la máquina: aspiración, compresión, inflamación y expulsión.

¹¹ Registrada al menos en Alemania (*Deutsches Patent- und Markenamt* [DPMA], Patentes 532 y 2.735), Reino Unido (UKPO, Patente 2.081, A. D., 1876), Estados Unidos (USPTO, Patentes 194.047 y 196.473), Francia (INPI, Patentes 113.251 y 118.922) y España (OEPM, Privilegios 5.479 y 5.694).

combustión interna alternativo de cuatro tiempos con compresión previa. Dos años después el escocés Dugald Clerk ideó un motor de dos tiempos¹² (Cummins 1989, 203-207). El siguiente y definitivo paso lo dio Rudolf Diesel (nacido en Francia pero hijo de padres alemanes y formado en Alemania) quien, en 1892, inventó y patentó un nuevo motor¹³ que trataba de emular el ciclo descrito por Carnot, para lo que tenía que mantener la temperatura constante en dos fases del ciclo y evitar las pérdidas de calor en otras dos, lo que pretendía lograr con un sistema de alimentación en el que primero comprimía sólo el aire y luego inyectaba el combustible, proceso en el que se autoinflamaba la mezcla y con el que conseguía simultanear inyección y combustión.¹⁴ Aunque Diesel comprendió pronto que no era factible conseguir el ciclo ideal de Carnot, debido a irreversibilidades en los procesos de combustión, el motor propuesto iba a permitir aumentar considerablemente el rendimiento y orientar la tendencia ascendente de la trayectoria tecnológica de los motores de combustión interna alternativos, fenómeno que se ha producido durante gran parte del siglo xx hasta alcanzar la madurez y que comienza ahora, en los albores del siglo xxi, a tener nuevos competidores.

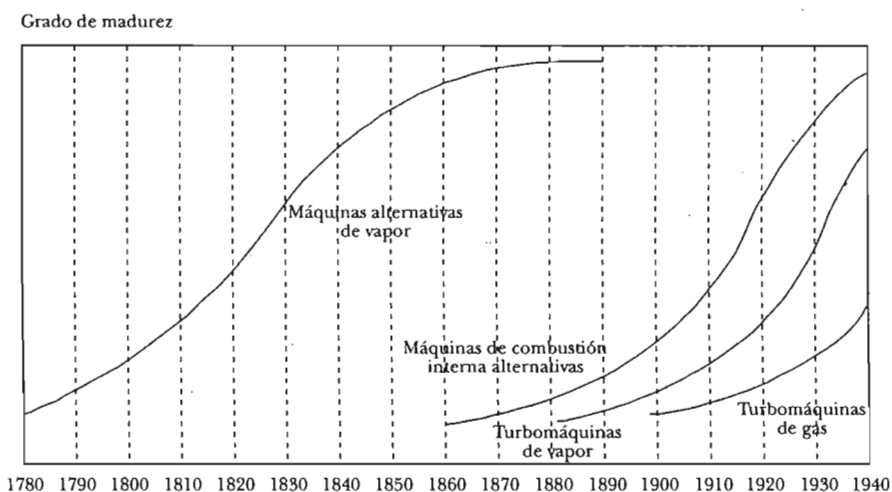
En el gráfico 1.1 se ha intentado dibujar una instantánea de la evolución de las cuatro trayectorias tecnológicas principales de las máquinas térmicas entre 1780 y 1940. Como puede observarse, el ciclo de las máquinas de vapor alternativas comenzó a declinar a la vez que se desarrollaban los nuevos especímenes realmente eficientes de máquinas de combustión interna, campo entrando en fase de madurez al finalizar el período citado. Algo similar ocurre con las turbinas de vapor, que empezaron a desarrollarse en las últimas

¹² *Mejoras en motores de gas*: UKPO, Patente 3.045 A. D., 1878 y USPTO, Patente 230.470. En España registró un motor mejorado en 1881 (OEPM, Patente 2.027).

¹³ *Procedimiento para producir trabajo motor por la combustión de combustibles*. Registrado en Alemania (DPMA, Patente 67.207), Francia (INPI, Patente 220.903), Reino Unido (UKPO, Patente 7.241 A. D., 1892) y Estados Unidos (USPTO, Patente 542.846). En España la primera patente la registró dos años después, en 1894 (OEPM, Patente 16.654).

¹⁴ Hay que mencionar un antecedente de este sistema desarrollado por Daimler en 1884, cuando registró una patente por un motor de autoencendido en el que proponía la compresión de toda la mezcla (no del aire como haría Diesel). DPMA, Patente 28.022; USPTO, Patente 313.922, y OEPM, Patente 4.410 por *Innovaciones en los motores a fuerza de gases combustibles de todas clases*.

GRÁFICO 1.1: Representación mediante curvas *S-Shape* de las trayectorias tecnológicas principales de las máquinas térmicas (1780-1940)



Fuente: Elaboración propia según el concepto de trayectoria tecnológica de Dosi (1982).

décadas del siglo XIX y cuyo recorrido técnico se ha extendido durante todo el novecientos. El principio general de este tipo de turbomáquinas es emplear la fuerza del vapor para mover los álabes de una turbina y generar así trabajo útil, cuestión que puede encontrarse ya planteada a partir de 1850 en algunos documentos de patentes,¹⁵ pero que no se logró implementar eficazmente en la práctica hasta 1884, cuando el ingeniero británico Charles Algernon Parsons diseñó una turbina de reacción a vapor¹⁶ en la que se fraccionaba la caída de presión logrando una expansión continua en una serie de coronas fijas y otras móviles dispuestas alternativamente (v. Dumas, Guéron, Herbéa, Moïse, y Payen 1978, 89-91, y Parsons, Eng, y Mech 1986, 21-58). Desde un principio, Parsons concibió la turbina como motor de un generador eléctrico, lo que nos adelanta el

¹⁵ Véase el punto 1.5 de este capítulo, párrafo 6.

¹⁶ Parsons registró inicialmente dos patentes, la primera por *Mejoras en generadores eléctricos y en su funcionamiento por medio de la presión de fluidos* (UKPO, Patente 6.734 A. D., 1884) y la segunda por *Mejoras en turbinas accionadas por la presión de fluidos* (UKPO, Patente 6735 A. D., 1884). En España registró sus primeras patentes sobre este tipo de turbinas, generadores y sus mejoras en 1888 (OEPM, Patentes 8.898 y 8.901). Sobre el funcionamiento de las turbinas a vapor en general véase Muñoz Torralbo, Valdés, y Muñoz (2001).

principal uso de este tipo de máquinas térmicas y su importancia para la producción y extensión de la electricidad, aunque el propio Parsons registró patentes de su invento adaptado a la propulsión de barcos.¹⁷

Prácticamente al mismo tiempo, entre 1883 y 1888, el ingeniero sueco Carl Gustaf Patrik De Laval desarrolló el otro hito fundamental en esta línea técnica: una turbina de acción alimentada por una tobera convergente-divergente que optimizaba las condiciones de salida del vapor y lograba convertir casi toda su presión en velocidad.¹⁸ Las aplicaciones de las turbinas de acción eran las mismas que las de reacción, incluida la propulsión naval,¹⁹ y también Parsons investigó sobre este tipo de sistemas.²⁰ El desarrollo básico de las turbinas de vapor terminó con los diseños del ingeniero francés Auguste Camille Edmond Rateau, del norteamericano Charles Gordon Curtis y del sueco F. Ljungström. El primero combinó, entre 1897 y 1901, avances de los dos tipos anteriores de turbinas (reacción y acción) en las llamadas *multicelulares de acción*, que, si bien son de esta clase, están compuestas de varias etapas con caídas de presión en cada una de ellas, como sucede en las de reacción.²¹ Por su parte, Curtis inventó, en 1896, una turbina más sencilla que las anteriores pero de menor rendimiento, en la que, en vez de producirse una caída de presión en cada etapa, buscaba una disminución en la velocidad del vapor según éste evolucionaba.²² Y, por último, Ljungström desarrolló, a partir de 1907, una turbina radial de reacción en la que el vapor evolucionaba en coronas concéntricas de álabes (Daumas, Guéron, Herbéa, Moïse, y Payen 1978, 95-96).

¹⁷ Por ejemplo, OEPM, Patente 22.488 de 1898, por *Mejoras en turbinas de vapor para la marina*.

¹⁸ Registrada al menos en Bélgica (*Office de la Propriété Industrielle* [OPI], Patente 83.196 de 1888), Reino Unido (UKPO, Patente 7.143 A. D., 1889) y Estados Unidos (USPTO, Patente, 522.066 de 1889) como *Turbina de vapor*. En España la primera patente relacionada con su turbina es de 1892 (OEPM, Patente 13.592) por *Instalación de paletas en turbinas de vapor o de gas*.

¹⁹ Por ejemplo, en OEPM, Patente 46.527 de 1909, De Laval y Ernst Elis Fridolf Fagerström registran *Un sistema de turbo-motor reversible* con aplicación a la propulsión naval.

²⁰ En 1903 Parsons protegió en España unas *Mejoras en turbinas a vapor* que no eran otra cosa que una turbina de acción *de las de tipo Branca o De Laval en las que la expansión del vapor desde la presión inicial a la final se realiza en una sola fase* (OEPM, Patente 31.577).

²¹ En OEPM, Patente 27.896 de 1901 por *Nuevo sistema de turbina multicelular para vapor o para gas basada sobre el principio de acción*, encontramos descrito el invento de Rateau, que según él minimiza las fugas de vapor.

²² USPTO, Patentes 566.968 y 566.969 de 1896 por *Turbina de fluidos*.

La última trayectoria tecnológica importante reflejada en el gráfico 1.1 es la de las turbinas de gas, un tipo especial de turbomáquinas que se desarrolló realmente a partir de las décadas de los treinta y cuarenta del siglo pasado y que viene a ser, respecto a las turbinas de vapor, lo que los motores de combustión interna alternativos a las máquinas de vapor alternativas; es decir, un sistema donde el vapor de agua es sustituido por una mezcla de gases inflamables. Las turbinas de gas, consideradas como motor térmico, están compuestas por dos máquinas térmicas: una máquina generadora o turbocompresor y una máquina motora o turbina. Aunque la primera instalación de este tipo de plantas productoras de energía no se construyó hasta 1939, existen algunos antecedentes que se planteaban ya las bases tanto de los turbocompresores como de las propias turbinas de gas, pero, para llevarlos eficientemente a la práctica, iba a ser necesaria la convergencia tecnológica de otras áreas de conocimiento. Algunos han querido ver el origen remoto de las turbinas de gas en una patente de 1791 del inglés John Barber,²³ en la que se describía una máquina que, mediante la combustión de una mezcla de gases y aire —introducido mediante un compresor alternativo—, producía la expansión que movía un volante en forma de turbina y lograba trabajo mecánico (Cummins 1989, 52-54), pero las primeras tentativas de interés se remontan a finales del siglo XIX. Estos precedentes fueron la patente de 1872 del estadounidense George Bailey Brayton —quien propuso el ciclo termodinámico de las actuales turbinas de gas²⁴— y algunas propuestas de configuraciones mecánicas para llevar este ciclo a la práctica, entre las que destaca una patente del mencionado Curtis pedida en 1895 por un *Aparato para generar energía mecánica*²⁵ que incluía un compresor para el aire, otro para el combustible y una turbina en la que se expandían los gases tras la combustión.

A principios del siglo XX comenzaron a plantearse las primeras propuestas serias de turbocompresores destinados a la compresión previa del aire antes de la combustión de la mezcla gaseosa, cuestión que planteaba problemas aerodinámicos y de mecánica de flui-

²³ UKPO, Patente 1833, A. D., 1791.

²⁴ USPTO, Patente 125.166 por *Perfeccionamientos en motores de gas*, también registrada en el Reino Unido (UKPO, Patente 432, A. D., 1872).

²⁵ USPTO, Patente 635.919.

dos que aún no se habían resuelto²⁶ y que exigía materiales y aleaciones que resistieran los importantes esfuerzos mecánicos y térmicos a los que iban a estar sometidos y a los que la metalurgia de principios de siglo tampoco había llegado. No obstante, cabe destacar, por ejemplo, algunos diseños de sistemas de comprimir aire de Parsons²⁷ y de Rateau,²⁸ familiarizados ambos en el trabajo con turbinas de vapor, así como los desarrollos de una empresa, la Société des Etablissements Postel-Vinay, que planteaba el empleo inverso de una turbina para el proceso de compresión.²⁹ Respecto a las turbinas de gas propiamente dichas, también hay claros precedentes en los primeros años del novecientos, como los pioneros diseños del ingeniero noruego Aegidius Elling en 1903, para algunos la primera máquina de este tipo que produjo trabajo útil (Singh 2001 y Bolland, y Veer 2003), o la turbina fabricada en 1906 por los franceses René Armengaud y Charles Lemale, quienes utilizaron un compresor centrífugo diseñado por Rateau, construido por *Brown Boveri* y accionado por una turbina Curtis (Muñoz Torralbo, Valdés, y Muñoz 2001, xv).³⁰ Aunque se patentaron otros diseños como los de los suizos Pierre Rambal (1905) y Benjamin Graemiger (1913), el alemán Paul Klötzer (1905) o los franceses Louis Paturel y Perre Lapertot (1913)³¹ tuvieron que pasar casi 20 años hasta que el inglés Frank Whittle inventase, en 1930, un verdadero turborreactor,³² del que derivarían los primeros propulsores aeronáuticos a reacción

²⁶ Por ejemplo, en 1904 Ludwig Prandtl desarrolló la teoría de la capa límite, que iba a revolucionar la mecánica de fluidos.

²⁷ OEPM, Patente 28.254 de 1901 por *Perfeccionamientos en compresores y bombas rotatorias* y OEPM, Patente 36.583 de 1905 por *Perfeccionamientos en compresores, bombas y aparatos análogos del tipo turbina*.

²⁸ OEPM, Patente 40.613 por *Perfeccionamientos en compresores-ventiladores multicelulares* y OEPM, Patente 40.926 por *Perfeccionamientos en los turboventiladores de alta presión*; ambas de 1907.

²⁹ OEPM, Patente 32.546 de 1905 por *Un procedimiento para la compresión del aire u otros fluidos elásticos*.

³⁰ En España Lemale registró dos patentes en 1903 por *Un turbo-motor de combustión interna* (OEPM, Patentes 31.262 y 32.836).

³¹ Rambal registró *Una turbina de gas que funciona con vacío para gases de combustión de materias combustibles cualesquiera* (OEPM, Patente 36.025); Klötzer, unas *Mejoras introducidas en las turbinas de explosión* (OEPM, Patente 36.098); Graemiger, una *Turbina de explosión de gas con uno o más compresores de pistón* (OEPM, Patente 54.734), y Paturel y Lapertot, una *Turbina a gas de combustión interna* (OEPM, Patente 56.769).

³² UKPO, Patente 347.206 (1930) por *Mejoras relativas a la propulsión de aeronaves y otros vehículos*.

(Meher-Homji 1998). El trabajo de Whittle abría una nueva etapa en el desarrollo de las turbinas de gas en general, y de los turbo-reactores en particular, que culminaría, mediante la convergencia de los nuevos avances de la aerodinámica y la metalurgia, en la eclosión ascendente de esta línea técnica. Durante la década de los treinta el trabajo de los ingenieros Claude Seippel, Georges Darrieus, Jean von Freudenreich, Kurt Niehus, Hans Pfenninger y Willy Burger fraguó en la construcción de la primera turbina de gas industrial aplicada a la generación eléctrica, dispositivo que construyó Brown Boveri and Co. y que se instaló en Neuchâtel (Suiza) en 1939 (v. The American Society of Mechanical Engineers 1988).

1.3. Mecánica de los procesos de innovación y cambio técnico

No es el objeto central de esta investigación hacer un repaso exhaustivo de la literatura sobre la teoría del cambio tecnológico, sobre todo porque pueden encontrarse excelentes sistematizaciones en las que se ofrecen síntesis muy completas, desde las primeras aportaciones de Schumpeter a la eclosión de las teorías evolutivas de Nelson y Winter o Dosi y Freeman, pasando por los modelos neoclásicos de Abramovitz y Solow o por los siempre imprescindibles trabajos de Rosenberg (Vegara 1989; López García 1997, 86-100; Andersen 2001, 1-2, 9-15). No obstante, sí es conveniente aclarar algunas cuestiones básicas sobre el marco de análisis en el que intentamos estudiar la evolución de las máquinas térmicas, para definir y hacer más comprensible nuestro propósito. Y es que, si bien la relación entre el cambio técnico y el crecimiento económico fue intuida ya desde principios del siglo pasado, durante mucho tiempo la tecnología fue considerada exclusivamente un problema de *oferta* y un factor exógeno a la propia economía regido por sus propias leyes y del que cabía estudiar sus efectos económicos; bajo este *paradigma* se desarrollaron los trabajos de Wolf sobre los límites del progreso tecnológico (López García 1997, 86-89), los de Kuznets (1930a y 1930b) y Schumpeter (1939) sobre los ciclos de innovación y crecimiento económico y prácticamente toda la teoría neoclásica basada en el equilibrio general, como los modelos

de Abramovitz (1956) y Solow (1957). El enfoque *schumpeteriano* fue el predominante, lo que contribuyó a resaltar y estudiar el papel de las grandes invenciones radicales —*macroinvenciones* desde la óptica de Mokyr (1993)— como la parte esencial de los procesos de innovación y, por tanto, del crecimiento.

Sin embargo, a partir de la década de los sesenta del siglo xx el cambio tecnológico comenzó también a estudiarse desde el lado de la *demanda*, lo que suponía el inicio del proceso de endogeneización de la tecnología y un creciente interés del análisis económico por su estudio. El cambio de rumbo lo provocaron, en primer lugar, los trabajos de Schmookler que demostraron, empíricamente, cómo la actividad inventiva seguía al crecimiento económico y a la producción y no al revés (Schmookler 1962, 1-2; 1966; 1972, II, a), algo que fue matizado y desarrollado por Rosenberg en la década siguiente, quien reconocía la importancia de las fuerzas de la *demanda* en el estímulo del desarrollo tecnológico, pero resaltaba también el papel de las dinámicas por el lado de la *oferta*, puesto que el cambio técnico era dirigido en determinadas direcciones y no en otras (Rosenberg 1976, 285-304; 1982; Mokyr 1977, 981-1008).³³ En todo caso, la tecnología pasaba a concebirse como un factor claramente endógeno que era necesario investigar y comprender dentro del entorno económico y social en el que se generaba y difundía. Además de las innovaciones radicales y de los cambios abruptos, por tanto, ahora se demostraba la importancia sobre el crecimiento económico de las invenciones incrementales —lo que Mokyr (1993, 369) denominó *microinvenciones*— y de los procesos de innovación graduales y acumulativos. Nelson y Winter (1977 y 1982) sistematizaron el nuevo pensamiento en un modelo general de crecimiento evolutivo en el que completaban las ideas de Rosenberg y en el que la tecnología, las organizaciones y las capacidades empresariales evolucionan incremental, gradual y conjuntamente y siguiendo sendas concretas, *dependencia de las trayectorias*, especialmente estudiada y formulada por David, quien resalta la fuerza de la Historia y de las decisiones del pasado sobre la tecnología

³³ Mokyr coincidía también con Rosenberg en que la demanda no podía explicar por sí sola la actividad inventiva.

y sobre los hechos económicos en general (v. David 1975, 1985, 1986, 1988a, 1988b).⁵⁴

A lo largo de las décadas de los ochenta y noventa ha continuado el desarrollo de este enfoque hacia visiones que sintetizan lo mejor de ambas tradiciones, pero sin abandonar la concepción endógena del cambio técnico, como sucede en los trabajos de Dosi (1982; 1984, 2.2; 1988), quien desarrolló la idea de la existencia de esquemas o *paradigmas tecnológicos* formados por principios científicos concretos, reglas de formación y adquisición del conocimiento y sistemas de apropiación de las innovaciones, que regirían y limitarían las *trayectorias tecnológicas*, es decir, la evolución de los procesos de innovación incremental de una tecnología desde su introducción radical con la apertura del paradigma hasta su madurez final y estancamiento.⁵⁵ Freeman (1987), por su parte, introdujo el pensamiento vebleniano en el cambio técnico, el cual debería ser analizado junto con las instituciones, las empresas, el sistema educativo, la política científico-técnica y el entorno social en el que se produce y por el que está determinado, es decir, en el marco de los *sistemas de innovación*. Freeman, Clark, y Soete (1982) o Pérez (2004), entre otros, han hecho crecer la complejidad del asunto al considerar también que paradigmas y trayectorias no se desarrollan aislados sino en *sistemas tecnológicos* o constelaciones de innovaciones, técnica y económicamente relacionadas, y que estos sistemas evolucionan, a su vez, guiados por *paradigmas tecno-económicos* o *estilos tecnológicos*, que configuran ondas largas de crecimiento económico y cuyos cambios constituirían *revoluciones tecnológicas* que trastocarían el ciclo y exigirían nuevos modelos socio-institucionales para volver a la fase positiva (Freeman, y Pérez 1988). El cóctel de la economía evolutiva se complica aún más si se tiene en cuenta que su objeto de estudio se ha extendido también a la empresa como unidad de análisis, que, en vez de ser considerada a la manera ortodoxa, sólo como una función de producción o como una *ficción legal* para establecer relaciones contractuales entre los individuos, se en-

⁵⁴ David llega a proponer una taxonomía de los hechos económicos en función del peso que la Historia tenga en ellos, una «Economía Histórica», es decir, una ciencia que tenga como componente fundamental la dimensión histórica de los hechos que estudia.

