

# LA TRANSFERENCIA A ESPAÑA DE LOS CONOCIMIENTOS TÉCNICOS SOBRE EL DESAZUFRAO DEL CARBÓN DE PIEDRA Y LA OBTENCIÓN DE COQUES Y BREAS HASTA 1790

The transfer of technical knowledge on the stone coal purification  
and the obtaining of coke and pitch to Spain until 1790

LUIS AURELIO GONZÁLEZ PRIETO<sup>1</sup>, PELAYO GONZÁLEZ-PUMARIEGA SOLÍS<sup>2</sup>  
& DAVID GONZÁLEZ PALOMARES<sup>2</sup>

1. Real Instituto de Estudios Asturianos (RIDEA)  
2. Universidad de Oviedo

## *Resumen*

En la segunda mitad del siglo XVIII Gran Bretaña revolucionó el uso de las fuentes de energía al sustituir el carbón de leña por el mineral en los usos domésticos e industriales. Para ello se tuvieron que ensayar diferentes técnicas destinadas a eliminar las materias perjudiciales que este último contenía, fundamentalmente azufre y betunes, lográndose extraer subproductos con alto valor estratégico para la industria naval: breas y alquitranes.

Empleando de forma empírica el carbón mineral depurado para producir hierro colado abundante y barato, los británicos lideraron la primera Revolución Industrial y dotaron a sus Ejércitos de armamento económicamente más asequible. Fue entonces cuando muchos técnicos y naturalistas continentales se interesaron por las nuevas tecnologías. Francia puso el mayor empeño en determinar el fundamento científico de estos procesos. No lo logró, pero las publicaciones de sus técnicos propiciaron la transferencia tecnológica al continente.

España no prestó atención a la depuración del carbón de piedra hasta el último cuarto del siglo XVIII. Los sucesivos gobiernos promovieron el espionaje industrial y la contratación de técnicos en el extranjero, a la vez que se crearon multitud de sociedades económicas de amigos del país entre cuyos fines se encontraban el fomento y difusión de los conocimientos sobre las nuevas técnicas, pero no concurren las circunstancias necesarias para que se produjeran avances significativos.

*Recibido: 22/12/2021 – Aceptado: 12/02/2022*

<https://doi.org/10.47101/llull.2022.45.91.gonzalez.prieto>

## **Abstract**

In the second half of the 18th century, Great Britain revolutionized the use of energy sources by replacing charcoal for mineral coal in domestic and industrial uses. To do this, different techniques had to be tested to eliminate the harmful materials that the latter contained, mainly sulfur and bitumens, while by-products with a high strategic value for the shipbuilding industry, pitch and tar, were extracted.

By empirically employing purified mineral coal to produce abundant and cheap cast iron, the British were able to lead the first Industrial Revolution and provide their armies with more affordable weaponry. It was then that many continental technicians and naturalists became interested in new technologies. France was the country that tried hardest to determine the scientific basis of these processes. It did not succeed, but the publications of its technicians led to the transfer of technology to the continent.

In Spain, no attention was paid to the purification of mineral coal until the last quarter of the 18th century. The government promoted industrial espionage and the hiring of technicians abroad, while many economic societies of friends of the country were created to encourage and disseminate knowledge about the new techniques, but the necessary circumstances to achieve significant advances were not present.

*Palabras clave:* Desazufrado del carbón, horno de destilación de carbón, obtención de coques y breas.

*Key words:* Coal purification, coal distillation furnace, obtaining cokes and pitches.

## **1. EL ORIGEN DEL USO INDUSTRIAL DEL CARBÓN DESAZUFRAO EN GRAN BRETAÑA**

### **1.1. Crisis energética y primeros intentos de desazufrado y destilación del carbón mineral**

A finales del siglo XVI, la gran cantidad de usos industriales y domésticos en los que se empleaban las leñas y maderas en Gran Bretaña comenzó a producir la sobreexplotación de sus bosques [MANTOUX, 1906, p. 281]. Dada la inelasticidad inherente a la producción del carbón vegetal, el incremento de la demanda provocó un rápido incremento del precio de este producto y puso en peligro el rendimiento futuro de los montes, al desbordar las talas abusivas su capacidad de regeneración. Resultaba imprescindible, pues, buscar una nueva fuente de energía alternativa y barata que fuera capaz de evitar la grave crisis energética a la que se veía abocado el país [NEF, 1977].