⁵⁵ Una trayectoria tendría cuatro fases: la introducción del paradigma, el crecimiento rápido de las innovaciones, el crecimiento lento y la madurez final.

tiende y estudia como centro de acumulación de capacidades y conocimientos (entre ellos los tecnológicos) que dependen de *rutinas* organizativas y de la propia *trayectoria* e historia de la empresa, capaz de aprender o adaptarse al entorno.³⁶

En el esbozo básico que hemos hecho sobre los paradigmas y trayectorias de las máquinas térmicas, así como en la ilustración con las curvas *S-Shaped* del punto anterior, puede intuirse ya cuál es la óptica adoptada en este trabajo. Creemos que el bagaje teórico de la economía evolutiva es muy adecuado para analizar los fenómenos tanto de creación como de difusión de una tecnología de amplio espectro o *adaptabilidad*,³⁷ como son los motores térmicos, y que puede ayudarnos a entender los mecanismos de innovación que rigen en el progreso técnico. Pensamos, asimismo, que las instituciones, el carácter de los *sistemas de innovación* y las capacidades empresariales de cada nación han jugado un papel fundamental, ya no sólo en la dirección de la actividad innovadora en este tipo de tecnologías, sino en su propia existencia. Somos conscientes de que todo ello genera un sistema complejo y dinámico donde múltiples factores coevolucionan a la vez (tecnología, instituciones, sectores industriales, empresas...), pero frente al que nos es necesario optar por un método de ataque más simple. Dado que opinamos que las innovaciones en el sector técnico fueron fácilmente apropiables mediante los sistemas de protección industrial, hemos acudido a un estudio detallado y sistemático de la información tecnológica contenida en los sistemas de patentes, con especial énfasis en el caso español. La idea es aportar alguna evidencia empírica sobre la evolución de paradigmas y trayectorias, algo que suele escasear entre los teóricos del cambio tecnológico más allá de ejemplos inductivos y descriptivos sobre determinadas técnicas. Kuznets (1940, 260-271) utilizó en su análisis el sistema de patentes y criticó abiertamente a Schumpeter arguyendo que su planteamiento teórico no coincidía con la evidencia estadística; Schmookler (1962, 1-2; 1966; 1972, II, a) hizo lo mismo al estudiar en profundidad la evolución de las patentes nortea-

³⁶ Sobre la evolución de la historia empresarial y sus tendencias véase López y Valdaliso (1997a, 30-35; 2000a; 2000b, 49-60).

³⁷ En el sentido de Keirstead (1948) de expansión de una tecnología por numerosos sectores e industrias donde evoluciona.

mericanas para demostrar la influencia del crecimiento económico sobre la dirección de la actividad inventiva; más recientemente, Andersen (2001) destaca la falta de empirismo de los teóricos evolutivos y utiliza el *stock* acumulado de patentes entre 1890 y 1990 para buscar evidencias sobre trayectorias y paradigmas y sobre las dinámicas de los sistemas tecnológicos y grupos empresariales logrando interesantes resultados.

Sabemos que utilizar las patentes como fuente no está exento de problemas, pues el grado de apropiabilidad de las innovaciones es distinto en cada sector y puede que diferente en cada país, por no hablar de la existencia de innovaciones no patentadas y otra serie de cuestiones que hemos expuesto en anteriores trabajos (Saiz 1999a, 28-29, 100-103; 1999b, 266-267),³⁸ pero, en general, como también hemos defendido constantemente —lo mismo que otros muchos autores (Schmookler 1966, 56; Cantwell 1989, 21-25; Andersen 2001, II)—, son una de las fuentes más completas y de amplio espectro sectorial e internacional de las que podemos disponer, claramente ventajosa como indicador tecnológico y económico sobre cualquier otra a la hora de acometer estudios generales (gastos en I + D, bibliometría, etc.). En este trabajo, además, no sólo se han usado las series agregadas de patentes sino que, una vez localizados y analizados estadísticamente los registros relacionados con motores térmicos, se han estudiado durante cuatro años cada una de las memorias descriptivas de las invenciones propuestas para averiguar, entre otras cosas, su viabilidad y su grado de impacto sobre el estado de la técnica del momento, labor en la que el ingeniero industrial Amengual (2004) ha basado la redacción de su tesis doctoral.³⁹ La investigación se ha realizado sobre 1.300 patentes presentadas en España, pero, dado el carácter de país atrasado y seguidor, se ha acudido, en el caso de las invenciones radicales, a la consulta de la documentación norteamericana, inglesa, francesa y alemana. En todo caso, al

³⁸ Sobre los problemas y ventajas de las patentes como indicador económico en general véase Griliches (1990).

³⁹ La tesis fue codirigida por Manuel Valdés (Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid) y Saiz (Departamento de Análisis Económico: Teoría Económica e Historia Económica de la Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales de la Universidad Autónoma de Madrid).

utilizar el sistema español de propiedad industrial como fuente, se pretendía averiguar si éste era válido para conocer la trayectoria general de una tecnología, cosa que se ha confirmado y que ha permitido, además, rastrear cuáles fueron las estrategias de protección internacional seguidas por los pioneros o cuál ha sido el nivel de participación de la actividad inventiva nacional en el sector. Una de las cuestiones más interesantes hubiese sido comparar las trayectorias de las máquinas térmicas reflejadas en el sistema español de patentes con las acontecidas en otros países, algo que no hemos podido realizar simplemente porque no hemos encontrado ningún estudio internacional similar que se haya planteado el análisis técnico detallado, patente a patente, de todo un sector técnico.

La última cuestión que debemos resaltar es cómo se usa en este trabajo el vocabulario desarrollado por la teoría económica evolutiva del cambio tecnológico, dado que, según hemos observado en los ejemplos descriptivos que suele citar la literatura, a veces se utilizan los mismos conceptos para diferentes niveles de análisis lo que, en ocasiones, induce a cierta confusión. Por otro lado, al estudiar un sector técnico concreto —y no un *sistema tecnológico*, compuesto, como sabemos, por múltiples innovaciones relacionadas en distintos sectores productivos—, a veces necesitaríamos nuevos términos para designar ciertas realidades. Es el caso de lo que hemos llamado *axioma tecnológico*, que representaría el conjunto de leyes científicas y práctica técnica que rige la evolución de las máquinas térmicas en general; axioma porque, aunque en el futuro desaparezcan y se desarrollen otras maneras de producir trabajo útil en *sistemas tecnológicos* radicalmente distintos y en *paradigmas tecno-económicos* revolucionarios, los principios generales de la termodinámica permanecerían invariables. Ese axioma de los motores térmicos también tendría una *trayectoria científico-técnica* y, sobre todo, sería el eje por el que discurrirían los cuatro grandes *paradigmas tecnológicos* en cuyo origen se sitúan ciertas invenciones que vamos a entender como *radicales* y que evolucionan incrementalmente en *trayectorias tecnológicas* largas, bastante bien definidas y que ya hemos citado en nuestro esbozo: las máquinas alternativas de vapor, los motores de combustión interna alternativos, las turbinas de vapor y las turbinas de gas.

Cada una de estas trayectorias puede tener, a su vez, distintas *bifurcaciones*, *sendas* o *rutas tecnológicas* constituidas por tecnologías

diferenciadas que, en todo caso, no se apartarían de los límites del paradigma original excepto que se produzcan *mutaciones* que supongan saltos cualitativos importantes y apertura de nuevos paradigmas. Es necesario tener muy en cuenta el nivel de análisis en el que nos situamos, porque, si éste cambia, la significación de los términos lo hace con él. Así, por ejemplo, si descendiésemos un nivel y el enfoque se limitase a los motores de combustión interna alternativos, las distintas sendas que lo forman (ciclo Otto, ciclo diésel, ciclo de dos tiempos) podrían quizá estudiarse como *paradigmas* con una *trayectoria* diferenciada y, así, hasta niveles más y más detallados de análisis técnico. Y al revés: si subiésemos un nivel en el enfoque todo un *axioma* (las máquinas térmicas o las hidráulicas), podrían también ser estudiadas como grandes *paradigmas* con *trayectorias* particulares de las que partirían distintas *sendas*. Esto ya nos anuncia una cuestión interesante: lo que, en un nivel de análisis *micro*, podría ser tomado como *innovación radical*, en ciclos de largo plazo y niveles de estudio *macro*, podría llegar a ser considerado una *innovación incremental*,⁴⁰ puesto que la evolución de paradigmas y sistemas tecnológicos está encauzada en *direcciones* concretas, algo en lo que siempre ha insistido Rosenberg (1976; 1982; 2000, 25). Como resaltan López y Valdaliso (1997b, punto 3.2), el motor del Airbus, en el fondo, puede ser considerado un descendiente lejano de la máquina atmosférica de Newcomen. Pero, por otro lado, todo ello hace necesario definir claramente cuál es la aproximación que se utiliza en cada investigación, puesto que, aunque puedan manejarse los mismos conceptos para estudiar distintas realidades macro y micro, esto puede conducir a cierta distorsión, especialmente cuando se trata del análisis de la tecnología. Desde luego, sería prácticamente imposible llegar a una *tecnogenia* al estilo de la filogenia biológica, dadas las diferencias existentes entre la evolución natural y la artificial y la posibilidad, en esta última, de cruces incluso en *axiomas* completamente distintos, pero no estaría de más intentar una taxonomía tecnológica básica concebida para enmarcar los estudios históricos, algo que, por supuesto, queda fuera del objeto de este trabajo.

⁴⁰ Algo similar expone Pérez (2004, 223) respecto al conjunto de innovaciones de un *sistema tecnológico* que, si bien individualmente son radicales, dentro del sistema podrían ser consideradas como incrementales.

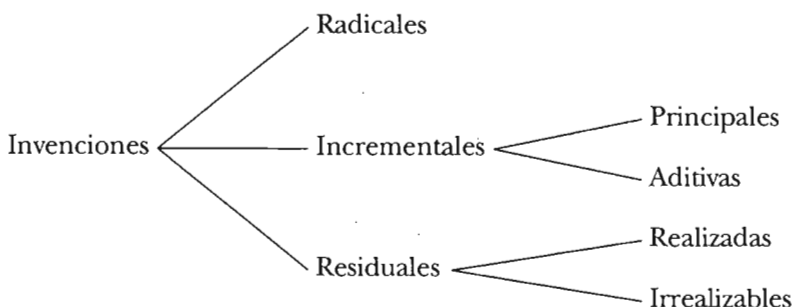
1.4. Innovaciones radicales versus innovaciones incrementales

Si, para Schumpeter (1939), lo económicamente importante eran las invenciones radicales, la *destrucción creativa* que abre los paradigmas, los neoschumpeterianos —como a muchos evolutivos les gusta denominarse— hacen tanto o más hincapié en la repercusión económica de las invenciones incrementales que se desarrollan a lo largo de una trayectoria. El mayor impacto de una tecnología sobre el crecimiento económico, por tanto, debería producirse durante el período de difusión de la misma, es decir, durante las trayectorias ascendentes del paradigma, fases que pueden durar décadas y que suelen ir acompañadas, además, de actividad inventiva complementaria que va perfeccionando, puliendo y haciendo eficiente la tecnología. Como ya hemos anunciado, en este trabajo se han analizado las descripciones y planos de las patentes registradas en España relacionadas con máquinas térmicas entre 1826 y 1914 (más algunas extranjeras) para constatar la aportación técnica real de cada invención e intentar averiguar cómo se articula en la práctica la división entre invenciones relevantes y menores. Para ello, además de la tradicional *Clasificación Internacional de Patentes* (OMPI 2000), se ha construido y utilizado un amplio nomenclátor específico que abarca todos los elementos constructivos de las máquinas térmicas en cada uno de los paradigmas.⁴¹ La primera consecuencia de la investigación ha sido la necesidad de ampliar la división teórica de la actividad inventiva para reflejar mejor la complejidad empírica del proceso de innovación.

Al estudiar la relevancia técnica de las ideas registradas se constata, efectivamente, que hay muy pocas invenciones *radicales* que abran trayectorias dentro del *axioma* y que se conviertan en las primeras realidades de los principios básicos que gobiernan los paradigmas (por ejemplo, las primeras aportaciones de Newcomen, Watt, Lenoir, Otto, Diesel, Parsons, Rateau, Curtis, Elling o Whittle). La mayor parte de las invenciones analizadas constituyen un «raci-

⁴¹ Dicho nomenclátor es demasiado largo para incluirlo aquí; puede consultarse en Amengual (2004, 35-39, 414-422).

ESQUEMA 1.1: Clasificación según el grado de relevancia técnica de las invenciones



Fuente: Amengual Matas (2004, 374).

mo» de avances menores y diversos dentro de la trayectoria, que, no obstante, podrían subdividirse en invenciones *incrementales* e invenciones *residuales*. Clasificamos las invenciones incrementales, a su vez, en *principales* y *aditivas*, según la complejidad técnica de las invenciones y el grado de impacto sobre el sector técnico. Las incrementales principales serían aquellas imprescindibles para perfeccionar la trayectoria y que, con el tiempo, abren rutas y sendas muy específicas, como, por ejemplo, sucede con los trenes de distribución, o los carburadores y sistemas de inyección de combustible. El propio condensador de Watt podría considerarse una invención incremental principal, aunque sus consecuencias sobre el posterior desarrollo de las máquinas alternativas de vapor fuesen radicales. En niveles de análisis *micro*, por tanto, las invenciones incrementales principales podrían dibujarse también en forma de trayectorias.⁴² Las invenciones incrementales aditivas serían aquellas que van constantemente perfeccionando las principales y cuya aportación novedosa consiste, básicamente, en hacerlas más y más eficientes. Son, en general, desarrollos predecibles en el largo plazo y claramente función de la demanda, igual que sucedería con lo que hemos llamado invenciones residuales. Lo que pasa es que estas últimas aportan poco o nada al estado de la técnica del paradigma, bien por tra-

⁴² Un análisis detallado de los diversos diseños de las máquinas de vapor antes de 1800 utilizando teoría de sistemas complejos resalta que el motor de Watt no debería ser considerado un sucesor lineal del de Newcomen, sino una ruta nueva que convive con aquél (Frenken, y Nuvolari 2004, 442).

tarse de ideas muy conocidas o cuestiones ínfimas sin novedad tangible (residuales realizadas), bien por constituir inventos absurdos o principios que violan el *axioma tecnológico* (residuales irrealizables). No obstante, desde un punto de vista económico, el análisis de la actividad residual también puede ser muy interesante para entender las características de un *sistema nacional de innovación*.

Como puede comprobarse en la primera columna del cuadro 1.1, entre 1826 y 1914 se han localizado en el archivo de la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM) 1.302 patentes que reivindican invenciones específicamente relacionadas con motores térmicos, lo que constituye apenas un 2% del total de patentes del período,⁴³ cifra alejada de la de países pioneros como el Reino Unido, donde, por ejemplo, ya entre 1711 y 1850 un 7% de los registros tenían que ver con máquinas alternativas de vapor (Sullivan 1990, 349-362). En España la mayoría de las invenciones registradas lo fueron dentro del paradigma de la combustión interna alternativa (incluyendo motores de aire caliente y compresores alternativos) pues, además de su creciente importancia, la mayor parte de la trayectoria ascendente coincide con el período estudiado (v. el gráfico 1. 1). El retraso en la organización de un sistema de protección industrial moderno —que no arranca de manera definitiva hasta 1826 (Saiz 1995)— y la propia debilidad política y económica española durante las primeras décadas del siglo XIX son la explicación de que sólo un 23% de las patentes sobre máquinas térmicas salvaguarden inventos relacionados con máquinas de vapor —el motor más importante durante el primer proceso de industrialización—, ya que gran parte de su trayectoria (fases de introducción y crecimiento rápido) se produjo antes de que España pusiese las bases del sistema de patentes y de un primer crecimiento industrial (muy basado, además, en la utilización de energía hidráulica).⁴⁴ De la misma ma-

⁴³ Sólo se han considerado aquellas invenciones que tienen algo que ver con el funcionamiento de las máquinas térmicas y no con otros aspectos relacionados como la calderería y producción de vapor. Tampoco se han considerado aquellas patentes que reivindican todo un conjunto de tecnologías en las que participa un motor térmico, como, por ejemplo, una «locomotora de vapor» o una «locomotora de turbinas», excepto que la invención fuese específicamente sobre la parte termodinámica, algo poco usual pues, si ése era el caso, solía registrarse de manera genérica para todo tipo de usos. Sobre las invenciones relacionadas con la propulsión ferroviaria mediante máquinas alternativas y turbinas, véase Cayón, Frax, Matilla, Muñoz, y Saiz (1998, 35-76).

⁴⁴ Sobre el complemento de la energía hidráulica, véase, por ejemplo, Nadal (2000b).

nera, las turbinas de vapor acaparan un 18,4% de los registros, pues, aunque el arranque y crecimiento de la trayectoria se produjo antes de 1914, parte de la misma continuó desarrollándose después de la Primera Guerra Mundial. En el caso de los turbocompresores y turbinas de gas, con sólo un 2,4% de las patentes, es evidente que el paradigma estaba naciendo en la instantánea que ofrecemos y que todavía faltaban inventos radicales que preparasen el ascenso de la trayectoria, algo que se producirá a partir de 1930.

CUADRO 1.1: Relevancia de las patentes sobre máquinas térmicas. España, 1826-1914 (porcentajes)

| | Patentes | Radicales e incrementales principales | Incrementales aditivas más residuales |
|--|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Máquinas alternativas de vapor | 23,2 | 4,3 | 95,7 |
| Máquinas de combustión interna alternativas* | 56,0 | 10,6 | 89,4 |
| Turbinas de vapor | 18,4 | 12,5 | 87,5 |
| Turbocompresores y turbinas de gas | 2,4 | — | — |
| Número de patentes | 1.302 | 120 | 1.151 |

* En las máquinas de combustión interna alternativa se incluyen los motores de aire caliente y los compresores alternativos.

Fuente: Amengual Matas (2004, tablas 5.1 y 5.11).

En el mismo cuadro también puede comprobarse que el índice de relevancia de las patentes registradas —que definimos como el porcentaje de patentes *radicales* más las *incrementales principales* dentro de cada paradigma, es decir, aquellas invenciones que abren la trayectoria y la van guiando y cuyo contenido aporta lo esencial para entender técnicamente el sector— se sitúa en torno a una media del 10%. Esto significa que prácticamente el 90% restante refleja actividad inversora e inventiva incremental aditiva, netamente endógena, guiada por la demanda y por la necesidad de perfeccionar dispositivos, romper cuellos de botella técnicos y aumentar la eficiencia, a lo que hay que sumar el ruido residual.⁴⁵ Por las razones expuestas en el párrafo anterior, el índice de relevancia en las má-

⁴⁵ Otros trabajos empíricos recientes apuntan en el mismo sentido. En Nuvolari (2004), por ejemplo, se destaca la importancia de las fuerzas incrementales en el

quinas de vapor alternativas es muy bajo (4,3%) puesto que los principales avances técnicos del paradigma ya se habían producido en el siglo XVIII y primeras décadas del XIX y no es posible encontrarlos registrados en España, como sucede, por ejemplo, con las invenciones de Newcomen o Watt (cuyo estudio técnico ha sido realizado a partir de las patentes inglesas).⁴⁶ No es así en el caso de los motores de combustión interna alternativos, donde casi todas las invenciones relevantes fueron presentadas en la Península prácticamente al mismo tiempo que en el resto de Europa (Amengual 2004, cap. 3: 265), lo mismo que sucede con las turbinas de vapor, en las que el 12,5% de patentes relevantes refleja la mayor presencia de este tipo de invenciones en el arranque y crecimiento rápido de la trayectoria y la falta de perspectiva para fechas posteriores a 1914.⁴⁷ Como se intuye, no es posible realizar este tipo de análisis con las turbinas de gas sin estudiar el sector hasta, al menos, 1950 o 1960.

En el cuadro 1.2 se ofrecen datos sobre la potencia generada por las invenciones radicales más importantes en el axioma de las máquinas térmicas junto al diámetro y carrera del pistón de las de movimiento alternativo, de cuya observación se desprende que las ideas verdaderamente novedosas, que abrían los paradigmas termodinámicos y caracterizaban sus trayectorias, llevaron aparejadas saltos cualitativos importantes frente a los diseños inmediatamente anteriores, bien en potencia entregada, bien en reducción de tamaño de la máquina. Por ejemplo, el condensador de Watt supuso un aumento de potencia de un orden de magnitud frente a las máquinas de Newcomen; el motor de combustión interna de Otto, aunque conseguía menos potencia, significó una gran reducción de tamaño respecto a las máquinas de vapor, mientras que el de diésel volvió a aumentar la potencia entregada de unidades de kilovatios a decenas para el mismo tamaño. Algo similar ocurrió con las primeras inven-

desarrollo de la tecnología del vapor al estudiar lo sucedido en el distrito minero de Cornish, en Inglaterra, donde la suma de numerosos avances anónimos —que no se protegían mediante patente, sino que se revelaban y se compartían— condujeron a medio plazo a la mejora y aumento de eficiencia del motor.

⁴⁶ El análisis técnico del paradigma a partir de las patentes españolas se puede consultar en Amengual (2004, cap. 2).

⁴⁷ Al igual que sucedió con los motores de combustión interna, las principales invenciones de turbinas de vapor se registraron en España; véase Amengual (2004, cap. 4: 352).

CUADRO 1.2: Potencia proporcionada por las invenciones más relevantes sobre máquinas térmicas y algunos valores relacionados con su dimensión, 1712-1939

| | Año | Potencia (kW) | Diámetro del pistón (cm) | Carrera del pistón (cm) |
|-----------------------|------|---------------|--------------------------|-------------------------|
| Newcomen | 1712 | 4,1 | 53,3 | 233,8 |
| Watt | 1769 | 12,7 | 127,0 | 96,5 |
| Lenoir | 1860 | 1,0 | — | — |
| Otto | 1876 | 2,3 | 16,1 | 30,0 |
| Diesel | 1897 | 13,3 | 25,0 | 40,0 |
| Parsons | 1890 | 350 | — | — |
| Curtis | 1900 | 500 | — | — |
| Rateau | 1901 | 220 | — | — |
| Turbina gas Neuchâtel | 1939 | 4.000 | — | — |

Fuente: Amengual Matas (2004, 373, tablas 5.9 y 5.10).

ciones de turbinas de vapor, cuya potencia crecía en otro orden de magnitud frente a los motores de combustión interna (aumentando también sus dimensiones) y con los inicios de las turbinas de gas, cuyos primeras disposiciones conseguían, de nuevo, pasar de una producción de centenas de kilovatios a millares. En general, con cada innovación radical, se lograba aumentar de golpe la *potencia específica*, valor obtenido de la potencia suministrada por la máquina con relación a su unidad de masa. No cabe duda de que también el recorrido progresivo de las innovaciones incrementales (principales y aditivas) a lo largo de las distintas trayectorias abiertas supuso un aumento de la eficiencia técnica de los paradigmas originales —a veces tanto o más importante en términos de potencia, peso o consumo de combustible que las invenciones radicales del sector—, pero la diferencia fundamental se halla en el tiempo, pues, mientras que las invenciones verdaderamente relevantes suponen saltos abruptos en lapsos cortos (mutaciones), los perfeccionamientos incrementales se producen de manera más lenta a lo largo de décadas de mejora hasta que los límites del paradigma les conduce a rendimientos decrecientes (la conocida Ley de Wolf).⁴⁸

⁴⁸ Ley del límite del desarrollo tecno-económico o Ley de Wolf: véase López García (1997, 87); también Freeman, Clark, y Soete (1982).

En definitiva, el estudio técnico de las patentes solicitadas en un país atrasado como España parece mostrarse bastante válido para seguir la evolución básica de los paradigmas relacionados con las máquinas térmicas, a pesar de que el período analizado deja fuera de la imagen, lógicamente, las primeras invenciones de máquinas de vapor, así como el desarrollo de las turbinas de gas. En todo caso, se percibe y constata con claridad la doble tendencia del progreso tecnológico en el sector, que evolucionaría por medio de cambios ciertamente abruptos —innovaciones radicales con las que se producen avances cualitativos y la apertura de nuevos paradigmas— y de manera gradual y progresiva a través del desarrollo largo y continuo de las trayectorias hasta su madurez. Ambas cuestiones tienen gran importancia sobre el crecimiento económico, pero, de las dos fuerzas, parece que es la evolución gradual y progresiva —acompañada de la difusión de la tecnología— la que más repercute sobre la actividad productiva y el desarrollo, puesto que es la que más esfuerzo inversor requiere (algo de lo que es un buen índice el número de patentes incrementales registradas) y la que acaba provocando la adaptación económica y la extensión social de las nuevas técnicas. Incluso, si elevásemos el nivel de análisis al *axioma tecnológico*, a la producción de trabajo útil a partir de los principios de la termodinámica, puede que las rupturas y la aparición de los paradigmas descritos no sean procesos tan discontinuos como en un principio podría parecer o, por lo menos, puede que la evolución de sus trayectorias responda a cierta lógica de concatenación.

1.5. Evolución tecnológica de los motores térmicos y dependencia de las trayectorias

Los cambios verdaderamente radicales rara vez se producen mediante la evolución gradual y continua de una trayectoria (Pérez 2004, 221) —es decir, es muy difícil que, a partir de perfeccionamientos e innovaciones pequeñas e incrementales de la máquina de vapor alternativa, se acabe en el motor de combustión—, sino que los saltos abruptos son consecuencia, sobre todo, de *mutaciones* que implican cierto alejamiento de la trayectoria original y nuevos conocimientos científicos y técnicos distintos a los existentes. Pero, aun así, tampon-

co es usual que una mutación dé lugar a *axiomas tecnológicos* completamente nuevos —es difícil, otra vez, que, a partir de una variación radical en motores térmicos, lleguemos, por ejemplo, a la pila de combustible o a la energía nuclear— y es mucho más lógico y normal que las mutaciones conduzcan a paradigmas y trayectorias distintas dentro del mismo *axioma*, en el que, de esta manera y en cierta medida y sentido, se producirían fenómenos de dependencia de la trayectoria madre (*path-dependency*) y procesos de acumulación de conocimientos que apuntarían en una dirección concreta y no en otras.⁴⁹ Las mutaciones, por tanto, aunque introduzcan discontinuidad, necesitan de lo que podríamos llamar *trampolines de conocimiento* en la trayectoria original.

Todo esto sitúa incluso a los cambios que nos parecen abruptos dentro de una lógica evolutiva de crecimiento endógeno en la que es realmente difícil constatar, por el lado de la oferta, la generación espontánea de tecnologías totalmente nuevas sin ningún tipo de antecedente. De este modo, en la evolución natural de una trayectoria en un paradigma concreto, se producirían, por un lado, constantes *variaciones o bifurcaciones* que abrirían distintas *sendas o rutas tecnológicas* y, por otro —y de manera más lenta y concentrada en el tiempo— *mutaciones* o saltos cualitativos que generarían nuevos *paradigmas y trayectorias*. Las *sendas* pueden acabar extinguiéndose o realimentando y extendiendo la trayectoria original en el futuro (López García 1997, 107-109 y figura 3.2), como sucedería en nuestro caso, dentro del paradigma del motor de combustión interna alternativo, con las distintas rutas establecidas por los motores de gas tipo Lenoir, los ciclos Otto y Diesel, el ciclo de dos tiempos tipo Clerk, híbridos de alguno de ellos (diésel de dos tiempos) o incluso con ciertas invenciones *incrementales principales* que abren líneas de investigación que reforzarán la trayectoria (los primeros carburadores, sistemas de inyección o de formación de mezcla, etcétera). De igual manera, las *mutaciones* pueden conducir a callejones sin salida y a la extinción de la nueva tecnología (por ejemplo, los motores de

⁴⁹ Véase, por ejemplo, el capítulo 2 de Basalla (1990) dedicado a la continuidad y discontinuidad en el cambio tecnológico. Sobre la importancia de la imitación y la actividad incremental y gradual, véase, en general, Rosenberg (1976; 1982; 2000, 62, 78).

aire caliente) o al éxito y desarrollo de nuevos *paradigmas* que re-fuerzan el *axioma tecnológico*.⁵⁰ El referido estudio técnico de todas las patentes sobre máquinas térmicas registradas en España (más algunas radicales extranjeras) nos ha permitido acercarnos a esta *irradiación* de paradigmas en el axioma, así como a las posibles concatenaciones entre las trayectorias,⁵¹ algo que demuestra tener gran complejidad casi desde el inicio del paradigma original de los motores alternativos de vapor, pues, a las mutaciones que anteceden y conducen a otras trayectorias, habría que sumar las continuas bifurcaciones dentro de cada paradigma e, incluso, los cruces horizontales de innovaciones incrementales principales de una trayectoria a otra.

Si partimos del esbozo general expuesto en el segundo punto de este trabajo, recordaremos que hay que buscar los primeros cimientos de las operaciones con la fuerza expansiva del vapor en los trabajos del español Ayanz, del inglés Savery y del francés Papin a lo largo del siglo xvii y principios del xviii. Según García Tapia (2001, 222-223), los conocimientos de Ayanz pudieron llegar hasta Savery a través de la obra de Edward Somerset, marqués de Worcester,⁵² y, sin duda, Newcomen trabajó sobre la máquina de Savery y puede que conociera los logros de Papin. El ingenio atmosférico de Newcomen que revolucionó la trayectoria y que se convirtió en el primer

⁵⁰ De nuevo, la definición del vocabulario utilizado y de los niveles de análisis se torna imprescindible. López y Valdaliso (1997b, puntos 3.1, 3.2), por ejemplo, en un trabajo sobre cómo se acercan las economías atrasadas a las innovadoras, hablan de *trenza de trayectorias* evolucionando en una *trayectoria general* (que viene a ser lo mismo que lo que nosotros llamamos *axioma*) donde constantemente se producirían bifurcaciones que, o bien realimentan la trayectoria original, o bien generan otras nuevas o híbridos de ambas, cuestión que describen, precisamente, con la evolución de los motores térmicos. De la misma manera, las pruebas empíricas de su modelo sobre los *niveles de acercamiento tecnológico* se realizan en lo que denominan *paradigma del motor diésel marino* (en nuestro nivel de análisis una ruta o senda sectorial del paradigma de los motores de combustión interna alternativos). Aunque dicho trabajo no esté publicado a la hora de redactar este texto y no hayamos podido analizar los gráficos y figuras que lo componen, su lectura nos ha parecido del máximo interés y queremos agradecer la amabilidad de sus autores al facilitárnoslo.

⁵¹ El ejercicio no es nuevo, aunque sí busca el empirismo fruto del análisis técnico de las patentes. Un intento de conectar distintos motores térmicos (vapor y combustión) puede verse en Basalla (1990, 52-57). Una concatenación de trayectorias desde el vapor y la combustión a las turbomáquinas está en López y Valdaliso (1997b, punto 3.2).

⁵² El marqués de Worcester publicó en 1663 la obra *A Century of the Names and Scantlings of Such Inventions* en la que exponía los posibles usos del vapor de agua.

motor de vapor, por tanto, se sitúa en una línea de acumulación de conocimiento previo que apuntaba en una dirección concreta. De hecho, Newcomen no pudo registrar y proteger su máquina debido a la existencia de la patente previa de Savery. Asimismo, el condensador y la máquina de doble efecto de Watt, aunque con consecuencias radicales, no fueron más que grandes perfeccionamientos y bifurcaciones de las máquinas de vapor desarrolladas en los 50 años anteriores que las hacían más y más eficientes y adaptables a nuevos nichos productivos, proceso que continuaría produciéndose hasta bien avanzado el siglo XIX, como, por ejemplo, sucedió con el famoso sistema de distribución de G. H. Corliss.⁵³ Por otro lado, a finales del setecientos y principios del ochocientos ya pueden encontrarse preludios de las otras trayectorias del axioma. Como hemos visto, Papin ya había intentado quemar pólvora dentro de un cilindro para generar vacío y Barber había registrado en 1791 la idea de utilizar una mezcla de gas inflamable y aire comprimido para mover un volante en forma de turbina,⁵⁴ dos ideas todavía remotísimas de la combustión interna alternativa y de la turbina de gas.

Sin embargo, la primera mutación interesante no se produjo hasta 1816, cuando Stirling experimentó el empleo de aire caliente en lugar de vapor dentro de un cilindro, dando lugar a un nuevo dispositivo que, a pesar de ello, mantenía muchos elementos comunes con las máquinas de vapor, como el tren alternativo.⁵⁵ El motor de Stirling era de ciclo cerrado, pero, en 1858, Ericsson diseñó un motor de ciclo abierto que continuó incorporando conocimientos y tecnologías del vapor, como el tren de la distribución para la admisión y escape del aire caliente y frío.⁵⁶ Por tanto, se estaba produciendo el nacimiento de un paradigma basado en la mezcla de conocimientos acumulados en la trayectoria de las máquinas alternativas de vapor con fundamentos físicos sobre la expansión del aire, cuya trayectoria tuvo un recorrido muy corto —a pesar de la disminución de tamaño y del aumento de eficiencia y potencia específica respecto al vapor— debido a que se convirtió en un *trampolín de conociemien-*

⁵³ USPTO, Patente 6.162 de 1849.

⁵⁴ Véase nota 23.

⁵⁵ Véase nota 6.

⁵⁶ Véase nota 8.

tos para una mutación más potente (el motor de explosión) que acabaría dando lugar, ahora sí, a un paradigma competidor de gran impacto. Las *máquinas de calórico*, como las denominaba el propio Ericsson, fueron progresivamente arrinconadas por la aparición de los motores de combustión interna que, frente a la combustión externa del vapor y del aire caliente, planteaban la inflamación de un gas combustible dentro del cilindro. El cambio radical se produjo por primera vez en 1860 con el motor de aire y gas de Lenoir,⁵⁷ que conseguía potencias específicas superiores a las del vapor o el aire caliente. Ignoramos si Beau de Rochas llegó a saber del motor de Lenoir cuando planteó, en 1862, el ciclo de cuatro tiempos,⁵⁸ pero es seguro que Otto lo conocía de sobra en 1876 cuando llevó a la práctica dicho ciclo en el que el gran avance consistió en comprimir la mezcla de aire y gas antes de la combustión.⁵⁹ Un dato poco conocido es que la patente alemana de Otto fue anulada, precisamente, al conocerse el documento francés de Beau de Rochas.⁶⁰ En todo caso, la máquina de Otto producía un nuevo salto en la potencia específica del motor térmico del que comenzaron bifurcaciones y nuevas rutas y sendas, como el motor de Clerk (1878) que propuso la variación hacia el ciclo de dos tiempos⁶¹ o las innovaciones de Diesel en 1892, quien desarrolló un sistema de alimentación en el que primero se comprimía sólo aire y después se introducía el combustible, con lo que se lograba la autoinflamación de esta mezcla.⁶²

En lugar de curvas *S-Shaped* entrelazadas, en el esquema 1.2 ofrecemos la concatenación de las trayectorias de los motores térmicos en la clásica forma de árbol familiar, en el que puede observarse cómo el origen último de todo el axioma proviene del siglo xvii (Ayanz, Savery y Papin) y cómo el tronco principal sobre el que se produce la irradiación de trayectorias es el de las máquinas alterna-

⁵⁷ Véase nota 9.

⁵⁸ Véase nota 10.

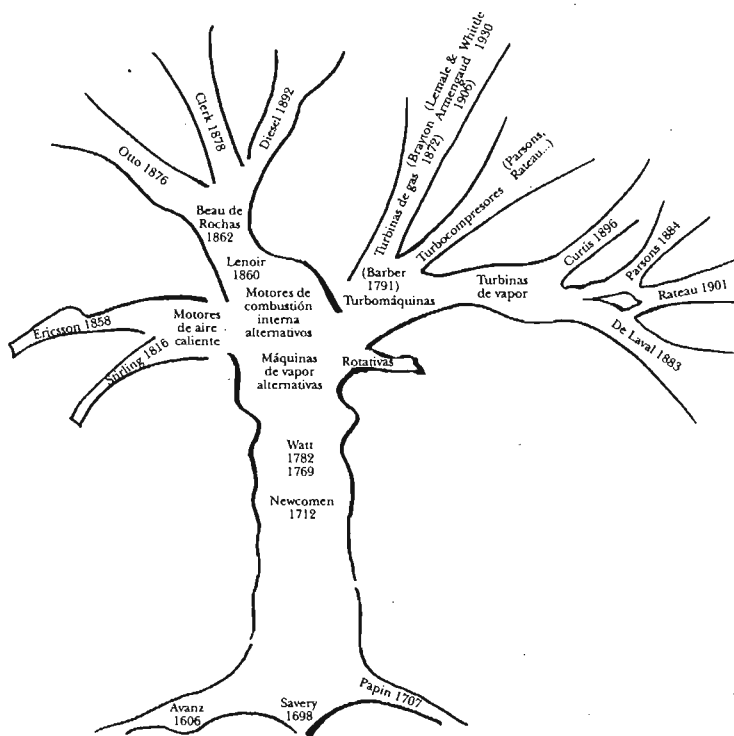
⁵⁹ Véase nota 11.

⁶⁰ La Asociación de Ingenieros Alemanes publicó en 1884 en la revista *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure* (vol. XXVIII, 12 enero 1884, 45-47) una carta de un representante de una empresa de motores en la que se daba a conocer el documento de Beau de Rochas. Con esta información los competidores de Otto lograron, en 1886, la nulidad de su patente alemana 532, solicitada en el año 1876 (Cummins 1989, 174).

⁶¹ Véase nota 12.

⁶² Véase nota 13.

ESQUEMA 1.2: Evolución de las máquinas térmicas, irradiación de paradigmas y apertura de nuevas trayectorias y oportunidades tecnológicas



Fuente: Amengual (2004, 385, figura 5.2).

tivas de vapor. A la izquierda se representan las mutaciones y bifurcaciones que acabamos de ver y que dan lugar a los motores de aire caliente, que se extinguen, y a los de combustión interna alternativos, que abren una nueva trayectoria con diferentes sendas. A la derecha representamos las otras irradiaciones que, en nuestra opinión, se produjeron también a partir de la acumulación de conocimientos en la trayectoria del vapor. Así, por ejemplo, desde muy pronto es posible encontrar casos de máquinas de vapor con pistón *rotativo*, en las que la fuerza expansiva a elevada presión y temperatura se empleaba para mover el pistón de manera circular, senda que podría ser considerada un *trampolín de conocimientos* entre las máquinas alternativas y las turbinas de vapor. Entre las patentes

registradas en la OEPM hay varios motores de este tipo, como el del maquinista Valentín Silvestre Fombuena⁶³ que registró y construyó en Madrid en 1858 un *sistema de cilindros de vapor con movimiento de rotación*⁶⁴ o el del ingeniero Traverdon y su socio Roulina quienes proponían, en 1878, un *motor de pistón oscilante* que tenía forma de *disco* y que, conceptualmente y según la descripción y los planos, se asemeja mucho a una turbina de vapor.⁶⁵ A lo largo de la segunda mitad del siglo XIX y primeros años del XX hay otros casos similares en los que se registraron desarrollos de pistones rotativos,⁶⁶ pero al igual que ocurrió con los motores de aire caliente esta ruta tecnológica se extinguió pronto, tanto por la competencia de las máquinas de combustión interna como por la evolución hacia el paradigma de las turbinas de vapor y el nuevo salto abrupto en potencia específica que se iba a producir.

Sin embargo, las experiencias descritas pudieron ser más aleccionadoras que otro tipo de antecedentes con los que habitualmente se trata de entroncar a las turbinas de vapor (v., por ejemplo, Basalla 1990, 44-45). Es cierto que, mucho antes de que aparecieran las máquinas de pistón rotativo, ya había habido intentos de aplicar la fuerza del vapor generado en una caldera a una rueda o turbina hidráulica con álabes, algo de lo que se puede encontrar antecedentes en el siglo XVII —en la máquina de 1629 del italiano Giovanni Branca, en la que el chorro de fluido movía una rueda⁶⁷ (García Tapia 2001, 222)— o incluso cientos de años antes, pues la idea entronca con las famosas y antiguas eolípilas⁶⁸ y los principios básicos de la acción y la reacción. Pero, aunque en el siglo XIX continuaron

⁶³ Constructor mecánico dedicado también a la innovación en los ferrocarriles. Véase Cayón, Frax, Matilla, Muñoz, y Saiz (1998, 222-223, 283).

⁶⁴ OEPM, Privilegio Real 1.680. El análisis del funcionamiento de la máquina se encuentra descrito en Amengual (2004, 87-88).

⁶⁵ OEPM, Patente 130. Descrita también en Amengual (2004, 88-89).

⁶⁶ Algunos otros casos en OEPM, Patente 1.007 por *Una máquina de vapor*, de José Pascual Yvars y Crespo (1880); OEPM, Patente 3.960 por *Una máquina rotatoria de vapor*, de los alemanes Gaspar Schwartz y Juan Hoffman (1884), o en OEPM, Patente 42.329 por *Mejora en los motores accionados por fluido bajo presión*, de los norteamericanos Daniel Frederick Smith y William Francis Purcell (1907). Sobre estas máquinas, véase Amengual (2004, 86-97).

⁶⁷ Se trataba, al parecer, de una caldera con forma de cabeza humana que despedía vapor por su boca y movía una rueda con álabes.

⁶⁸ Esferas huecas en las que se calentaba agua en su interior que, al convertirse en vapor, salía por dos espitas que hacían girar la esfera; es decir, una especie de olla a presión concebida como entretenimiento.

apareciendo inventos que proponían la misma idea, como la patente de 1856 del mecánico británico Charles Gray⁶⁹ o la de 1859 del madrileño Escolástico García,⁷⁰ siempre intentaban conseguir trabajo útil de manera similar a como se producía en un salto hidráulico, utilizando vapor en vez de agua, algo que difiere radicalmente del funcionamiento de las primeras y verdaderas *turbomáquinas térmicas* en cuanto a los principios de la mecánica de fluidos que rigen dichos dispositivos, motivo por el que nos parece que los motores con pistón o *disco* rotativo son más interesantes como predecesores. La mutación no se produjo hasta que Parsons y De Laval lograron la expansión del vapor en turbinas de reacción y de acción en la década de 1880, momento a partir del cual comenzaron las bifurcaciones, la irradiación de sendas y la producción de híbridos tomando como modelo los diseños de estos inventores y los de Rateau, Ljungström o Curtis (turbina multicelular de acción, radial de reacción, etc.).⁷¹

La otra mutación importante casi era previsible, pues, a partir de las máquinas de pistón rotativo y de la búsqueda de la turbina de vapor —y, también, gracias a la acumulación de conocimientos en la trayectoria de los primeros motores de combustión interna—, era fácil pensar en sustituir el vapor de agua por una mezcla de aire y gas combustible que, al estallar, produjera su expansión dentro de la turbina, de la misma manera que había sucedido en los motores alternativos. De hecho, además del antecedente de Barber,⁷² en 1791, antes de la aparición de los primeros especímenes de turbinas de vapor, Brayton había descrito, en su patente de 1872, lo que sería el ciclo teórico de las turbinas de gas⁷³ y, en los primeros años del siglo xx, comenzó la proliferación de prototipos (turbinas de Elling o Armengaud y Lemale, entre otros).⁷⁴ No obstante, como puede observarse en el esquema 1.2, el paradigma de las turbomáquinas de gas era bífido desde su comienzo y la trayectoria se abría en dos rutas o sendas relacionadas y dependientes, pues, además de la turbina, se necesitaban turbocompresores capaces de comprimir

⁶⁹ OEPM, Privilegio 1.467 por *Máquina motor a vapor de nueva idea*.

⁷⁰ OEPM, Privilegio 1.966 por *Máquina de vapor*.

⁷¹ Véanse notas 16 a 22.

⁷² Véase nota 23.

⁷³ Véase nota 24.

⁷⁴ Véase nota 30 y texto de la referencia.

el aire antes de la combustión de la mezcla gaseosa. Los turbocompresores evolucionaron desde principios del siglo xx a partir del conocimiento acumulado de la mecánica general de las turbinas, como se desprende del hecho de que algunos de los primeros diseños fuesen patentados por Parsons o Rateau,⁷⁵ pero su desarrollo dependía de la convergencia tecnológica de otros campos como la aeronáutica y la metalurgia. Se necesitaba un mayor desarrollo de la mecánica de fluidos y la comprensión de principios básicos de aerodinámica, como la sustentación y la entrada en pérdida de los perfiles, para poder establecer las geometrías adecuadas de los álabes que impidieran los problemas derivados del desprendimiento rotativo o del límite de funcionamiento estable hasta la línea de bombeo.⁷⁶ De igual manera, era necesario la evolución de aleaciones y materiales capaces de resistir importantes esfuerzos mecánicos y térmicos (tanto para los turbocompresores como para las turbinas de gas), algo que dependía de los avances en la industria siderometalúrgica y de construcción mecánica. Turbocompresores y turbinas de gas estuvieron en condiciones de ser fabricados y utilizados a partir de la patente de 1930 del turborreactor de Frank Whittle⁷⁷ (construido en 1937) y de la planta energética construida por Brown Boveri en Neuchâtel (Suiza, 1939);⁷⁸ motores térmicos aplicados a la propulsión aérea y a la producción eléctrica, respectivamente, a partir de los cuales se producía el salto en potencia específica que apartaba definitivamente la nueva trayectoria de sus predecesoras.