La solución la proporcionó el carbón mineral, recurso del que existían abundantes yacimientos.<sup>1</sup> Sin embargo, la utilización del carbón en crudo, según se extraía de las minas,

---

1. El carbón mineral es una roca sedimentaria combustible, formada a partir de restos fósiles de plantas descompuestas y consolidadas bajo terrenos de cobertura. Véase [AENOR, 1990]. El tipo de materia orgánica de partida y la intensidad de las transformaciones posteriores condicionan las características y propiedades del carbón, así como los usos industriales a los que se podrá destinar.



Figura 1. Preparación del carbón de leña [DUHAMEL, 1761, p.51]

no era compatible con los usos domésticos e industriales, ya que contenía una serie de impurezas —azufre, betunes, piritas, etc.— que lo hacían inservible. En los hogares exhalaba humos de olor muy desagradable, que podían llegar a producir graves intoxicaciones e incluso la muerte por asfixia de quienes los inhalaban [MOSLEY, 2014, p.147]. A su vez, al emplearlo en los hornos de fundición de hierro, el producto resultante era friable y, por lo tanto, inútil, de manera que únicamente se utilizaba en pequeñas forjas, como las de los herreros o cerrajeros, donde solo se necesitaba ablandar el hierro para darle formas particulares.

Estas circunstancias impulsaron a algunos fundidores británicos a buscar métodos que permitieran extraer las impurezas del carbón mineral sin afectar a su gran poder calorífico. Para ello, comenzaron aplicándole las mismas técnicas de carbonización con las que obtenían el carbón vegetal, es decir, un proceso de pirólisis lenta en montones, pilas o montículos (figura 1).

De forma totalmente empírica, estos ensayos dieron lugar a la invención del coque, un residuo del proceso de destilación destructiva del carbón bituminoso, o hulla, que reúne las propiedades físicas y químicas que le permiten intervenir como combustible, agente reductor, carburante y soporte permeable en el complejo proceso de producción del arrabio en un alto horno [DÍEZ, 2013]. Pero no todas las hullas son aptas para la obtención de un coque

siderúrgico de calidad, por lo que la casualidad de disponer de yacimientos de carbón mineral adecuados resultó decisiva para que pudiera tener lugar el cambio de paradigma energético [WRIGLEY, 1992, p. 26].<sup>2</sup>

No se puede fijar una fecha exacta para el inicio de la fabricación de coque, pero en 1589 Thomas Proctor y William Peterson registraron la primera patente para depurar el carbón de piedra y poder utilizarlo en la producción de hierro, acero y plomo [SPEAR, 2014, p. 86]. Al año siguiente, John Thombourgh, deán de York, suscribió una nueva patente por siete años para refinar el carbón mineral destinado a los usos domésticos [ANÓNIMO, 1865, p. 698].

Tras el cambio de siglo, en 1603 *sir* Hugh Platt dio a conocer un procedimiento para purificar el carbón de piedra muy parecido al que se empleaba para carbonizar la leña [DUNN, 2003, p.275]. Este método fue mencionado de nuevo por Richard Gesling en su *Artificial fire, or coale for rich and poore* (London, 1644). En aquellos primeros años del seiscientos se sucedieron varias patentes para fundir el hierro con carbón mineral, como la de Simon Sturtevant (1611) o la de John Rovenson (1613), si bien ambos fueron incapaces de implementar el proceso a gran escala [OSBORNE, 2013, p. 234]. Así, la más conocida sería la concedida en 1622 a Dud Dudley, quien declaró que, aunque solo había conseguido fundir tres toneladas de arrabio por semana, lo había hecho con ganancias.

A la edad de 20 años, Dud Dudley abandonó la Universidad de Oxford para dirigir una herrería de su padre en Pensnett Chase (Worcestershire). La leña ya escaseaba en la zona, lo que encarecía el carbón vegetal. Sin embargo, el carbón de piedra era abundante en las proximidades, por lo que comenzó a hacer experimentos para depurarlo y utilizarlo en la fundición del hierro. Al obtener resultados satisfactorios, el 22 de febrero de 1622 solicitó la citada patente. Los hierros producidos por Dudley fueron examinados por el gobierno inglés, concluyendo que si bien no eran tan buenos como los conseguidos con carbón de leña, resultaban apropiados para la fabricación de mosquetes y carabinas.