Este tipo de aproximación, por tanto, nos permite confirmar que incluso los cambios radicales en las máquinas térmicas se produjeron, en gran medida, en determinadas *direcciones* dentro del axioma tecnológico y con dependencia de las trayectorias anteriores a partir de las cuales evolucionan y mutan. Desde este punto de vista, la evolución gradual y continua predominaría sobre la discontinuidad (aunque es evidente que, en determinado grado,

⁷⁵ Véanse notas 27 y 28.

⁷⁶ Sobre la mecánica de fluidos y los problemas de los turbocompresores y las turbinas de gas, véase Muñoz Torralbo, Valdés, y Muñoz (2001, 302-305); Dixon (1981, 166-169); Cohen, Rogers, Saravanamuttoo (1983, 138-143).

⁷⁷ Véase nota 32.

⁷⁸ Véase el último párrafo del punto 1.2 de este trabajo.

ésta existe) y generaría una dinámica en la que la *selección* y potenciación de determinadas trayectorias y rutas dependería tanto de factores puramente tecnológicos dentro de los principios del axioma (eficiencia técnica, potencia específica), como también de cuestiones económicas (adaptación a diferentes sectores productivos, disponibilidad y precio de combustibles, etc.), sociales y culturales que, como de sobra es sabido, influyen en el sentido del cambio tecnológico.⁷⁹ Esto explicaría, por ejemplo, que, para determinadas aplicaciones sectoriales de un motor térmico, predomine la configuración *x* sobre la *y*, siendo *x* e *y* igualmente eficientes y posibles.⁸⁰ En todo caso, la *diversidad* de configuraciones y el proceso de irradiación de especímenes parecen tendencias inevitables desde los primeros momentos en que se desarrolla una tecnología, propensión que dirige tanto la aparición de bifurcaciones, sendas y rutas dentro de un paradigma, como la formación de trampolines de conocimiento desde los que mutar a nuevos paradigmas y trayectorias dentro del axioma. Un trabajo reciente de Frenken y Nuvolari (2004) en el que se utiliza la teoría de sistemas complejos y un modelo evolutivo de adaptación biológica para analizar distintos diseños de la máquina alternativa de vapor y su utilización en diferentes sectores productivos entre 1760 y 1800 apunta en este mismo sentido, pues su principal conclusión es que el primer y temprano desarrollo de estos motores puede ser entendido como un proceso de irradiación de diseños que buscan la adaptación a diversos nichos de funcionamiento (actividades productivas), en los que existirían mecanismos específicos de selección. A largo plazo estas variaciones provocarían divergencias grandes en la evolución del diseño de las máquinas o, lo que es lo mismo, abrirían nuevas rutas o sendas. No obstante, en el caso concreto de las máquinas térmicas, parece que la disconti-

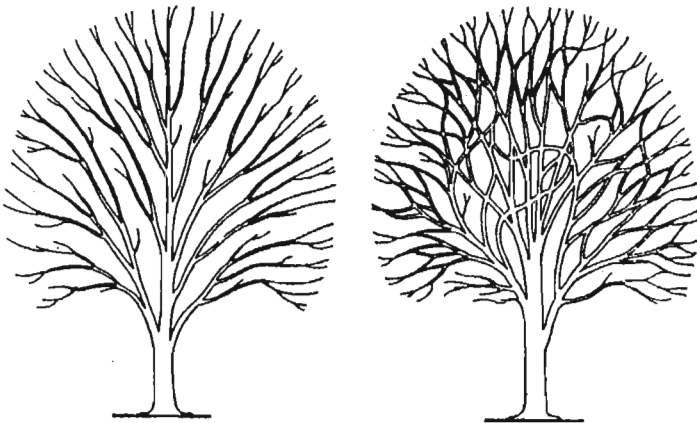
⁷⁹ Sobre los mecanismos de selección en la evolución de la tecnología, véase Basalla (1990, caps. 5 y 6).

⁸⁰ Como, por ejemplo, sucede con los motores de combustión interna alternativos frente a los de pistón rotativo. Aunque los primeros son hegemónicos, los rotativos son igualmente eficientes y posibles (de hecho, actualmente se comercializa una automóvil marca MAZDA, el RX8, con motor rotativo). El predominio de los primeros es debido a las economías de red existentes y a la dependencia de la trayectoria histórica del sector automovilístico.

nuidad y las mutaciones que dieron lugar a nuevas trayectorias de impacto a partir del vapor tendieron a concentrarse especialmente en las últimas décadas del siglo XIX y las primeras del XX, coincidiendo con los profundos cambios económicos, políticos, empresariales y sociales acontecidos en la denominada *segunda revolución industrial*, una explosión *cámbrica* que animó la irradiación tecnológica de los motores térmicos.

De cualquier manera, somos conscientes de que la evolución del axioma de las máquinas térmicas es un proceso mucho más complejo que el esquema general de concatenación de paradigmas en forma de árbol del esquema 1.2. Como ya hemos afirmado, a las mutaciones que abren grandes trayectorias, habría que añadir las mecánica evolutiva y adaptativa de las múltiples bifurcaciones y sendas dentro de cada una, así como los cruces horizontales de innovaciones incrementales principales que pueden acabar aplicándose o hibridando en paradigmas alejados o, incluso, en otros axiomas. Por tanto, el árbol familiar de los motores térmicos podría parecerse más a la ilustración derecha de la figura 1.1 que a la de la izquierda o a nuestro sucinto esquema 1.2. Según el antropólogo Kroeber (1948, 260),⁸¹ la vida orgánica (imagen de la

FIGURA 1.1: Árboles familiares de la vida orgánica
y de los artefactos culturales



Fuente: Kroeber (1948, 260 [tomado de Basalla (1990), 170]).

⁸¹ Citado en Basalla (1990, 170-171).

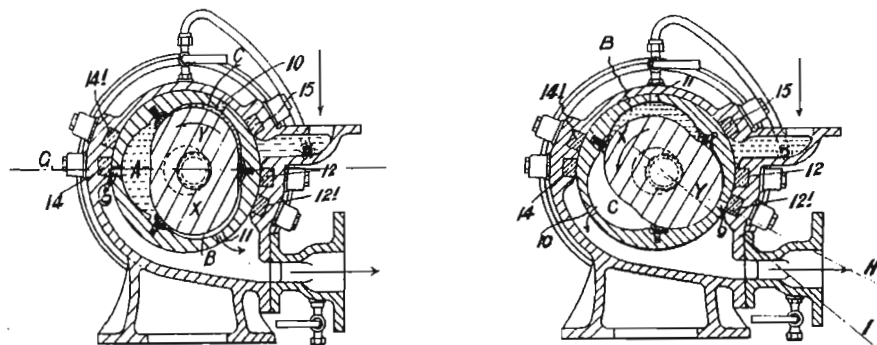
izquierda) evolucionaría en sendas que, una vez separadas del tronco principal, se alejarían de éste y de las demás ramas, mientras que, en el *árbol familiar de los artefactos culturales* o artificiales (imagen de la derecha), los cruces son posibles en todos los sentidos, incluso entre ramas ya separadas. En nuestro caso, existen algunos ejemplos de esos cruces, como sucede con la irradiación de configuraciones de máquinas de vapor de pistón rotativo, entre las que hemos hallado un motor patentado por la compañía Cooley Development en 1907⁸² cuya geometría es sorprendentemente semejante a los conocidos diseños de los motores de combustión interna rotativos de Felix Wankel en las décadas de los cincuenta y sesenta⁸³ (v. esquema 1.3); es decir, una innovación incremental principal en una senda de la trayectoria del vapor que, 50 años después, es posible encontrar en funcionamiento en un paradigma distinto. Más frecuentes aún son los cruces y los híbridos entre las distintas rutas de una trayectoria, como sucedió, por ejemplo, con la aparición de motores diésel de dos tiempos.

Como ya sabemos, toda esta concatenación enmarañada de trayectorias coevoluciona junto al desarrollo de otros axiomas con los que se producen fenómenos de convergencia técnica e influencia mutua (como la metalurgia, la aeronáutica, la química de carbones y petróleos, etc.); coevolución que se produce dentro de la dinámica de los *sistemas tecnológicos*, que, según los análisis empíricos de Andersen (2001, cap. 3), también tienden a desarrollarse sobre las bases de los sistemas previos y existentes de acuerdo a *paradigmas tecno-económicos* en los que hay que tener muy en cuenta los marcos institucionales y culturales. Es prácticamente imposible investigar a la vez todas estas dinámicas implicadas en el proceso de evolución de los motores térmicos, pero creemos que, a través del análisis técnico realizado, patente a patente, pueden mostrarse evidencias empíricas sobre la existencia de enlaces entre las trayectorias tecnológicas dentro del axioma, lo que nos hace resaltar, por tanto, el predominio de la continuidad sobre la discontinuidad.

⁸² OEPM, Patente 42.854 por *Mejoras en las máquinas rotativas para fluidos*.

⁸³ INPI, Patente 1.136.949 de Felix Wankel o DPMA, Patente 1.451.869 de Wankel GmbH y NSU Motorenwerke AG. El análisis técnico se puede consultar en Amengual (2004, 94-96).

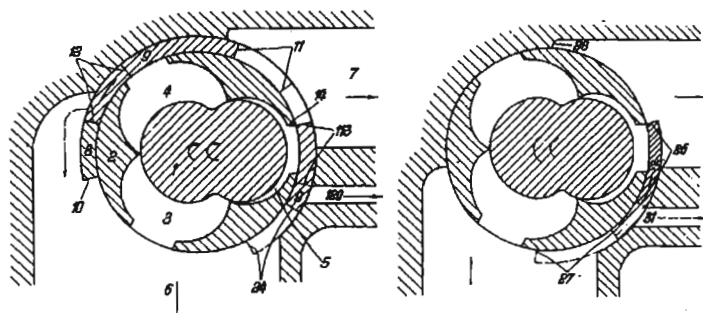
ESQUEMA 1.3: Arriba: dibujos de las *Mejoras en las máquinas rotativas para fluidos* patentadas en 1907 por la Cooley Development Company
Abajo: dibujos de *Un dispositivo compresor con pistones rotativos* patentado por Felix Wankel en 1955



N° 1.136.949

Société dite:
Borsig Aktiengesellschaft

2 planches. — pl. II



Fuente: OEPM, Patente 41.854 e INPI, Patente 1.136.949.

1.6. El sistema español de innovación y las máquinas térmicas

Desde la perspectiva adoptada en este trabajo, las aportaciones españolas al nacimiento de los distintos paradigmas de las máquinas térmicas y al desarrollo general de sus trayectorias son prácticamente nulas durante el período estudiado. Como cabía esperar de un país atrasado y dependiente, entre las 120 patentes clasificadas

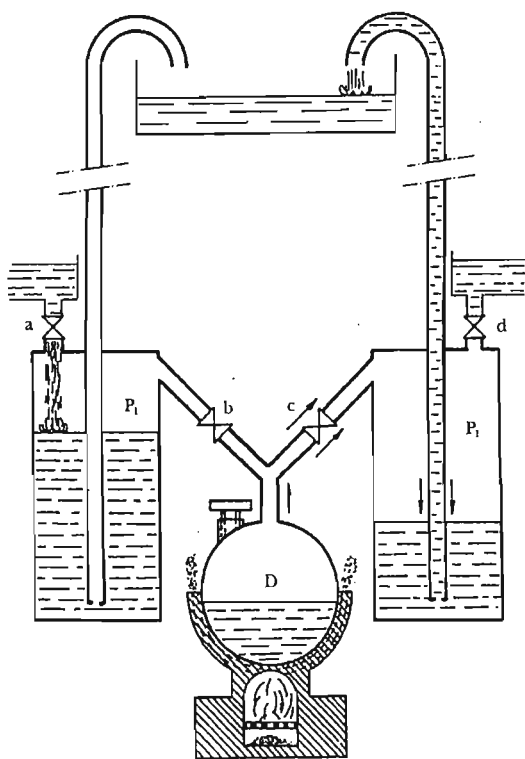
como *radicales e incrementales principales* en el cuadro 1.1, apenas hay cuatro solicitadas por españoles y una por un extranjero residente que podrían situarse, en un momento determinado, cerca de la *frontera tecnológica*⁸⁴ de alguna de las trayectorias analizadas; invenciones a las que habría que unir ciertas contribuciones previas a la existencia del sistema de patentes. En general, la idea más interesante e internacionalmente novedosa se sitúa entre los antecedentes de los motores térmicos y se trata del ingenio de vapor para sacar agua de las minas del navarro Jerónimo de Ayanz, privilegiado por Felipe III en 1606. En dicho privilegio se describía una máquina muy similar a la que décadas más tarde patentaría Thomas Savery, pero desarrollada justo a comienzos de la crisis del siglo xvii, punto de inflexión del liderazgo internacional español y punto de partida del atraso científico y tecnológico del país, lo que impidió cualquier aprovechamiento económico o teórico de la invención. En el esquema 1.4 se representa el funcionamiento de la máquina según García Tapia (1990, 83), que consistía en enviar vapor alternativamente desde la caldera (D) a dos depósitos (P1) y (P2) mediante las válvulas (b) y (c), de donde se conseguía elevar una determinada cantidad de agua por la presión alcanzada al cerrar las válvulas antirretorno (a) y (d), que eran las que permitían la entrada del líquido elemento por simple gravedad. El proceso podía regularse de manera continua mediante la adecuada apertura y cierre de las válvulas (b) y (c) y, como también haría Savery, Ayanz había previsto la existencia de dos calderas (una funcionando y otra en espera) para poder disponer siempre de vapor.⁸⁵

No puede decirse que los restantes ejemplos de origen peninsular que vamos a mencionar constituyeran novedades internacionales que influyeran de forma radical en las trayectorias tecnológicas de las máquinas térmicas —pues casi siempre tuvieron antecedentes extranjeros—, pero sí que se situaron muy cerca de la frontera del desarrollo técnico contemporáneo, algo debido más a la labor de individuos excepcionales que a la consolidación del débil sistema nacional de innovación. Con la excepción de la *Hispano-Suiza* y sus

⁸⁴ Nivel máximo de una tecnología, es decir, la parte más alta de la trayectoria (Dosi 1984, 17).

⁸⁵ Véase nota 1.

ESQUEMA 1.4: Máquina para elevar agua de las minas mediante vapor de Jerónimo de Ayanz, según el Real privilegio de 1606



Fuente: Tomado de García Tapia (1990, 83).

famosos y robustos motores, la mayoría de estos inventos sólo dio lugar a especímenes aislados con poca repercusión económica y comercial. Así, por ejemplo, es sobradamente conocido cómo la primera máquina alternativa de vapor de doble efecto construida fuera de Inglaterra fue realizada por el ingeniero canario Agustín de Betancourt, quien, tras ver brevemente en 1789 el nuevo motor en los Albion Mills de Black Friars, en Londres, se percató de que se habían sustituido las cadenas que habitualmente unían el pistón y el balancín (las cuales sólo podían trabajar a tracción) por un elemento rígido, de lo que dedujo que el pistón producía trabajo útil en ambos sentidos. Inmediatamente presentó una memoria y diseños propios en la Academia de París con los últimos avances ingleses y

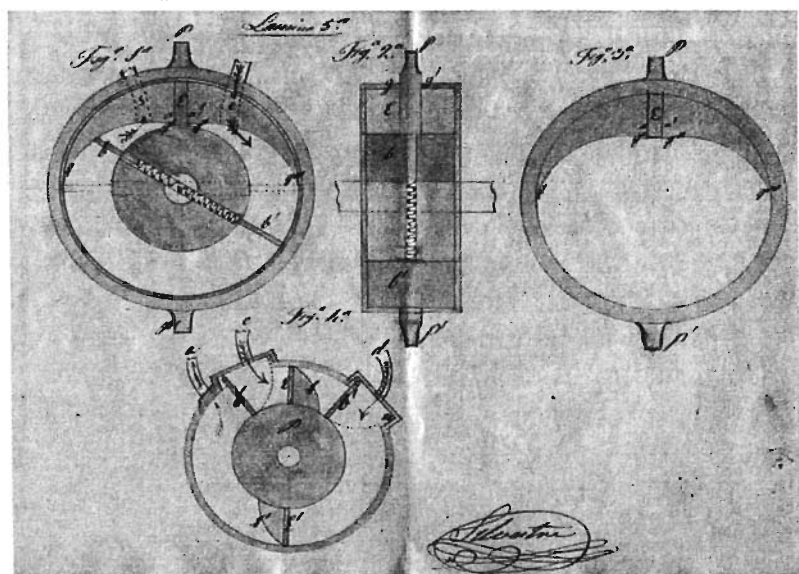
los añadió a la colección de modelos y planos que iban a formar parte del Real Gabinete de Máquinas del Buen Retiro (labor para la que Betancourt estaba pensionado en el extranjero). En 1790 se asoció con los hermanos Perier, fabricantes de máquinas en el país vecino, y construyó e instaló una máquina de doble efecto en los molinos de la Isla de los Cisnes en la capital francesa, máquina que no tenía el regulador centrífugo de bolas de Watt, ya que Betancourt no pudo verlo en Inglaterra, y que incorporaba una solución ingeniosa para transmitir el movimiento algo diferente del paralelogramo del ilustre inventor inglés (González Tascón 1996, 175-177). A partir de ese momento, comenzó la difusión del nuevo motor por Europa.

No existen registros (ni noticias) de otras invenciones relevantes sobre máquinas térmicas de origen español hasta que, en 1858, el maquinista Valentín Silvestre Fombuena, a quien ya hemos mencionado con anterioridad, registra su máquina de vapor de pistón rotativo que, como también sabemos, demuestra la temprana existencia de una interesante bifurcación a partir de la trayectoria de las máquinas alternativas de vapor.⁸⁶ Es más que probable que este tipo de motores ya estuviesen siendo explorados en el extranjero, pero no existen estudios ni catálogos públicos de patentes históricas en otros países lo suficientemente estructurados como para averiguarlo con facilidad. En todo caso, la propuesta de Silvestre Fombuena, bregado en la mecánica ferroviaria de la época, se situaba en la frontera del estado de la técnica del momento y tiene el suficiente interés para ser incluida entre las invenciones incrementales principales que dan lugar a nuevas sendas tecnológicas, por más que el recorrido de la bifurcación sea bien corto y se extinga con rapidez. La máquina parece que fue construida en Madrid y en el esquema 1.5 se puede apreciar por qué afirmamos que este tipo de senda es un antecedente de las turbinas de vapor. El funcionamiento del mecanismo pasa por la admisión del vapor en el cilindro por el conducto *e* (extremo superior derecho del cilindro) que va llenando la cámara existente entre el pistón (de sección circular) y el cilindro, hasta que encuentra la paleta *b*; en ese momento, el pistón empieza a girar en sentido horario por la fuerza que el vapor ejerce sobre *b*' y hasta el momento en que el tope *b* sobrepasa la lumbrera de admisión. El vapor abandona la máquina por

⁸⁶ Sobre Fombuena y su máquina, véanse las notas 63 y 64.

la lumbrera de escape *s* (extremo superior izquierdo de la figura), con lo que se repite así el ciclo. Las paletas *b* y *b'* del pistón se encuentran unidas por un muelle, de manera que se puedan acoplar al contorno alveolar del cilindro. La figura que aparece en el extremo inferior representa otra forma de realización de la invención, con entradas de vapor por *c* y *d*, y escape por *a*.

ESQUEMA 1.5: Dibujos del Sistema de cilindros de vapor con movimiento de rotación de Valentín Silvestre Fombuena, patentado en enero de 1858

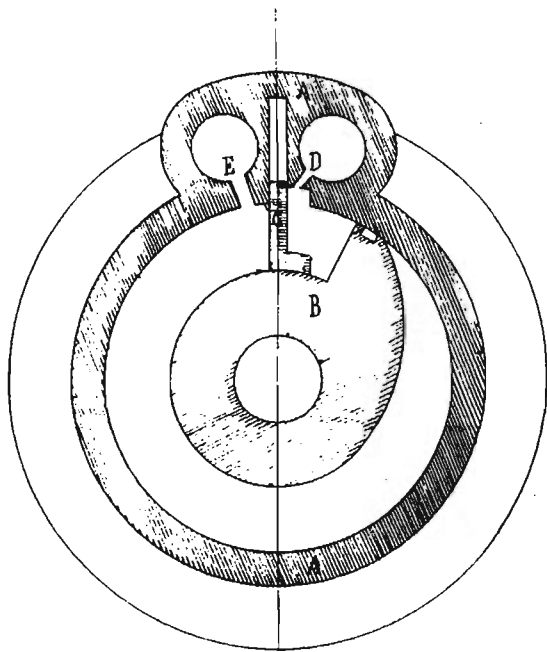


Fuente: OEPM, Privilegio Real 1.680.

Dentro de la misma senda se encuentra también el invento de José Pascual Yvars Crespo, registrado en 1880 desde Jávea (Alicant/Alicante), cuya originalidad consistía en el peculiar sistema de admisión y distribución del vapor. Como puede comprobarse en el esquema 1.6, la máquina objeto de la patente constaba de un cilindro horizontal *A*, en cuyo interior había otro cilindro horizontal *B*, concéntrico con el anterior, de igual longitud y menor diámetro, provisto, en toda su extensión, de una aleta con una cara plana en la misma dirección que el radio, y con la otra cara convexa, de manera que venía a formar una espiral con el propio cilindro *B*. En la parte superior del cilindro *A* se disponía una válvula *C* (el solicitant-

te la denomina «paleta»), que regulaba la admisión del vapor. Cuando éste se encontraba a una presión determinada, vencía la resistencia de la válvula *C*, de manera que la lumbrera *D* quedaba abierta, produciéndose la admisión del vapor, que chocaba contra la aleta del cilindro *B* y, con ella, conseguía el movimiento de dicho cilindro. Al ir girando el cilindro *B*, e ir completando su primera revolución, se conseguía el cierre progresivo de la válvula de admisión *C* gracias a la geometría de la aleta. Llegado un momento, el extremo plano de la aleta sobrepasaba la lumbrera *E*, por donde se realizaba el escape del vapor; poco después, volvía a abrirse la válvula *C*, con lo que se repetía la admisión del vapor y se iniciaba un nuevo ciclo. Al contrario que la patente de Fombuena, la de Yvars no tiene acreditada la puesta en práctica del invento, por lo que ignoramos si llegó a construir prototipos de la solución que proponía, pero, desde luego, ninguna de las invenciones debió de fabricarse en serie y su impacto fue claramente minúsculo, dado que las máquinas rotati-

ESQUEMA 1.6: Dibujo de la *Máquina de vapor* de José Pascual Yvars Crespo, patentada en junio de 1880



vas de vapor iban camino del estancamiento, tanto por la competencia de los motores de combustión interna alternativos como por la aparición de las primeras turbinas de vapor.

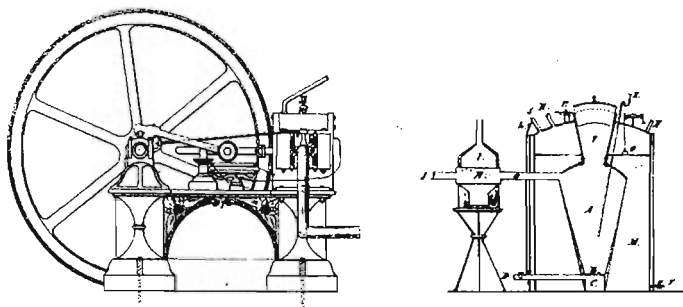
Es, precisamente, en la trayectoria de los motores de combustión interna alternativos, donde encontramos las otras dos invenciones relevantes sobre máquinas térmicas, puesto que, antes de 1914, no hay ninguna patente de impacto, española o de residentes extranjeros, relacionada con turbinas de vapor o con turbinas de gas. La primera de estas ideas a las que nos referimos es el motor registrado por el presbítero y catedrático catalán Jaime Arbós y Tor⁸⁷ en 1862, máquina que seguía principios muy similares a los del motor de Lenoir, quien lo había patentado dos años antes en España. Como puede apreciarse en el esquema 1.7, y como el propio inventor explicaba:

[...] para poner en marcha este aparato se enciende fuego en el hornillo *A* y en el hornillo *I*, y una vez encendido, se llena el hornillo *A* de carbón haciendo penetrar el aire (tubo *D*) que viene de un fuelle; y cuando los gases que salen por la abertura cónica *F* son inflamables entonces se tapa dicha abertura en cuyo caso sale la mezcla gaseosa por el tubo *G* y de aquí van a parar al cilindro *H* lleno de carbón incandescente para ser introducida junto con el aire en el cilindro *V*, donde por su combinación con el oxígeno, mediante la chispa eléctrica o alambre de platino candentes, se produce el esfuerzo necesario para hacer recorrer el pistón la mitad de su carrera; y como la formación de la mezcla gaseosa es continua, continua es también la carga, ora en la cara anterior, ora en la posterior del pistón.

Por otro lado, el calor generado en la combustión del carbón servía para calentar el agua existente en una caldera, lo que permitía alimentar una máquina de vapor convencional (una especie de ciclo combinado). El invento de Arbós, por tanto, se sitúa en la línea de salida de la nueva trayectoria de la combustión interna alternativa y, aunque de la anterior descripción y de los planos que incluyó en su patente no pueden deducirse grandes diferencias respecto

⁸⁷ OEPM, Privilegio 2.570.

ESQUEMA 1.7: Dibujos del *Procedimiento para obtener una mezcla gaseosa aplicable como motor a las máquinas fijas y móviles y otros usos, patentado por Jaime Arbós y Tor en octubre de 1862*



Fuente: OEPM, Privilegio 2.570.

a Lenoir, parece que fue realizando modificaciones interesantes, sobre todo en la riqueza de la mezcla explosiva y en el sistema de introducción de la misma en el cilindro, que lo hicieron rentable y aplicable a usos industriales. Mientras Lenoir utilizaba gas de alumbrado en su motor, Arbós acabó aplicando al suyo un *gasógeno*, un aparato para producir una mezcla gaseosa obtenida del paso simultáneo de aire y vapor de agua a través de carbón incandescente a temperatura constante, combustible que no era inyectado en el cilindro, sino introducido mediante *aspiración* por la depresión generada en aquél, con lo que, de este modo, Arbós se convirtió en el padre del *motor de gasógeno aspirado* (Barca, Bernat, Castanyer, Espuñes, Fargas, Puig, y Torras 1992). Aunque está documentada la implantación de algunos motores Arbós en diferentes lugares de Cataluña, y aunque este tipo de sistemas siguió utilizándose a finales del siglo XIX y principios del XX (incluido su extravagante uso durante la autarquía franquista para la automoción), la senda de los llamados motores de gasógeno, como sucedió en el caso de los pistones rotativos, estaba condenada a la extinción desde que fue superada por los nuevos motores de combustión interna tipo Otto y Diesel.

Es, entre esos nuevos motores de combustión interna aplicados al transporte, donde encontramos las últimas aportaciones de interés, aunque, en este caso, no fueron fruto del ingenio nacional, sino del trabajo en suelo peninsular del ingeniero suizo Marc Birkigt, socio

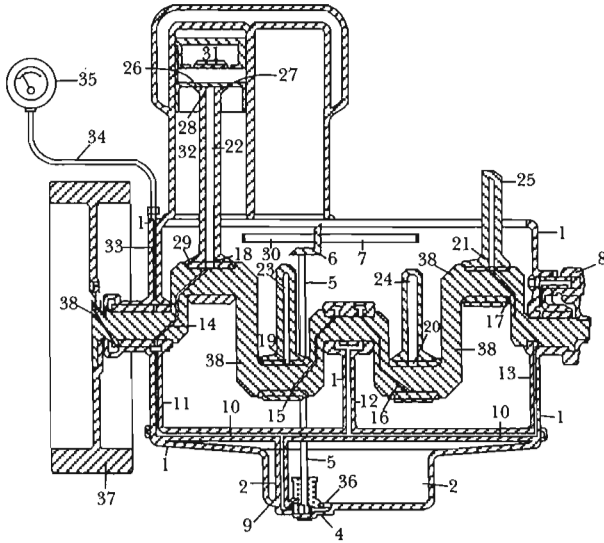
principal, junto con el catalán Damian Mateu, de una empresa emblemática y bien conocida: La Hispano-Suiza, Fábrica de Motores S. A., creada en Barcelona en 1904. En los años previos, Birkigt había trabajado en La Compañía General de Coches-Automóviles Emilio de la Cuadra (dedicada, con escaso éxito, a la fabricación de motores híbridos eléctricos y de combustión interna), la cual, tras cambiar su denominación a J. Castro Sociedad en Comandita, Fábrica Hispano-Suiza, acabaría siendo el germen de la famosa sociedad anónima. Los motores ideados por Birkigt y fabricados por La Hispano fueron aplicados a la automoción y, también, a la aviación y pocos rivales lograron alcanzar su prestigio y calidad (v. Polo 1994; 1999; Lage 1992; 2003; Fatjó 2000). El ingeniero suizo pasó su vida entre Barcelona y París (lugar donde La Hispano abrió una fábrica en 1911), permaneciendo siempre al frente de la dirección técnica como responsable de, prácticamente, todos los desarrollos, los cuales eran registrados a su nombre.⁸⁸ Antes de la Primera Guerra Mundial, sólo seis de las patentes hacían referencia a la máquina térmica o sus componentes (siendo el resto otras cuestiones relacionadas con la construcción de los automóviles) y sólo en dos Birkigt aparece como residente en Barcelona, pues las otras cuatro fueron solicitadas después de 1911 y, en ellas, se cita como residencia Levallois-Perret, localidad cercana a París en la que estaba establecida la fábrica francesa de la sociedad.⁸⁹

En todo caso, la invención más relevante de las registradas fue protegida y desarrollada en Barcelona en 1908 y consistía en un original e importante sistema de lubricación interna que posteriormente alcanzaría gran difusión y que, incluso, se utiliza en la actualidad. En el esquema 1.8 puede observarse la disposición de un

⁸⁸ Por ejemplo, entre 1901 y 1925, Birkigt registró en España 65 patentes, mientras que a nombre de Hispano-Suiza sólo figuran siete.

⁸⁹ Desde Barcelona solicitó las patentes OEPM, 28.565, por *Un motor perfeccionado de petróleo para automóviles*, y 43.672 por *Un sistema de lubricación interna para automóviles*. Desde París las patentes OEPM, 55.538 por *Perfeccionamientos introducidos en el engrasado de los motores, especialmente de los de automóvil, así como sus anexos*; 55.541 por *Perfeccionamientos introducidos en los carburadores para motores de explosión y por lo tanto a los motores mismos*; 57.020 por *Perfeccionamientos en los silenciosos para motores de explosión*, y 57.085 por *Perfeccionamientos introducidos en los sistemas de distribución por válvulas mandadas, especialmente en los empleados en los motores de explosión*. Un análisis detallado de estas invenciones puede verse en Amengual (2004, 248-256).

ESQUEMA 1.8: Dibujo de *Un sistema de lubricación interna para automóviles*, patentado por Marc Birkigt en julio de 1908



Fuente: OEPM, Patente 43.672.

recipiente 2 propio para la contención de aceite que forma parte integrante del cárter del motor 1, en el cual funciona una bomba rotativa 4 que impele el aceite, obligándolo a recorrer unos conductos desde los cuales pasa a otros practicados en el eje cigüeñal, cuyas embocaduras se ponen periódicamente en frente de otros conductos practicados en el interior de las bielas, por donde entra el aceite hasta llegar al acoplamiento biela-pistón. En comunicación con la bomba 4 se halla el tubo de ascensión del aceite 9 que, a su vez, está en comunicación con el tubo 10 y éste lo está con los conductos 11, 12 y 13. El conducto 12 va a parar al cojinete intermedio del cigüeñal 38, mientras que 11 y 13 van a alimentar, respectivamente, al primero y al último de los cojinetes extremos. El cigüeñal 38 lleva practicados unos conductos 14, 15, 16 y 17 de manera que, por cada giro del cigüeñal, un extremo de estos conductos se pone en contacto con la desembocadura de los tubos 11, 12 y 13; los otros extremos de los tubos 14, 15, 16 y 17 van a dar sobre los cojinetes de las cabezas de las bielas. A su vez, estos cojinetes llevan otros orificios 18, 19, 20 y 21 que permiten la comunicación entre los mencionados tubos 14, 15, 16 y

17 y otros conductos 22, 23, 24 y 25 practicados en el interior y a lo largo de las bielas del motor, desembocando estos últimos en los cojinetes de los pies de las bielas, que, para conseguir este efecto, llevan un orificio 28. La tubería de lubricación 10 comunica con un conducto 33 y éste, a su vez, con otro 34, que conduce a un manómetro 35 para conocer la presión suministrada por la bomba 4 en cada momento; una válvula limitadora 36 no permite que la presión sobrepase un valor determinado.

Lo que, desde luego, logró Birkigt con la práctica y con otras muchas innovaciones aditivas desarrolladas a lo largo de las primeras décadas del siglo xx fue ir perfeccionando la efectividad y fiabilidad de sus motores, algo en lo que los avances en la lubricación tuvieron mucho que ver, hasta tal punto que las máquinas Hispano llegaron a situarse en la misma frontera tecnológica del paradigma, tanto en lo que se refiere a propulsores de automóvil como a los de avión, largamente alabados durante la Primera Guerra Mundial. Las factorías de Barcelona y Francia fabricaron miles de unidades de gran calidad que convirtieron a la empresa en, prácticamente, la única española capaz de competir en la trayectoria de la combustión interna alternativa, algo que tuvo importantes consecuencias económicas y tecnológicas para la compañía y para el país. Pero, como en tantas otras cosas, la Guerra Civil y la autarquía pusieron el punto final a la aventura y contribuyeron, más que ningún competidor, a apartar a la industria nacional del grupo de líderes tecnológicos en el sector.

Por último, aunque fuera del período de estudio, queremos hacer referencia a los trabajos de un ingeniero catalán, Ramón Casanova i Danés, que, en las décadas de los diez y los veinte, investigó la propulsión aérea y las turbinas de gas. Su padre tenía una fábrica que abastecía de piezas a Hispano-Suiza y allí realizó sus pruebas y prototipos, uno de los cuales patentó en septiembre de 1917 como *Motor de explosión para toda clase de vehículos*,⁹⁰ denominación bajo la que se protegía el diseño de un verdadero *estatorreactor*, un aparato que aprovechaba la fuerza de reacción del aire originada por la explosión provocada dentro de un cilindro, algo que, según algunos autores, era un precursor del motor a reacción y un sistema que fue

⁹⁰ OEPM, Patente 65.394.

utilizado años después con éxito en las famosas bombas volantes nazis. Como en la mayoría de las invenciones españolas de interés que hemos visto, no se aprovechó el posible impacto sobre el naciente paradigma y el inventor ni pudo continuar sus investigaciones ni comercializar sus resultados, algo de lo que él mismo se quejaba y lamentaba cuando, años después, comprobó el funcionamiento de las V-1 (Casanelles 2000, 326-329).

Todo lo anterior nos conduce hacia conclusiones desoladoras. Antes de la Primera Guerra Mundial, la contribución española relacionada con el desarrollo de las máquinas térmicas es demasiado exigua como para poder agarrarse a las excepciones. Los casos descritos, más que sobre el genio particular de algunos inventores, son ejemplo de la incapacidad del *sistema español de innovación* para generar conocimiento o tecnología relevante capaz de influir en la generación de los paradigmas o en la evolución de sus trayectorias. El desinterés social y político por la ciencia, la tecnología y la educación dio lugar a debilidades institucionales insuperables a lo largo del siglo XIX, que se arrastrarían durante todo el novecientos. La fragilidad del sistema de innovación era tan grande que sólo dejaba un camino para seguir el ejemplo de los nuevos países industriales: considerar la ciencia y la tecnología factores exógenos en los que no se podía competir. En la mayor parte de los sectores productivos, la distancia a la frontera, el «*gap*» tecnológico, fue insalvable antes de 1914. La imitación, la copia, la importación de la tecnología y la contratación de personal cualificado extranjero fueron cuestiones habituales, normales y hasta económicamente lógicas en un país seguidor atrasado y dependiente como España. Sin embargo, lo que sí se aparta de la normalidad, al contrario de lo sucedido en otros Estados a lo largo de los siglos XIX y XX, es que, en el largo proceso de imitación, apenas se lograsen desarrollar nichos tecnológicos propios de especialización en los que ir acumulando capacidades inventivas e innovadoras —algo que ha distinguido constantemente a nuestra economía hasta la más cercana actualidad—. De nuevo hay que acudir al entorno institucional para entenderlo, pues la pervivencia de actitudes contrarias a la innovación, la resistencia de los grupos elitistas a ejercitar disciplinas científicas u oficios industriales, el alejamiento de la mayor parte de la sociedad del conocimiento, el déficit educativo y una escala de valores sociales y posicio-

nales en la que la ciencia y la tecnología han ocupado siempre lugares completamente marginales pueden ayudar a explicar mejor la peculiar trayectoria del sistema español de innovación que cualquier otra cuestión. Si, en la década de los veinte, se dieron algunos pasos interesantes y positivos en ciencia y tecnología, de nuevo la Guerra Civil y la dura autarquía franquista los interrumpieron potenciando las debilidades hasta el extremo, una herencia que, de alguna manera, aún hoy perdura.

1.7. Dependencia tecnológica e industria del motor en España

Hemos visto que sólo La Hispano-Suiza —y debido a la capacidad de un ingeniero extranjero— fue capaz de competir en la frontera tecnológica de la trayectoria del motor de combustión interna alternativo antes de la Primera Guerra Mundial. El resto de individuos o empresas inventores y fabricantes de motores térmicos acudió directamente a las innovaciones exteriores, a las copias o a las licencias de fabricación para producir esta clase de bienes de capital y apenas produjo avances que dejaran rastro en el sistema de patentes, más allá de innovaciones incrementales aditivas y residuales sin relevancia en los paradigmas o en la dirección de las trayectorias. Pero, aunque técnicamente no merezca la pena referirse a ellas, ya sabemos que este tipo de actividad incremental y residual puede ser interesante para inspeccionar la actividad económica del sector, pues suele ser fruto de la demanda derivada del propio proceso productivo. En todo caso, lo primero que hay que tener en cuenta es que la industria del motor en España se desarrolló muy tardíamente, ya que incluso las tareas de imitar y copiar exigen la presencia, acumulación y extensión de conocimientos y capacidades humanas, empresariales y tecnológicas (Rosenberg 1976, 155) que el sistema español de innovación fue incapaz de generar antes de 1850 y que produjo con muchas dificultades después de esta fecha.

Tras los primeros intentos de Ayanz a comienzos del siglo xvii, quien parece llegó a construir, al menos, un modelo de su máquina para introducir aire fresco en los aposentos de su casa en Valladolid (García Tapia 2002, 457), hay que esperar al último tercio del si-

glo XVIII para constatar la presencia de los primeros especímenes de motores alternativos de vapor que, o bien fueron importados directamente del exterior, o bien contruidos de manera aislada y sin ninguna pretensión comercial. Después del fracasado intento de plantificar una máquina tipo Newcomen en Toledo para elevar agua a la ciudad en la década de 1720, fue en 1773 y 1774 cuando comenzaron a funcionar las dos primeras *bombas de fuego* en los diques de carenar del arsenal de Cartagena (Murcia), contruidas bajo la dirección de los guardiamarinas Jorge Juan y Julián Sánchez Bort. A partir de entonces y hasta final de siglo, el artífice Antonio Delgado contruyó otras máquinas atmosféricas de la misma clase en Cartagena y en otros arsenales de la Marina como El Ferrol (La Coruña) o La Carraca (Cádiz) (Torrejón, 1994, 181-183; Helguera, y Torrejón, 2001, 242-244). En 1804 fue el médico Francisco Sanponts el encargado de contruir y establecer uno de estos motores en la fábrica del industrial textil barcelonés Jacinto Ramón (Agustí i Cullell 1983, 108-113). Es decir, hasta prácticamente 70 u 80 años después del invento de Newcomen, no se logró contruir e implantar en España las primeras unidades, en un tiempo donde ya los avances de Watt estaban comenzando a difundirse. De hecho, las primeras máquinas alternativas de vapor tipo Watt con condensador externo, aunque todavía de efecto simple, habían llegado importadas de Inglaterra en 1787 por el pensionado Tomás Pérez para las minas estatales de mercurio de Almadén (Ciudad Real), donde sólo acabó instalándose una que probablemente no empezó a funcionar hasta la tardía fecha de 1805.⁹¹ Respecto a la famosa máquina de doble efecto de Watt, entre 1789 y 1807 se importaron siete unidades para diferentes usos (fábrica de harinas, aserradero en el arsenal de La Carraca, minería, fábrica de curtidos...), pero, a pesar de que está documentada su llegada a España, no se logró instalar ninguna de ellas, al menos antes de 1814 (Helguera, y Torrejón 2001, 247-251; Torrejón 1994, 183-187). Sin embargo, un motor de ese tipo fue contruido en Barcelona en 1806 por el mencionado Francisco Sanponts para la misma fábrica textil donde había instalado la máquina de Newcomen, donde se utilizó, igual que la anterior, para la elevación de aguas (Agustí i Cullell 1983, 125-137).

⁹¹ Fueron máquinas *pirata* fabricadas por Wilkinson en lugar de Watt y Boulton. Véase Helguera y Torrejón (2001, 245-247).

Después de la Guerra de la Independencia llegaron otras máquinas destinadas a barcos de vapor, los primeros de los cuales fueron *El Real Fernando* o *Betis*, botado en Sevilla en 1817, el pontón-draga *Reina Isabel*, alias *El Sevillano*, y *El Infante D. Carlos*, alias *Neptuno*, todos de la Real Compañía del Guadalquivir, que los equipó con máquinas de doble efecto de 20 caballos procedentes de los talleres de Watt y Boulton.⁹² En 1821 el maquinista inglés Guillermo Whiting instaló en Sevilla para la misma empresa una bomba hidráulica a vapor aplicada al regadío, «la quinta máquina de vapor que la referida compañía ha hecho traer a aquella ciudad, y además hay otras en la fábrica de curtidos de San Diego».⁹³ Por las mismas fechas comenzó también la implantación de algunas máquinas en los dominios coloniales como, por ejemplo, las conducidas desde Inglaterra al Callao (Perú) en 1816 por Francisco Wille, Pedro Abadía y Josef Arizmendi para el desagüe y laboreo de minas,⁹⁴ o las que se instalaron con el mismo propósito en el Cerro de Pasco (también Perú) en 1817 y 1818.⁹⁵ En Cuba hubo intentos de utilizar el vapor en la producción de azúcar desde finales del siglo XVIII y, al menos desde 1817, está documentada la aplicación de estos motores a los trapiches, siendo uno de los lugares y sector de actividad donde más rápidamente se difundieron. Entre 1846 y 1857, por ejemplo, entraron 603 máquinas de vapor y, en 1860, el 70% de los 1.365 ingenios de azúcar existentes en la isla utilizaba la nueva fuerza motriz (Fernández de Pinedo 2002, 253-254). De nuevo en la Península, la estadística de comercio exterior británico revela cómo, a partir de 1820, fue creciendo la importación de motores de vapor y cómo el flujo empezó a acelerarse a finales de la década de 1830 coincidiendo con un primer impulso económico e industrial en algunas zonas (Nadal 1998, 40). En 1827, por ejemplo, Fernando de la Sierra obtuvo un descuento arancelario para importar cuatro máquinas de vapor inglesas aplicadas al regadío y la molienda en la Isla Mayor del Gua-

⁹² Sobre el *Betis*, véase *Gaceta de Madrid*, 19 de junio y 22 de julio de 1817; sobre *El Sevillano*, véase *Gaceta de Madrid*, 2 de agosto de 1818, y, sobre el *Neptuno*, véase *Gaceta de Madrid*, 7 de enero de 1819.

⁹³ *Gaceta de Madrid*, 21 y 22 de julio de 1821.

⁹⁴ *Gaceta de Madrid*, 31 de agosto de 1816 y 26 de noviembre de 1820.

⁹⁵ *Gaceta de Madrid*, 18 de marzo de 1817, 17 de octubre de 1818 y 25 de mayo de 1819.

dalquivir.⁹⁶ En el mismo año se instaló una máquina de vapor en la fundición de plomo de San Andrés de Adra (Málaga) y, en los siguientes y en la misma provincia, se incorporó la nueva fuerza motriz en las plantas siderúrgicas de La Concepción y La Constancia, propiedad del empresario andaluz Manuel Heredia (Helguera, y Torrejón 2001, 252). En 1830 se puso en funcionamiento una draga a vapor en el puerto de Barcelona (Nadal 2000a, 210) y, en 1834, la Compañía Catalana de Vapores une dicha ciudad y Palma mediante el *Balear*, embarcación movida por la misma energía. En los 10 años siguientes, 11 barcos españoles funcionan con esta propulsión en trayectos marítimos. La navegación transoceánica en buques de vapor, sin embargo, no comenzaría hasta 1861 (Nadal 1998, 54-56). La puesta en funcionamiento en 1833 de la gran fábrica a vapor de Bonaplata, Vilaregut, Rull y Cía. en Barcelona inauguraba la expansión del vapor en la industria textil algodonera (Nadal 2000a, 210-219) y en otras actividades industriales, las cuales, junto con la minería del plomo en la década de 1840 y con el comienzo de la construcción del ferrocarril en las de 1850 y 1860, hicieron aumentar la potencia instalada, lo que dio lugar a una creciente demanda de reparación y mantenimiento de la nueva tecnología que animaría, poco a poco, al nacimiento de talleres especializados y empresas constructoras.

La actividad minera y fabril, primero, y la propulsión naval y ferroviaria, después, fueron, según lo relatado, los principales sectores de penetración y aplicación de las máquinas alternativas de vapor, las cuales predominaron sobre otros motores térmicos prácticamente hasta la Primera Guerra Mundial. Nadal estima que, en 1900, había instalados unos 58.000 caballos de vapor en minería, 180.000 en industria, 856.000 en el ferrocarril (el principal sector de uso) y casi 112.000 en la marina mercante, que, para esas fechas, impulsaba la mitad de la flota y el 85% del arqueo total con dicho motor (Nadal 1998, 41, 57, tablas 3, 6). No obstante, a partir de 1860 y 1870, comenzó la aparición y progresiva competencia de las máquinas de combustión interna alternativas, primero a través de especímenes aislados como el motor de gas que Jaime Arbós y Tor instaló en Bar-

⁹⁶ *Gaceta de Madrid*, 21 de abril de 1827.

celona a mitad de la década de 1860 en un local del marqués de Rocabuena, en el Hospital Militar de la calle Tallers y, parece, que en algunas fábricas de la ciudad,⁹⁷ y, luego, de manera más general a raíz de la aparición de mejoras en los motores de gas y presión atmosférica⁹⁸ diseñados por Otto a principios de la década de 1870 y, posteriormente, de su motor de cuatro tiempos.⁹⁹ Entre 1878 y 1880, se instalaron en España, al menos, 11 unidades —de entre uno y dos caballos de fuerza— de este último invento de la Gasmotorenfabrik Deutz en distintas lugares de Barcelona, Badalona, Tarragona y Valencia.¹⁰⁰ Según Nadal (1998, 41, 68-69), en 1885, la industria madrileña tenía ya 53 *motores de gas* (denominación en la que, probablemente, se están incluyendo tanto los de cuatro tiempos como otro tipo de aparatos y gasógenos diversos) que sumaban una fuerza de 1.120 caballos, frente a una cifra similar de motores de vapor que contabilizaban sólo 1.000, y, en 1900, en Barcelona, habría ya fun-

⁹⁷ En OEPM, Privilegio 2.570 consta la acreditación de la puesta en práctica del nuevo motor en la casa número 10 de la Puerta del Ángel (Barcelona), local del marqués de Rocabuena. En OEPM, Privilegio 3.044, también solicitado por Arbós por un aparato generador de gas, se afirma que, en el Hospital Militar de la calle Tallers, se utiliza el fluido para el alumbrado, la calefacción y *como fuerza motriz*, probablemente con el tipo de motor descrito en el privilegio 2.570. Según Barca, Bernat, Castanyer, Espuñes, Fargas, Puig, y Torras (1992), el sistema de generación de gas Arbós para la iluminación estaba instalado también en la fábrica Canadell en San Martín de Provensals o en la fábrica Sala de Mataró, donde pudo utilizarse, asimismo, el motor de combustión interna.

⁹⁸ Antes de la invención del motor de cuatro tiempos, Otto y sus socios en la Gasmotorenfabrik Deutz diseñaron diversas máquinas como, por ejemplo, un motor de gas que utilizaba la explosión de la mezcla para elevar el pistón y aprovechaba la fuerza de la presión atmosférica para bajarlo. Este diseño fue registrado en España (OEPM, Privilegio 5.293) en 1875 como una *Máquina motor a fuerza de gas atmosférico*.

⁹⁹ Véase nota 11.

¹⁰⁰ OEPM, Privilegio 5.694. Los ingenieros Antonio Dardet y Conrado Sintas hicieron una relación de los lugares donde funcionaba el motor de Otto. En Barcelona había seis: tres, de un caballo de fuerza, se instalaron en 1878 aplicados a bombas de elevar agua, cuyos dueños y emplazamiento eran José Suñol, San Lorenzo, 3; Pablo Sansalvador, calle San Lorenzo, 6, y Miguel Roig, calle Sobradíel, 3. Otros dos motores de dos caballos de fuerza eran los de Pedro Guinart, plaza Padró núm. 6, aplicado a máquinas de hacer fideos (1878), y el de Ramón Enrich, calle Rech Condal, 7, para mover máquinas de géneros de punto (1879). El último en la Ciudad Condal, de sólo un caballo, era el de Ramón Casals, calle Pino, 5, para máquinas de imprenta (1879). En Tarragona había dos motores en 1879 con dos caballos de fuerza: el de Salvador Poblet, destinado a la fabricación de chocolate, y el de Eduardo Rull en una fábrica de fideos. En Badalona, la señora Viuda de Marinello instaló, en 1879, uno en su fábrica de chocolate (de un solo caballo), y, en Valencia, había otros dos de igual potencia: en un taller de construcción de máquinas de los señores Chirivella y Alberto (1878) y en un taller de litografía cuyo dueño era Pascual Soler (1879).

cionando más de un millar de los nuevos motores de combustión interna alternativos. Es probable, también, que, antes de 1914, funcionase alguna turbina de vapor, bien aplicada a la propulsión naval, bien a la generación eléctrica u otros usos, aunque, por ahora, no tenemos datos que lo corroboren y, en todo caso, se trataría de ejemplares aislados y sin apenas impacto.

En la economía española del siglo XIX, por tanto, sólo dos de los paradigmas estudiados, las máquinas de vapor alternativas y los motores de combustión interna alternativos, se difundieron lo suficiente como para alcanzar relevancia económica. Los competidores directos de los mismos fueron las turbinas hidráulicas a partir de 1850¹⁰¹ y los motores eléctricos en el primer tercio del siglo XX, aunque las máquinas térmicas continuaron desarrollándose con éxito en determinados nichos, especialmente en el transporte y en la generación eléctrica. Como hemos visto, al principio, la mayoría de las máquinas de vapor fueron directamente importadas del exterior, dada la incapacidad de construcción metal-mecánica española a finales del siglo XVIII y durante la primera mitad del XIX, pero, a medida que crecía su número y se hacía necesario el mantenimiento de la maquinaria, fueron apareciendo talleres de reparación —o dedicados a la importación e instalación— entre los que nacerían las primeras empresas de construcción de motores en territorio español. Fue, a lo largo de las décadas de 1830 y 1840, cuando surgieron en Cataluña algunos de estos talleres, como los del francés Louis Perrenod, los de Nuevo Vulcano, filial de la Compañía Catalana de Vapores, los de Valentí Esparó o los de N. Tous y C. Ascacíbar conocidos como La Barcelonesa y que habían sucedido a los de Perrenod. En 1849 se han instalado en Barcelona los escoceses Alexander Hermanos y, en 1855, de la fusión de los talleres Esparó y los de La Barcelonesa, nació La Maquinista Terrestre y Marítima, que, junto con los Alexander, se convertirían en los fabricantes más importantes de máquinas térmicas (Nadal 1998, 74-75). A lo largo de la segunda mitad del siglo, otros talleres de construcción de maquinaria de toda índole proliferaron por Valencia, Madrid, Andalucía y por otras capitales

¹⁰¹ Entre 1858 y 1910, una de las compañías fabricantes de turbinas hidráulicas más importante del país instaló, al menos, 1.223 equivalentes a una potencia de 86.332 caballos. Véase Nadal (2000b, 43-46).

de provincia (Nadal 1998, 72),¹⁰² pero los que fueron capaces de construir motores nunca alcanzaron la capacidad de fabricación y venta de La Maquinista o de Alexander Hermanos, que coparon la mayor parte del mercado que no estaba en manos extranjeras. La primera empresa, por ejemplo, fabricó, entre 1856 y 1900, 544 máquinas de vapor fijas (industriales), 59 marinas y 21 locomotoras, las cuales había comenzado a construir a partir de 1884 y cuyo número crecería en los primeros años del siglo xx (Nadal 1998, 76; 1999, 125, cuadro 1; Riera, 1993, 1998).¹⁰³ Alexander Hermanos superó, en 1898, los 1.500 motores de vapor alternativos fijos, aunque parece que se trató de máquinas muy pequeñas, de menor potencia que las fabricadas por La Maquinista, entre las que podrían estar contabilizadas bombas de vapor para elevar agua, lo que no es, exactamente, un motor térmico (Nadal 1991, 163-174; Ortiz-Villajos 2004, 6-9). La fabricación de locomotoras ferroviarias fue dominada casi en exclusiva por La Maquinista, aunque, en los motores de vapor alternativos de uso naval, tuvo ya la competencia, en las primeras décadas del siglo xx, de la Sociedad Española de Construcción Naval, de Euskalduna y de Babcock and Wilcox (Valdaliso 1997, 321-322, n. 43; López, y Valdaliso 1997b, punto 5).

La fabricación de motores de combustión interna alternativos en España comenzó de manera similar al vapor, pues, tras la importación de los primeros ejemplares y la rápida proliferación de los mismos en las últimas décadas del siglo xix, surgió la necesidad pareja de su montaje, mantenimiento y reparación que condujo a la capacidad de construcción, oportunidad tecnológica y de negocio que lograron asumir y acaparar, con relativa rapidez, algunas de las empresas que ya habían desarrollado rutinas y capacidades en la construcción de motores térmicos, como La Maquinista, pero en la que también se hicieron un hueco jóvenes compañías muy especializadas en la nueva tecnología, como sucedió en el caso de los orígenes de la propia Hispano-Suiza. En cuanto comenzó la importación de los primeros motores de cuatro tiempos de Otto, por ejemplo, la

¹⁰² En 1882 había 284 talleres de construcción de maquinaria de todo tipo, especialmente en Barcelona, Valencia, Madrid y Andalucía, algunos capaces de construir motores.

¹⁰³ Entre 1884 y 1919, las compañías nacionales fabricaron 104 locomotoras, apenas el 4% del parque del último año citado.

Gasmotorenfabrik Deutz autorizó al comerciante Carlos Bloss a fabricar sus modelos en unos talleres de construcción mecánica en la entonces villa de Gracia, algo que se supone hacían ya en 1879 según un acta notarial presente en una de las patentes de la sociedad alemana.¹⁰⁴ De hecho, otros talleres *pirata* se dedicaron con rapidez a la fabricación de los nuevos motores violando los derechos de propiedad industrial, como sucedió en el caso del catalán Miguel Escuder, quien, además de construir y comercializar la nueva tecnología, pidió, incluso, dos patentes de introducción en 1878 por una *Máquina horizontal sistema Otto movida por el gas atmosférico* y por la *Construcción de una máquina sistema Otto vertical*¹⁰⁵ intentando aprovechar resquicios legales en la puesta en práctica de la patente original de Otto de 1876. A pesar de las demandas interpuestas por la Gasmotorenfabrik, los trámites judiciales se alargaron y parece que no lograron bloquear la fabricación (Carreras, Comas, Quera, y Calvo 1998, 243; Cabana 1992, 125-142). Aunque algo más tarde, La Maquinista también se lanzó a realizar motores de gas y combustión interna alternativos, de los cuales, según algunas fuentes, construyó unas 200 unidades bajo licencia Winterthur en las dos primeras décadas del siglo xx (Sudriá 2000, 223).¹⁰⁶ De todas maneras, buena parte del mercado siguió abasteciéndose directamente del exterior, negocio de importación e instalación al que se dedicaron varias compañías, como, por ejemplo, la Sociedad Anglo-Española de Motores, que, con sede en las Illes Balears, comercializó 256 máquinas Crosley entre 1904 y 1908 (Ortiz-Villajos 2005), período en el que únicamente La Hispano-Suiza fue capaz de desarrollar y producir diseños propios.

Respecto a las turbinas de vapor, sólo una empresa parecía estar en condiciones de fabricarlas a principios del siglo xx, según se desprende de la publicidad y catálogos de *Construcciones Mecánicas y Eléctricas* (empresa catalana creada en 1906 y sucesora de *Planas, Fla-*

¹⁰⁴ OEPM, Privilegio 5.694. En el acta notarial consta que la Fábrica de Motores de Gas de Deutz tenía establecida su industria en los talleres de Carlos Bloss, en la villa de Gracia, calle de Monmany, 34, donde, en 1879, se construían motores a gas.

¹⁰⁵ OEPM, Patentes 157 y 158. Fueron pedidas como patentes de invención por cinco años, que era la nueva denominación para las patentes de introducción en la Ley de 1878 (v. Saiz 1996, 94, art. 12).

¹⁰⁶ Sudriá hace referencia al primer motor de gas de Otto de 1870, aunque, probablemente, entre los 200 motores, hay ya modelos de todo tipo, incluyendo de gasógeno aspirado. Véase también Barca, Bernat, Castanyer, Espuñes, Fargas, Puig, y Torras (1992) y Garrabou (1982, 164).

quer y Cía.), que, además de una gran variedad de turbinas hidráulicas, negocio en el que estaba especializada, ofrecía la «turbina a vapor Electra» y afirmaba que era la *primera y única casa que construye en España turbinas a vapor*.¹⁰⁷ En este caso, y aunque la procedencia de estas turbomáquinas tiene más que ver, como sabemos, con la evolución desde las máquinas de vapor de pistón rotativo, la acumulación de destrezas y capacidades en la metalurgia y geometría de álabes para ingenios hidráulicos permitió a la compañía aprovechar con rapidez una oportunidad tecnológica que procedía de un axioma distinto al que estaba habituada, pero en el que podía tener ventajas comparativas derivadas de su trayectoria empresarial y nicho de trabajo y de la convergencia tecnológica en aleaciones, materiales y piezas adecuadas para el nuevo motor. Asimismo, entre las patentes sobre turbinas de vapor, algunas aparecen puestas en práctica en 1906 en los talleres de fundición y construcción de maquinaria de la *Sociedad Industrias Mecánicas Consolidadas* en la carretera de Port, en Barcelona, aunque ignoramos si, efectivamente, allí se llegaron a fabricar.¹⁰⁸ Por su parte, en 1909 la *Sociedad Española de Construcción Naval* había firmado un acuerdo con *The Spanish Parsons Marine Turbin Co. Ltd.* por el cual se cedía a la primera el derecho a fabricar turbinas Parsons, proceso que parece comenzó en la década de los veinte aunque de manera muy limitada pues las turbinas de vapor no se fabricaron de manera continua hasta que *Bazán* lo hizo en solitario en la década de los cuarenta (Valdaliso 1997, 323-324, n. 52).

Pocos inventores o constructores españoles de motores térmicos solicitaron protección por algún invento. En el cuadro 1.3 puede comprobarse que, entre 1826 y 1914, tan sólo un 17,6% de todas las patentes relacionadas fue pedido por solicitantes residentes en la Península, un porcentaje que se sitúa muy por debajo de la media de todo el sistema español de propiedad industrial que, aproximadamente entre las mismas fechas, era del 45% de residentes (Saiz 2002a, tabla 3). A pesar de que la fuerte dependencia tecnológica del exterior era algo habitual en los sectores de mayor complejidad técnica en la época —como sucedía, en general, en toda la industria de fabricación de bienes de equipo y construcción mecánica (Saiz

¹⁰⁷ Anuncio de la empresa reproducido en Nadal (2000b, 266).

¹⁰⁸ OEPM, Patentes 33.363, 33.538 y 33.591.

CUADRO 1.3: Patentes sobre máquinas térmicas según país de residencia del solicitante. España, 1826-1914
(porcentajes)

| | Máquinas alternativas de vapor | Máquinas de combustión interna alternativas* | Turbinas de vapor | Turbinas de gas | Total |
|----------------|--------------------------------|--|-------------------|-----------------|-------|
| Francia | 25,2 | 30,9 | 44,2 | 35,5 | 32,1 |
| España | 22,5 | 19,9 | 5,4 | 9,7 | 17,6 |
| Alemania | 10,6 | 15,5 | 12,1 | 6,5 | 13,5 |
| Reino Unido | 7,6 | 13,3 | 14,2 | 25,8 | 12,4 |
| Estados Unidos | 16,9 | 8,8 | 12,1 | — | 11,1 |
| Bélgica | 3,3 | 2,6 | — | — | 2,2 |
| Italia | 1,7 | 2,6 | 0,8 | — | 2,0 |
| Suiza | 1,0 | 1,1 | 3,8 | 19,4 | 2,0 |
| Holanda | 1,7 | 1,2 | 0,4 | — | 1,2 |
| Suecia | 1,0 | 0,7 | 2,9 | — | 1,2 |
| Resto | 8,6 | 3,4 | 4,2 | 3,2 | 4,8 |
| Núm. patentes | 302 | 729 | 240 | 31 | 1.302 |

* En las máquinas de combustión interna alternativa se incluyen los motores de aire caliente y los compresores alternativos.

Fuente: Base de datos de patentes sobre máquinas térmicas: Amengual (2004), apéndice en CD-ROM.

2002a, tabla 7)—¹⁰⁹ destaca el hecho de que más del 82% de los inventos sobre motores térmicos sea de extranjeros no residentes, un claro indicador de la total incapacidad innovadora nacional en esta actividad clave. La dependencia es aún mayor si consideramos varias cuestiones: primero, que, entre los solicitantes residentes, hay extranjeros establecidos (como Birkigt) que son titulares del 13,5% de las patentes de residentes; segundo, que, entre los españoles residentes, no sólo se protegen ideas propias, sino tecnologías extranjeras a través de *patentes de introducción* (un 10,6% de todas las patentes de españoles residentes), algo permitido por la legislación durante

¹⁰⁹ Puede comprobarse que, en general, la presencia de tecnología extranjera en las patentes relacionadas con la fabricación de bienes de equipo superaba el 70% entre 1826 y 1907, aunque este porcentaje proviene de sumar, a los inventos de no residentes, los de extranjeros residentes y las patentes de introducción de españoles (que siempre protegían tecnología exterior). Si hacemos este mismo ejercicio con los motores térmicos, la presencia de tecnología extranjera supera el 87%.

todo el siglo XIX y gran parte del XX y que fue utilizado en ocasiones, como sucedió en el caso de Escuder que acabamos de ver, y, tercero, que, exceptuando los avances y diseños que se han comentado en el punto anterior, las invenciones nacionales nunca tuvieron relevancia y constituyeron ideas incrementales aditivas y residuales sin influencia en paradigmas y trayectorias.

De esta manera, si sumásemos a todas las patentes de máquinas térmicas pedidas por extranjeros (residentes y no residentes) las de españoles pedidas como *de introducción*, la presencia de tecnología de algún modo procedente del exterior se acercaría al 87%. En el mismo cuadro 1.3 también se constata cómo la actividad inventiva española es mayor en las tecnologías cuyas trayectorias han superado el desarrollo básico en el período de estudio y se están implantando en el país —como los motores de vapor y de combustión interna alternativos— frente a los paradigmas que todavía están en las fases iniciales de crecimiento y cuya presencia es escasa en España —caso de las turbomáquinas, sin apenas patentes de residentes—. Esto es una prueba más de la debilidad científica y tecnológica nacional, en general incapaz de producir más que avances incrementales sobre tecnologías ya establecidas, y de su dependencia de los ritmos de innovación del exterior. Por otro lado, puede observarse que el camino fundamental de la transferencia de la información tecnológica fue Francia (32% de las patentes), lo cual no quiere decir que se tratase siempre de tecnología francesa, pero sí que llegaba a través de inversiones (las patentes lo son) de individuos y empresas residentes en el país vecino, algo que ya hemos destacado ampliamente en otros trabajos, lo mismo que la participación alemana, británica y estadounidense (en torno a un 12% de patentes sobre motores térmicos en cada caso), países seguidos más de lejos por Bélgica, Italia y Suiza (en torno al 2%) (Saiz 2002a, tabla 2 y comentarios; 2002b, 84-87). Esta distribución coincide bastante bien, por ejemplo, con los estudios disponibles sobre la estructura internacional del capital extranjero invertido en la economía española antes de la Primera Guerra Mundial, que, exceptuando la menor presencia norteamericana, reproduciría el orden descrito en las patentes (Tortella 2000, xi, xix y tablas 1 y 5).

Las patentes de máquinas térmicas solicitadas por residentes aparecen, además, fuertemente concentradas en Cataluña; más de

CUADRO 1.4: Patentes sobre máquinas térmicas de residentes según comunidades autónomas. España, 1826-1914
(porcentajes)

| Comunidad autónoma | Máquinas alternativas de vapor | Máquinas de combustión interna alternativas* | Turbinas de vapor | Turbinas de gas | Total |
|--------------------------|--------------------------------|--|-------------------|-----------------|-------|
| Cataluña | 38,2 | 80,2 | 55,6 | — | 66,1 |
| Madrid (Comunidad de) | 20,0 | 7,1 | 11,1 | — | 10,9 |
| País Vasco | 9,1 | 6,3 | 11,1 | 50,0 | 7,8 |
| Andalucía | 14,5 | 2,4 | 11,1 | — | 6,3 |
| Valenciana (Comunidad) | 7,3 | 0,8 | — | — | 2,6 |
| Murcia (Región de) | 5,5 | 0,8 | 11,1 | — | 2,6 |
| Castilla y León | 3,6 | 0,8 | — | — | 1,6 |
| Asturias (Principado de) | — | 0,8 | — | 50,0 | 1,0 |
| Aragón | — | 0,8 | — | — | 0,5 |
| Ultramar | 1,8 | — | — | — | 0,5 |
| Núm. patentes** | 55 | 126 | 9,0 | 2,0 | 192 |

* En las máquinas de combustión interna alternativa se incluyen los motores de aire caliente y los compresores alternativos.

** No se representan 37 patentes de residentes en el que se desconoce la provincia de residencia.

Fuente: Base de datos sobre máquinas térmicas: Amengual (2004), apéndice en CD-ROM.

lo que era habitual, pues, como se desprende del análisis del cuadro 1.4, el 66% fue pedido desde la mencionada comunidad cuando la media para todo el sistema de patentes estaba en torno a un 38%. Todas las patentes catalanas menos una se piden desde la provincia de Barcelona, lo que indica una especialización importante en la construcción de motores térmicos frente al resto de España y una distancia considerable respecto a las áreas que la siguen (Comunidad de Madrid con cerca del 11%, País Vasco con el 7,8 y Andalucía con un 6,3). Es significativo, también, cómo la concentración de las patentes en Barcelona es aún mayor cuando se trata de motores de combustión interna alternativos (más del 80%) y turbinas de vapor —los grupos de más *alta tecnología* del sector en la época de estudio— frente a las máquinas alternativas de vapor (38%), cuyas patentes aparecen mucho más diseminadas por otras provincias debido a que se trata de una tecnología más difundida, en fase de madurez y

cuya trayectoria ya se había completado antes de la Primera Guerra Mundial. En todo caso, el dominio catalán en el sector es abrumador, cosa que no podía ser de otra manera a tenor de la agrupación de fábricas y capital humano especializado en la construcción de motores en la región, algo que no debè nunca hacernos perder de vista la idea de la escasa capacidad innovadora nacional y de la fuerte dependencia tecnológica del exterior. Volvemos a insistir en que prácticamente todas esas patentes cubren aspectos incrementales aditivos y residuales generados por el efecto de arrastre de la fabricación de motores licenciados o copiados del extranjero. Alexander Hermanos o La Maquinista Terrestre y Marítima, por ejemplo, apenas registraron invenciones durante el período estudiado y pocas relacionadas con máquinas térmicas (de cuatro de Alexander, sólo dos, y, de cinco de La Maquinista, ninguna, aunque dos lo estarían indirectamente).¹¹⁰ Como puede comprobarse en el cuadro 1.5, sólo Hispano-Suiza y Birkigt destacan tanto en el número de patentes como en su relevancia. El afamado ingeniero registró seis avances sobre motores para su empresa, a lo que habría que sumar, antes de la Primera Guerra Mundial, otras 24 patentes relacionadas con otras partes de los automóviles, el producto sobre el que, en el fondo, estaba basado su negocio. En 1925 el número total acumulado de patentes de Birkigt y La Hispano ascendía ya a 72.

Además de las catalanas Hispano-Suiza y Alexander Hermanos, el resto de empresas residentes que registraron alguna patente (ellas o sus socios) directamente relacionada con máquinas térmicas está formado por siete sociedades barcelonesas, tres vascas y dos con sede en Madrid (cuadro 1.5); en general, compañías pequeñas con talleres de maquinaria diversa o dedicadas a otras cuestiones (por ejemplo, la Refinería de San Luis a la producción de azúcar,

¹¹⁰ Las patentes de Alexander Hermanos (OEPM, Privilegios 1.461 y 1.683 y patentes 841 y 863) fueron pedidas a título individual por los miembros de la empresa. Sólo el privilegio 1.683 por un *Sistema de máquinas de vapor de dos cilindros y condensación aplicable a la navegación* y la patente 863 por *Un aparato de expansión variable, movido directamente por el regulador, aplicable a cualquier sistema de máquinas* tienen que ver con máquinas térmicas. Respecto a La Maquinista Terrestre y Marítima (OEPM, Patentes 11.110, 18.521, 18.763, 42.496 y 42.580), ninguna de sus patentes es sobre máquinas térmicas aunque dos de ellas podrían estar indirectamente relacionadas: la 11.110 por *Un procedimiento para la condensación del vapor en el interior de un aparato cuyas paredes exteriores se hallan en contacto con la atmósfera* y la 42.496 por *Perfeccionamientos en los vaporizadores aplicados a los gasógenos de aspiración*.

CUADRO 1.5: **Empresas residentes con patentes sobre máquinas térmicas pedidas a nombre de la razón social o de sus socios. España, 1826-1914**

| Personas jurídicas | Lugar de residencia | MV | MClA | TV | TG | Total patentes |
|---|---------------------|----------|-----------|----------|----------|----------------|
| La Hispano-Suiza* | Barcelona | — | 6 | — | — | 6 |
| Bertrán Hermanos** | Barcelona | 1 | 2 | — | — | 3 |
| A. Sans y Compañía | Barcelona | — | 2 | — | — | 2 |
| Alexander Hermanos*** | Barcelona | 2 | — | — | — | 2 |
| Maquinaria Metalurgia Aragonesa**** | Zaragoza | — | 1 | — | 1 | 2 |
| A. Echevarría y Compañía | Pasajes | 1 | — | — | — | 1 |
| Bernabéu y Soldevila | Barcelona | — | 1 | — | — | 1 |
| F. S. Abadal y Compañía | Barcelona | — | 1 | — | — | 1 |
| Morgan and Eliot | Madrid | 1 | — | — | — | 1 |
| Pizzala y Crory | Barcelona | — | 1 | — | — | 1 |
| Refinería de San Luis | Barcelona | — | — | 1 | — | 1 |
| Sociedad Civil del Motor «Turbo» | Barcelona | — | 1 | — | — | 1 |
| Watt y Compañía | San Sebastián | — | 1 | — | — | 1 |
| Sociedad para el Establecimiento de la Compañía General de Transportes por Cochevapores | Madrid | 1 | — | — | — | 1 |
| Talleres Vizcaínos de Latonería | Bilbao | — | 1 | — | — | 1 |
| Total patentes | | 6 | 17 | 1 | 1 | 25 |

* Las patentes de Hispano-Suiza están a nombre de Marc Birkigt.

** Una patente fue pedida por Bertrán Hermanos, otra por Bertrán Hermanos y Gil Esteve y otra por Jaime y José Bertrán.

*** Las patentes de *Alexander Hermanos* están a nombre de Thomas y David Alexander y de Guillermo Alexander.

**** Las patentes de la Maquinaria Metalurgia Aragonesa están a nombre de su gerente Carlos Mendizábal.

Fuente Base de datos sobre máquinas térmicas: Amengual (2004), apéndice en CD-ROM.

Nota: MV: máquinas alternativas de vapor; MClA: motores de combustión interna alternativos (incluidos compresores alternativos y motores de aire caliente); TV: turbinas de vapor; TG: turbinas de gas.

Watt y Compañía a la electricidad y los Talleres Vizcaínos de Latonería, antes Talleres de Lequeitío, a la fontanería y calderería) y con una o dos patentes de escasa relevancia técnica que, muchas veces, eran solicitadas como *de introducción*. La más interesante desde la óptica de este trabajo quizá sea F. S. Abadal y Compañía, dedicada a la fabricación de automóviles y que registró numerosas invenciones sobre dispositivos y piezas de los mismos. Pero, quizá, lo más destacable del asunto sea la aglutinación de esta actividad empresarial, en general incremental aditiva, en torno al paradigma de los moto-

res de combustión interna alternativos (70% de los registros), lo mismo que sucede en el caso de los solicitantes individuales con tres o más patentes —en teoría, ingenieros y mecánicos dedicados profesionalmente a actividades inventivas en el sector técnico— que, como puede comprobarse en el cuadro 1.6, patentan, en un 90%, cuestiones relacionadas con la trayectoria de dichos motores. Esto indica el interés que esta tecnología ejercía sobre las empresas y sobre los profesionales más cualificados e inquietos, sin duda debido a que percibían en ella mayores «oportunidades tecnológicas» y económicas que en la madura trayectoria de las máquinas de vapor alternativas o en las todavía poco difundidas de las turbinas de vapor o de gas.

A pesar de lo dicho, y excepto Bloss y Escuder, a quienes conocemos como fabricantes del motor de Otto, las patentes del resto de profesionales del cuadro 1.6 tampoco fueron muy relevantes y no parece que tuvieran demasiado impacto industrial. Por ejemplo, el solicitante más prolífico, el ingeniero catalán Salvador Corbella —quien tiene, además, otros 28 registros relacionados con todo tipo de tecnologías— ni siquiera pagó la primera anualidad de la mayoría de las que tenían que ver con motores de explosión, que quedaron *sin curso* con rapidez. Juan Vilchez, por su parte, se movía entre Madrid, Segovia y Granada y sus patentes protegían motores de aire caliente, tecnología, como sabemos, sin solución de continuidad; Gabriel Rebollo era ingeniero de caminos con numerosos inventos sobre hormigón armado y forjado, sin duda de mayor éxito que sus cinco patentes sobre motores de explosión de dos tiempos de las que sólo pagó la primera anualidad; ingenieros eran igualmente el ovetense Francisco Vaz y el madrileño Francisco Sánchez, inventores de motores rotativos cuya protección también caducó muy rápido, y el resto trabajaba en talleres de la provincia de Barcelona, como el mecánico industrial Gil Esteve, asociado con Bertrán Hermanos y dedicado a los motores de gas. Sin duda, los casos más destacados son los de los mencionados Miguel Escuder Castellá, maquinista con fábrica de construcción en La Barceloneta, y Carlos Bloss Trautwein, comerciante alemán representante de la Gasmotorenfabrik Deutz que, al parecer, también abrió talleres en la villa de Gracia. Y destacan ambos, como se ha visto con anterioridad, no por sus invenciones, sino por sus pleitos acerca de la tecno-

CUADRO 1.6: Personas físicas residentes con tres o más patentes sobre máquinas térmicas. España, 1826-1914

| Personas físicas | Lugar de Residencia | MV | MCLA | TV | TG | Total patentes |
|------------------------------------|---------------------|----|------|----|----|----------------|
| Salvador Corbellá y Álvarez | Barcelona | 1 | 16 | — | — | 17 |
| Juan Vilchez Godoy | Madrid | 1 | 7 | — | — | 8 |
| Miguel Escuder Castellá | Barcelona | — | 5 | — | — | 5 |
| Gabriel Rebollo y Canales | Madrid | — | 5 | — | — | 5 |
| Carlos Bloss Trautwein | Barcelona | — | 4 | — | — | 4 |
| Francisco Vaz y Francisco Sánchez* | Huelva y Madrid | 3 | 1 | — | — | 4 |
| Francisco Bás Farré | Sabadell | — | 3 | — | — | 3 |
| Gil Esteve Vilá | Barcelona | — | 3 | — | — | 3 |
| Atilano Montemayor | Barcelona | — | 3 | — | — | 3 |
| Total patentes | | 5 | 47 | 0 | 0 | 52 |

* Francisco Vaz tiene una patente en solitario y tres con Francisco Sánchez.

Fuente: Base de datos sobre máquinas térmicas: Amengual (2004), apéndice en CD-ROM.

Nota: MV: máquinas alternativas de vapor; MCLA: motores de combustión interna alternativos (incluidos compresores alternativos y motores de aire caliente); TV: turbinas de vapor; TG: turbinas de gas.

logía de Otto, motores que Escuder se lanzó a fabricar y recomponer amparado en una legislación sobre patentes débil, diseñada para compaginar el fomento de la industrialización y de la fabricación nacional con la protección básica de los derechos de los inventores extranjeros.

Y es que el problema fundamental en España no era la existencia de un sistema de patentes endeble, sin examen previo de novedad, que exigía la puesta en práctica obligatoria —la fabricación en territorio nacional— en un período de entre uno y tres años so pena de caducidad o que permitía la *patente de introducción* (derechos monopolísticos sobre tecnologías de terceros que duraban cinco años pero que no bloqueaban la importación, al contrario que la patente de invención). Esto no es nuevo. Otros países europeos llegaron más allá y fueron verdaderos *piratas* durante gran parte del siglo XIX que ni siquiera tenían legislación sobre propiedad industrial (Suiza) o que la abolieron (Holanda) y que se dedicaron a la imitación y la copia hasta que lograron desarrollar nichos tecnológicos propios de especialización, momento en el que les interesó restablecer las leyes de patentes. Dadas las circunstancias de retraso de las

que se partía, lo lamentable en España ha sido, precisamente, la escasez de imitadores como Escuder capaces de fabricar en la frontera tecnológica de los paradigmas y trayectorias como paso previo a la especialización nacional. Los pocos constructores de motores térmicos que hemos visto jugaron sobre seguro y produjeron, como en el caso de La Maquinista, tecnología libre muy probada y, por tanto, anticuada, o, como mucho, tecnología licenciada que, en la mejor de las situaciones, contribuyó a mantener la dependencia tecnológica del exterior. Las debilidades institucionales no estaban sólo en el sistema de patentes —que podía cambiar y adaptarse a las nuevas circunstancias cuando fuese necesario, como sucedió en otros países—, sino, como hemos insistido, en el desinterés y casi desprecio social por la actividad innovadora, científica y tecnológica, en la falta de educación especializada y de calidad (no hay más que pensar con qué retraso y raquitismo se establecen las escuelas de ingenieros en nuestro país),¹¹¹ en la aversión al riesgo y en la incapacidad congénita para formar las bases de un auténtico sistema nacional de innovación. En estas circunstancias, los empresarios optaron por decisiones bastante lógicas: considerar la actividad inventiva e innovadora —como el carbón de piedra— un factor externo imposible de producir en España y que había que importar del exterior (la única excepción en este panorama podría ser el de Hispano Suiza). Esto era algo muy difícil de cambiar si tenemos en cuenta que los *sistemas de innovación*, como otras cuestiones institucionales, dependen fuertemente de las trayectorias seguidas en el pasado y exigen procesos ininterrumpidos de acumulación de conocimientos y actitudes cuyos resultados sólo son visibles a muy largo plazo.

Algunos datos ayudan a corroborar nuestra aseveración. De todas las patentes sobre máquinas térmicas registradas en España, menos del 30% llegó a superar los trámites de puesta en práctica (es decir, el 70% caducó muy rápidamente) y poco más del 13% duró más de cinco años (algo exagerado en la tecnología de las máquinas de vapor alternativas donde sólo un 6,6% superó esa duración durante el período estudiado). Esto quiere decir que la mayor parte de la tecnología podía haber sido reproducida sin demasiados problemas legales a corto plazo, por no hablar de la famosa *patente de intro-*

¹¹¹ Véanse las conclusiones sobre las debilidades de la enseñanza industrial en España en Cano Pavón (2001, 12: 335-351).

ducción, con la que implantar cualquier tipo de innovación exterior cuyo inventor se retrasase en el registro, o de un sistema judicial lento y poco ágil que, como en el caso de Escuder, parece que no fue muy proclive a impedir la fabricación nacional. Además, en muchas ocasiones, las empresas e inventores extranjeros patentaban sus motores no para fabricarlos, sino como paso previo al negocio de exportación de los mismos o, como mucho, a la difícil búsqueda de concesionarios nacionales capaces de producirlos, o distribuirlos e instalarlos, y con los que llegar a acuerdos. Dada la incapacidad de la industria nacional, la mayor parte de estas patentes, incluidas las radicales, se extinguió en poco tiempo y, aunque la propia existencia del privilegio caducado, las descripciones técnicas o la importación de la tecnología dificultaban que ésta pudiese volver a ser monopolizada mediante patentes de introducción, no era ilegal intentar fabricarla a costes razonables que permitieran competir con los productos importados de las empresas extranjeras o con los fabricados si decidían instalarse. Pero esto era lo difícil y el verdadero problema. En los motores de vapor alternativos —y con mucho retraso— se adquirieron capacidades suficientes para acercarse tecnológicamente a la frontera (lo mismo que en el caso de La Hispano Suiza), pero con tan poca flexibilidad que, en cuanto las condiciones del mercado cambiaban y aparecían nuevas sendas o trayectorias, la industria nacional —el sistema de innovación nacional— quedaba automáticamente fuera de juego. Dependencia de la tecnología extranjera y falta de capacidad y flexibilidad que, a juzgar por los trabajos de Valdalisio (1997, 328-329) con los motores diésel marinos en el siglo xx, ha sido una constante en el sector. Ni el giro proteccionista de finales del siglo xix, ni los intentos de favorecer a la industria española en las primeras décadas del novecientos —inicialmente positivos para ayudar al despegue— lograron cambiar demasiado esta tendencia tecnológica, aunque sí impulsaron el establecimiento de filiales extranjeras en territorio peninsular.

1.8. Conclusiones

Hace tiempo Solow (2000, 101-102) afirmó que la única manera de acercarse a una teoría *endógena* del crecimiento pasaba por un serio análisis de los determinantes de los procesos de innovación y cam-

bio técnico. En plena coincidencia con este planteamiento, Rosenberg (2000, 35 y 81) ha escrito que la contribución de los analistas interesados en la *endogeneidad* del avance técnico no puede quedarse sólo en ejercicios y modelos teóricos, sino que debe bajar al análisis empírico para rastrear y entender cómo se forma el *conocimiento* del que depende el cambio tecnológico, tarea para la que se hace necesario el *esfuerzo común de teóricos, historiadores e ingenieros*. A lo largo de las anteriores páginas hemos pretendido, precisamente, unir, al corpus teórico de la economía evolutiva, el análisis empírico de la ingeniería industrial y de la historia económica para intentar averiguar y comprender qué cuestiones determinan el progreso de un árbol tecnológico muy concreto: el de las máquinas térmicas, un conjunto de motores de amplia adaptabilidad o espectro sobre el que ha descansado buena parte de la mecanización industrial de los dos últimos siglos. Junto con ello se ha pretendido reflexionar también sobre el proceso de adopción de estas innovaciones en España, sobre el nacimiento y primer desarrollo de una industria nacional de fabricación de motores térmicos y sobre sus características, actitudes y capacidades de innovación.

Las máquinas térmicas tienen conexiones comunes que descansan sobre determinadas premisas científicas y técnicas que dan lugar a lo que hemos denominado *axioma tecnológico* termodinámico. El análisis ingenieril sugiere la existencia, en este axioma, de cuatro *paradigmas* principales suficientemente diferenciados que evolucionarían en *trayectorias* tecnológicas amplias y claras, en el sentido expuesto por Dosi (1982; 1984, 2.2; 1988):¹¹² las máquinas de vapor alternativas, los motores de combustión interna alternativos, las turbinas de vapor y las turbinas de gas. El estudio empírico de la evolución de estos cuatro paradigmas y trayectorias ha sido realizado seleccionando y trabajando en detalle todas y cada una de las 1.302 patentes sobre motores térmicos solicitadas en España entre 1826 y 1914, más algunas muy relevantes registradas en Alemania, Francia, Reino Unido y Estados Unidos. La primera conclusión a la que hemos llegado es que, como la historiografía evolutiva ha destacado, pueden distinguirse claramente dos fuerzas complementarias que rigen el progreso tecnológico de los motores térmicos: la de unas pocas in-

¹¹² Véase nota 35.

venciones *radicales* o mutaciones que generan, en alguna medida y sentido, discontinuidad y nuevos conocimientos que dan lugar a los primeros especímenes que forman el paradigma, y la del racimo de numerosas invenciones *incrementales* (algunas principales y otras aditivas y residuales) que van haciendo avanzar de manera continua, gradual y lenta su trayectoria, a lo largo de la cual se produce la adaptación económica y social de la tecnología y su mayor impacto sobre el crecimiento.

De estas dos fuerzas primaría, sin duda, la continuidad, pues prácticamente todas las invenciones radicales cuentan con antecedentes que permitirían encadenar unas trayectorias con otras y discernir con bastante claridad *direcciones* evolutivas. La trayectoria de las máquinas alternativas de vapor inaugurada por la máquina de Newcomen procede de los siglos xvii y xviii (Ayanz, Savery, Papin) y, en ella, se van acumulando conocimientos y capacidades que permiten bifurcaciones adaptativas dentro del paradigma (Watt, Corliss) y, también, la existencia de «trampolines de conocimiento» desde los que, en determinadas circunstancias, saltar y mutar, como sucedió con los motores de aire caliente (Stirling, Ericsson) y, desde éstos, con los de combustión interna de gas (Lenoir) y los de cuatro tiempos (Otto, Diesel) o con las máquinas de vapor de pistón rotativo y el salto a las turbinas de vapor (Parsons, De Laval) y, luego, a las turbinas de gas (ciclo teórico de Brayton, Elling, Whittle). La descripción de los enlaces técnicos de este *árbol familiar* que hemos realizado en el texto no significa que neguemos la existencia de la discontinuidad, especialmente en determinados momentos en los que la constante y normal irradiación de bifurcaciones adaptativas, variantes sectoriales y *rutas tecnológicas* dentro de un mismo paradigma se completa, con mayor frecuencia, con irradiaciones mutantes que se apartan de la trayectoria original para generar paradigmas distintos, como parece suceder en el axioma de las máquinas térmicas en el último tercio del siglo xix y en las primeras décadas del xx, cuando aparecen y quedan realmente definidas la combustión interna alternativa, las turbinas de vapor y las turbinas de gas, justo en el momento de los grandes cambios de toda índole característicos de la llamada *segunda revolución industrial*. Se trataría, por tanto, más de un *equilibrio puntuado* al estilo de Eldredge y Gould (1972), con períodos de mayor actividad mutante y otros de desarrollo más esta-

ble y continuo, que sólo de una evolución gradual al estilo darwinista. En todo caso, hay que tener siempre presente las diferencias entre la evolución orgánica y la tecnológica, pues, en esta última, la influencia del entorno institucional (en su más amplia dimensión) hace posible cruces, extinciones o retroalimentaciones inviables en la vida natural. Por otro lado, las instituciones, las capacidades de las empresas, las sociedades y sus ideologías también siguen trayectorias evolutivas que coaccionan con las dinámicas técnicas y científicas, lo que nos conduce a un escenario de gran complejidad que asumimos pero que es muy difícil abordar de manera empírica si no es diseccionando alguno de sus elementos.

El estudio del sistema español de patentes entre 1826 y 1914 ha sido suficiente para constatar la mencionada evolución de las trayectorias de las máquinas térmicas, pues, a pesar del atraso y la dependencia tecnológica de la economía española, es posible encontrar registradas casi todas las invenciones radicales en cada paradigma, así como conjuntos de invenciones incrementales que las desarrollan, aunque con peculiaridades derivadas del período analizado en el que queda fuera la fase inicial del desarrollo de las máquinas alternativas de vapor y gran parte del de las turbinas de gas. Por otro lado, las ventajas de utilizar esta fuente han sido evidentes a la hora de reflexionar sobre las características del *sistema español de innovación* y su participación en la evolución tecnológica de los motores térmicos, algo que nos interesa en especial dadas las tradicionales debilidades científicas y tecnológicas del país. Las conclusiones, aunque esperadas e incluso lógicas desde un punto de vista económico, no dejan de ser «moralmente» decepcionantes: la participación española en el establecimiento de los distintos paradigmas o en la dirección de sus trayectorias es prácticamente nula. Las excepciones (la bomba de vapor de Ayanz, algunas máquinas de pistón rotativo como la de Fombuena, el motor de gas de Arbós, o los diseños de Hispano-Suiza) son clavos ardiendo a los que agarrarse —casi folclóricos— para no resaltar únicamente la incapacidad innovadora de una industria tardía y dependiente en la que se muestra en majestad la extraordinaria debilidad del sistema de innovación. La fabricación de motores fue una actividad que tardó en aparecer, que surgió en respuesta a la demanda de mantenimiento de las máquinas importadas del exterior, que no parece haber tenido

intención de desarrollar habilidades innovadoras propias durante el período estudiado y que siempre dependió del avance tecnológico exterior. La distribución de las patentes por país de residencia del solicitante lo demuestra con claridad, pues se trata de uno de los sectores técnicos con menor porcentaje de inventores establecidos en la Península, muy concentrados, por lo demás, en la única zona dinámica en la materia: Barcelona. La mayoría de los talleres especializados tenía en esta provincia su domicilio y allí estaba asentada, por ejemplo, la excepción en este panorama de dependencia técnica: *La Hispano-Suiza*, probablemente la única empresa —y más debido a lo suizo que a lo hispano— que logró sobrepasar la frontera tecnológica en la trayectoria de los motores de combustión interna alternativos.

Y es que, incluso a la hora de copiar, de imitar, que es para lo que estaba en gran medida diseñado el sistema español de patentes, el retraso y la incapacidad son manifiestos. La imitación es un paso previo y necesario para acumular conocimientos, capacidades y rutinas innovadoras, algo que, si va acompañado de refuerzos institucionales en la educación, en la investigación científica y tecnológica, etcétera, puede acabar fomentando la aparición de nichos propios de especialización y desarrollo técnico, como en general ha sucedido y sucede en otros países imitadores y seguidores a largo plazo. Esto es lo que ha sido anormal en España y lo que nos conduce, de lleno, al centro del problema: el fracaso en el desarrollo de un verdadero sistema nacional de innovación, un fracaso que es más institucional y social que económico y empresarial, aunque, como es evidente, son ámbitos estrechamente relacionados. En la trastienda histórica de ese fracaso se encuentran las grandes deficiencias del sistema educativo, la exclusión de la ciencia y la tecnología de la agenda política y un desinterés colectivo por el tema, que es reflejo directo de una estructura de valores sociales completamente alejada de la innovación. La profunda crisis del siglo xvii nos dejó fuera de la revolución científica, la crisis del Antiguo Régimen y la larga y lenta transición al liberalismo acabó con los intentos ilustrados por recuperar posiciones en el nuevo orden tecnológico y económico y, por último, la Guerra Civil y la dañina autarquía remataron la lenta progresión del primer tercio del siglo xx dejando un sistema de innovación parálítico para el resto de la centuria. No obstante, España ha logrado introducirse en el selecto club de naciones desarrolla-

das, lo que demuestra que, incluso sin un factor tan importante como la capacidad de innovación, es posible converger aprovisionándose en el exterior y buscando otras ventajas comparativas. Y esto nos conduce a preguntarnos dos cuestiones: la primera, si, en una Europa probablemente unida y en una economía global con altos índices de división internacional del trabajo, merece la pena la fuerte inversión que sería necesaria para establecer un verdadero sistema de innovación e, incluso, si esto es posible dada la necesidad de acumular conocimientos y habilidades a largo plazo y dados el estado del sistema educativo en España y la estructura de valores sociales, que, parece, siguen apuntando hacia otro sitio; la segunda, y en caso de que la respuesta a la anterior sea negativa, ¿cuáles serán las ventajas comparativas de la economía española a medio plazo?

Bibliografía

- ABRAMOVITZ, M. «Research and Output Trends in the United States since 1870». *American Economic Review*, Papers and Proceedings (1956): 5-23.
- AGUSTÍ I CULLELL, J. *Ciència i tècnica a Catalunya en el segle XVIII: la introducció de la màquina de vapor*. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans, 1983.
- AMENCUAL MATAS, R. R. «Análisis de la evolución histórica de las máquinas térmicas durante el período 1826-1914 a través de las patentes españolas de la época». Tesis doctoral inédita, Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Industriales, Madrid, 2004.
- ANDERSEN, B. *Technological Change and the Evolution of Corporate Innovation. The Structure of Patenting, 1880-1990*. Cheltenham, Northampton: Edward Elgar, 2001.
- BARCA, F., P. BERNAT, F. CASTANYER, F. ESPUÑES, M. FARGAS, C. PUIG, y M. TORRAS (Sección de Historia de la Técnica de la *Societat Catalana d'Historia de la Ciència i de la Tècnica*). «Jaume Arbós i Tor, un científic oblidat: gas y gasogens a la Catalunya del Segle XIX». En *Trobades de Historia de la Ciencia y de la Técnica de Peñíscola* (diciembre de 1992), 1992.
- BASALLA, G. *La evolución de la tecnología*. Barcelona: Crítica, 1990.
- BOLLAND, O., y T. VEER. «Centenary of the first gas turbine to give net power output: A tribute to Aegidius Elling». En *ASME-IGTI TurboExpo Conference* (16-19 de junio de 2003), Atlanta, 2003.
- BUCKLAND, J. S. P. «Thomas Savery. His Steam Engine Workshop of 1702». *The Newcomen Society for the Study of the History of Engineering and Technology Transactions*. Vol. 56. Londres, 1986: 1-20.
- CABANA, F. *Fàbriques i empresaris. Els protagonistes de la Revolució Industrial a Catalunya. Metal·lúrgics Químics*. Barcelona: Enciclopèdia Catalana, 1992.
- CANO PAVÓN, J. M. *Estado, enseñanza industrial y capital humano en la España Isabelina (1833-1868). Esfuerzos y fracasos*. Málaga: Imprenta Montes, 2001.
- CANTWELL, J. *Technological Innovation and Multinational Corporations*. Oxford, Cambridge: Basil Blackwell, 1989.

- CARNOT, S. *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. París: Chez Bachelier Libraire, 1824.
- CARRERAS, R., A. COMAS, M. QUERA, y A. CALVO. *Máquinas térmicas*. Tarrasa: Laboratorio de Motores Térmicos y Automóviles, ETSI Industriales, Universidad Politécnica de Cataluña, 1998.
- CASANELLES, E. «L'estatoreactor de Ramon Casanova i Danés». En J. Maluquer de Motes, dir. *Tècnics i tecnologia en el desenvolupament de la Catalunya Contemporània*. Barcelona: Enciclopèdia Catalana, 2000: 326-329.
- CAYÓN, F., E. FRAX, M. J. MATILLA, M. MUÑOZ, y J. P. SAIZ. *Vías paralelas. Invención y ferrocarril en España (1826-1936)*. Madrid: Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Luna, 1998.
- COHEN, H., G. F. C. ROGERS, y H. I. H. SARAVANAMUTTOO, *Teoría de las turbinas de Gas*. Barcelona: Marcombo Boxareu, 1983.
- CUMMINS, C. L. *Internal Fire*. Warrendale: Society of Automotive Engineers, 1989.
- DAUMAS, M., J. GUÉRON, A. HERLÉA, R. MOÏSE, y J. PAYEN. *Histoire Générale des Techniques*. Tomo IV. *Les Techniques de la Civilisation Industrielle, Énergie et matériaux*. París: Presses Universitaires de France, 1978.
- DAVID, P. A. *Technical Choice, Innovation and Economic Growth: Essays on British and American Experience in the Nineteenth Century*. Londres, Nueva York: Cambridge University Press, 1975.
- . «Clio and the Economics of QWERTY». *American Economic Review* LXXV-2 (1985): 459-467.
- . «Understanding the Economics of QWERTY: the Necessity of History». En W. N. Parker, ed. *Economic History and the Modern Economist*. Oxford: Basil Blackwell, 1986, 30-49.
- . *Path-Dependence: Putting the Past into the Future of Economics*. Technical Report núm. 533, Institute of Mathematical Studies in the Social Science, Stanford University, 1988a.
- . *The Future of Path-Dependence Equilibrium Economics. From the Economics of Technology to the Economics of Almost Everything?* Center for Economic Policy Research, Stanford University, 1988b.
- DAY, J. *Engines. The Search for Power*. Londres: The Hamlyn Publishing Group Limited, 1980.
- DIXON, S. L. *Mecánica de Fluidos, Termodinámica de las Turbomáquinas*. Madrid: Dossat, 1981.
- DOSI, G. «Technological Paradigms and Technological Trajectories: A Suggested Interpretation of the Determinants and Directions of Technological Change». *Research Policy* 11, 3 (1982): 147-162.
- . *Technical Change and Industrial Transformation: The Theory and an Application to the Semiconductor Industry*. Londres: MacMillan, 1984.
- . «The Nature of the Innovation Process». En G. Dosi, C. Freeman, R. R. Nelson y G. Silverger, eds. *Technical Change and Economic Theory*. Londres: Pinter Publishers, 1988: 221-238.
- ELDRIDGE, N., y S. J. GOULD. «Punctuated equilibria: an alternative to phyletic gradualism». En T. J. M. Schopf, ed. *Models in paleobiology*. San Francisco: Freeman, Cooper and Co., 1972: 82-115.
- FATJÓ GÓMEZ, P. «Els primers temps de la indústria automobilística». En J. Maluquer de Motes, dir. *Tècnics i tecnologia en el desenvolupament de la Catalunya Contemporània*. Barcelona: Enciclopèdia Catalana, 2000: 330-337.
- FERNÁNDEZ DE PINEDO, N. *Comercio exterior y fiscalidad: Cuba 1794-1860*. Bilbao: UPV, Economía y Empresa, 2002.

- FREEMAN, C. *Technology and Economic Performance: Lessons from Japan*. Londres: Pinter Publishers, 1987.
- , y C. PÉREZ. «Structural Crises of Adjustment, Business Cycles and Investment Behaviour». En G. Dosi, C. Freeman, R. R. Nelson y G. Silverger, eds. *Technical Change and Economic Theory*. Londres: Pinter Publishers, 1988, 38-66.
- , J. CLARK, y L. SOETE. *Unemployment and Technical Innovation*. Londres: Frances Pinter Publisher, 1982.
- FRENKEN, K., y A. NUVOLARI. «The Early Development of the Steam Engine: An Evolutionary Interpretation Using Complexity Theory», *Industrial and Corporate Change* 13-2 (2004): 419-450.
- GARCÍA TAPIA, N. *Patentes de invención españolas en el Siglo de Oro*. Madrid: Registro de la Propiedad Industrial, Ministerio de Industria y Energía, 1990.
- . «Some Designs of Jerónimo de Ayanz (c. 1550-1613) Relating to Mining, Metallurgy and Steam Pumps». *History of Technology* 14 (1993): 135-149.
- . *Un inventor navarro: Jerónimo de Ayanz y Beaunont 1553-1613*. Pamplona: Gobierno de Navarra, Institución Príncipe de Viana, 2001.
- . «La ingeniería». En J. M. López Piñero, dir. *Historia de la Ciencia y de la Técnica en la Corona de Castilla, III. Siglos XVI y XVII*. Valladolid: Junta de Castilla y León, 2002.
- GARRABOU, R. *Enginyers industrials, modernització econòmica i burgesia a Catalunya (1850-inicis del segle XX)*, Barcelona: L'Avenç, 1982.
- GONZÁLEZ TASCÓN, I., dir. *Betancourt. Los inicios de la ingeniería moderna en Europa*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Medio Ambiente, 1996.
- GRILICHES, Z. «Patent Statistics as Economic Indicators: A Survey». *The Journal of Economic Literature*, XXVIII-4 (1990): 1661-1707.
- HELGUERA, J., y J. TORREJÓN. «La introducción de la máquina de vapor». En F. J. Ayala-Carcedo, dir. *Historia de la tecnología en España*. Barcelona: Valatenea, 2001.
- KEIRSTEAD, B. *The Theory of Economic Change*. Toronto: Macmillan, 1948.
- KROEBER, A. L. *Anthropology*. Nueva York: Harcourt Brace Jovanovich, Inc., 1948.
- KUZNETS, S. S. *Secular Movements in Production and Prices. Their Nature and Their Bearing Upon Cyclical Fluctuations*. Boston: Houghton Mifflin Co., The Riverside Press, 1930a.
- . «Equilibrium Economics and Business Cycle Theory». *The Quarterly Journal of Economics* 44 (1930b): 381-415.
- . «Schumpeter's Business Cycles». *American Economic Review* XXX-2 (1940): 250-271.
- LAGE, M. *Hispano-Suiza/Pegaso. Un siglo de camiones y autobuses*. Barcelona: Lunweg Editores, 1992.
- . *Hispano-Suiza 1904-1972. Hombres, empresas, motores y aviones*. Madrid: Lid Editorial Empresarial, 2003.
- LÓPEZ, S., y J. M. VALDALISO. «Introducción: hacia una historia económica evolutiva». En S. López y J. M. Valdaliso, eds. *¿Que inventen ellos? Tecnología, empresa y cambio económico en la España contemporánea*. Madrid: Alianza Universidad, 1997a.
- . «Pauta de innovación y niveles de acercamiento tecnológico: una reflexión teórica aplicada al caso de la industria de motores Diesel marinos en España». En *VI Jornadas de Investigación sobre las relaciones entre Ciencia, Tecnología y Sociedad (RICTES)*. Madrid (6-7 de noviembre de 1997), 1997b.
- . «Prólogo a la edición española». En R. N. Langlois y P. L. Robertson, *Empresas, mercados y cambio económico*. Barcelona: Proyecto A Ediciones, 2000a.
- . *Historia económica de la empresa*. Barcelona: Crítica, 2000b.

- LÓPEZ GARCÍA, S. «De exploración con Schumpeter». En S. López y J. M. Valdaliso, eds. *¿Que inventen ellos? Tecnología, empresa y cambio económico en la España contemporánea*. Madrid: Alianza Universidad, 1997.
- MEHER-HOMJI, C. B. «The Development of the Whittle Turbojet», *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Transactions of the ASME* 120 (1998): 249-256.
- MOKRY, J. «Demand vs. Supply in the Industrial Revolution», *The Journal of Economic History* 37 (1977): 981-1008.
- *La balanza de la riqueza. Creatividad tecnológica y progreso económico*. Madrid: Alianza, 1993.
- MUÑOZ TORRALBO, M., M. VALDÉS, y M. MUÑOZ DOMÍNGUEZ. *Turbomáquinas Térmicas. Fundamentos del Diseño Termodinámico*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Industriales, 2001.
- NADAL, J. «La metal·lúrgia. De les reparacions mecàniques a les construccions metàl·liques». En J. Nadal, J. Maluquer de Motes, C. Sudrià, y F. Cabana, dirs. *Història econòmica de la Catalunya contemporània*. Vol. 3. S. XIX. *Indústria, transports i finances*. Barcelona: Enciclopèdia Catalana, 1991, 159-202.
- «1.ª revolución tecnológica». En J. Nadal, A. Carreras y P. Aceña, *España. 200 años de tecnología*. Madrid: Ministerio de Industria y Energía, 1998.
- «Las máquinas de vapor fijas de la Maquinista Terrestre y Marítima, S. A.». *Revista de Historia Industrial* 16 (1999): 115-161.
- «Josep Bonaplata i l'adopció de la màquina de vapor». En J. Maluquer de Motes, dir. *Tècnics i tecnologia en el desenvolupament de la Catalunya Contemporània*. Barcelona: Enciclopèdia Catalana, 2000a: 210-219.
- «Els Planas, constructors de turbines i material elèctric». En J. Maluquer De Motes, dir. *Tècnics i tecnologia en el desenvolupament de la Catalunya Contemporània*. Barcelona: Enciclopèdia Catalana, 2000b, 256-267.
- NELSON, R. R., y S. WINTER. «In Search for a Useful Theory of Innovation». *Research Policy* 6-1 (1977): 36-76.
- , y S. WINTER, *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Cambridge, Londres: The Belknap Press of Harvard University Press, 1982.
- NUVOLARI, A. «Collective invention during the British Industrial Revolution: the Case of the Cornish pumping engine». *Cambridge Journal of Economics* 28 (2004): 347-363.
- OMPI. *Clasificación Internacional de Patentes*. 7.ª edición. Ginebra: OMPI, 2000.
- ORTIZ-VILLAJOS, J. M. «Patents and Other Ways of Innovation. Their Role in the Introduction of Steam Power in Spain (1850-1900)». En *SHOT Meeting* (7 al 10 de octubre). Amsterdam, 2004.
- «La Sociedad Anglo-Española de Motores. Auge y ocaso de la moderna industria metal-mecánica en Menorca, 1902-1911». En *VIII Congreso de la AEHE. Sesión B3: Del metal al motor* (13-16 de septiembre). Santiago de Compostela, 2005 (publicado en este mismo libro).
- PARSONS, N. C., C. ENG, y F. I. MECH. «Sir Charles Parsons: A Symposium to Commemorate the Centenary of his Invention of the Steam Turbine and Electric Generator». *The Newcomen Society for the Study of the History of Engineering and Technology Transactions*. Vol. 56 (1986): 21-58.
- PÉREZ, C. «Technological Revolutions, Paradigm Shifts and Socio-Institutional Change». En E. Reinert, ed. *Globalization, Economic Development and Inequality: An Alternative Perspective*. Cheltenham: Edward Elgar, 2004: 217-242.
- POLO, E. *La Hispano-Suiza. Los orígenes de una leyenda 1899-1915*. Madrid: Wings and Flags, 1994.

- POLO, E. *La Hispano-Suiza. El vuelo de las cigüeñas 1916-1931*. Madrid: Wings and Flags, 1999.
- RIERA, S. *Dels velers als vapors*. Barcelona: Boizareu Editors, 1993.
- . *Quan el vapor movia els trens: la fabricació de locomotores per La Maquinista Terrestre y Marítima*, Barcelona. AEIC, 1998.
- ROLT, L. T. C., y J. S. ALLEN. *The Steam Engine of Thomas Newcomen*. Hartington: Moorland Publishing Company, 1977.
- ROSENBERG, N. *Perspectives on Technology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1976.
- . *Inside the Black Box. Technology and Economics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- . *Schumpeter and the Endogeneity of Technology: Some American Perspectives*. Londres, Nueva York: Routledge, 2000.
- SAIZ GONZÁLEZ, J. P. *Propiedad industrial y revolución liberal. Historia del sistema español de patentes*. Madrid: OEPM, 1995.
- . *Legislación histórica sobre propiedad industrial*. Madrid: OEPM, 1996.
- . *Invencción, patentes e innovación en la España contemporánea*. Madrid: OEPM, 1999a.
- . «Patentes, cambio técnico e industrialización en la España del siglo XIX». *Revista de Historia Económica* 2 (1999b): 265-302.
- . «The Spanish Patent System (1770-1907)». *History of Technology* 24 (2002a): 45-79.
- . «Los orígenes de la dependencia tecnológica española. Evidencias en el sistema de patentes. 1759-1900». *Economía Industrial* 343 (2002b): 83-95.
- SCHMOOKLER, J. «Economic Sources of Inventive Activities». *The Journal of Economic History* (marzo 1962): 1-20.
- . *Invention and Economic Growth*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1966.
- . *Patents, Invention and Economic Change*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1972.
- SCHUMPETER, J. A. *Business Cycles. A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. Nueva York, Londres: McGraw-Hill, 1939.
- SINGH, R. *Civil Aero Gas Turbines: Technology and Strategy*. Swindon (UK): Cranfield University, 2001.
- SOLOW, R. «Technical Change and the Aggregate Production Function». *Review of Economics and Statistics* (1957): 312-320.
- . *Growth Theory: An Exposition*. Nueva York, Oxford: Oxford University Press, 2000.
- SUDRIÀ, C. «El gas d'hulla, d'innovació decisiva a tecnologia marginal». En J. Maluquer de Motes, dir. *Tècnics i tecnologia en el desenvolupament de la Catalunya Contemporània*. Barcelona: Enciclopèdia Catalana, 2000: 220-227.
- SULLIVAN, R. J. «The Revolution of Ideas: Widespread Patenting and Invention during the English Industrial Revolution». *The Journal of Economic History* 50-2 (1990): 349-362.
- THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. «The World's First Industrial Gas Turbine Set at Neuchâtel (1939)». En *An International Historic Mechanical Engineering Landmark*, Neuchâtel, 1988.
- TORREJÓN, J. «Innovación tecnológica y reducción de costes: las máquinas de vapor en los arsenales de la marina española del siglo XVIII». En *VII Simposio de Historia Económica. Cambio tecnológico y desarrollo económico* (15 y 16 de diciembre: 179-190). Bellaterra: Universidad Autónoma de Barcelona, 1994.
- TORTELLA, T. *A Guide to Sources of Information on Foreign Investment in Spain, 1780-1914*. Amsterdam: International Institute of Social History, 2000.
- VALDALISO, J. M. «La evolución del cambio técnico en la flota mercante española en el siglo XX: tecnologías disponibles y factores condicionantes». En S. López, y J. M. Valdalis, eds. *¿Que inventen ellos? Tecnología, empresa y cambio económico en la España contemporánea*. Madrid: Alianza Universidad, 1997.
- VEGARA, J. M. *Ensayos económicos sobre innovación tecnológica*. Madrid: Alianza, 1989.