Animado por estos éxitos, construyó un nuevo alto horno más grande en Hasco Bridge (Staffordshire), donde llegó a producir siete toneladas de hierro por semana. Pero la ignorancia, la envidia y la codicia unieron en su contra a todos los ferreteros, que llevaban mucho tiempo utilizando el carbón de leña y se resistían a cambiar sus procedimientos de trabajo, así como a varios aventureros que le disputaron sus descubrimientos de nuevas minas de carbón. Las presiones ejercidas limitaron la duración de su patente de 31 a 14 años, tiempo durante el que continuó fabricando hierro en lingotes y en barras, así como diversas piezas fundidas, que vendía a precios más económicos que sus competidores [MUSHET, 1840, p. 402].

---

2. En la búsqueda de alternativas al carbón vegetal se realizaron pruebas para purificar la turba y tratar de hacerla apta para la fundición del hierro, puesto que su utilización como combustible doméstico e industrial había tenido una importancia decisiva en la supremacía económica de Holanda en el siglo XVII (ZEEUW, 1974). No obstante, los experimentos demostraron que su poder calorífico era insuficiente para dicho propósito (FLACHAT *et al.*, 1842-1844).

Los problemas jurídicos y económicos derivados de la intolerante rivalidad que padeció, y que llegó a provocar un ataque vandálico contra sus instalaciones, junto con su adhesión a la causa real durante las guerras civiles, llevarían finalmente a Dudley a abandonar sus proyectos, transcurriendo varios lustros sin que se hiciera nada de importancia en la fabricación de arrabio con coque [KING, 2002, p. 45-46]. A pesar de ello, en 1665 publicó en Londres el libro titulado *Metallum Martis, or Iron made with Pit Coale, Sea Coale &c.*, en el que se puede entrever la forma en la que carbonizaba el carbón de piedra en pilas [SCRIVENOR, 1854, p. 40-41].

Por otro lado, en la década de los cuarenta del siglo XVII, el carbón desulfurado, que ya comenzaba a denominarse *coaks*, se utilizó con éxito en Derbyshire en el proceso de malteado de los cereales para la obtención de cerveza [BOSTWICK, 2015].

A medida que la producción de coque se empezaba a generalizar, surgió el interés por intentar aprovechar el humo graso y aceitoso que desprendían las hullas en el proceso de desulfuración. Así, en 1680, el químico alemán Johann Joachim Becher demostró, en la casa del químico Robert Boyle y ante destacados miembros de la corte de Carlos II, que se podía obtener coque, alquitranes y brea del carbón mineral [BECHER, 1683]. El 19 de agosto del siguiente año presentó, junto a Henry Searle, una patente de invención de “una nueva forma de obtener alquitrán y brea a partir del carbón de piedra, nunca antes descubierto o utilizado por ningún otro” [FORBES, 1970, p. 248]. Se trataba de una destilación *per descensum*, aunque este procedimiento resultaba muy oneroso, ya que era necesario quemar una gran cantidad de carbón. No transcurrió mucho tiempo antes de que se volviera a solicitar una nueva patente para fabricar brea, alquitrán y aceites minerales, esta vez en 1695 y por parte de MARTIN ELE [1697, p. 544]. Pero estos intentos no tuvieron continuidad y el asunto pasó al olvido.

## 1.2. El desarrollo industrial del desazufado del carbón mineral

El impulso definitivo al proceso de desulfuración del carbón de piedra lo proporcionó el cuáquero Abraham Darby, quien conocía los experimentos de Dudley por un parentesco lejano [HIGGS, 2009], a la vez que había adquirido cierta experiencia en la utilización del coque en la industria cervecera de Birmingham y Bristol [TRINDER, 1974, p. 9-13]. Después de emprender un negocio para la fabricación de cacerolas de latón en esa última localidad y de viajar, en 1704, a los Países Bajos para estudiar el método que aplicaban los artesanos holandeses en la fabricación de ollas y sartenes de hierro fundido, decidió arrendar un antiguo horno de fundición en Coalbrookdale (Shropshire) con la intención de producir cacerolas de hierro [Cox, 1990, p. 128]. Su hijo y su nieto, ambos con el mismo nombre que él, continuarían el negocio, incorporándose a la empresa en 1732 y 1768, respectivamente.

En 1709 Darby I puso en funcionamiento su remodelado alto horno, provisto con potentes barquines de viento. Parece ser que los primeros ensayos los llevó a cabo con carbón vegetal, aunque pronto comenzó a sustituirlo por carbón mineral transformado en coque en pequeñas pilas. Se fija como fecha probable del comienzo de la utilización del coque por Darby ese mismo año de 1709 [RAISTRICK, 1953, p. 37-40], si bien otros historiadores retrasan el evento a 1711 [ASHTON, 1924, p. 30], 1713 e incluso a principios de la década de

1730 [FLINN, 1959, p. 54]. Una de las causas del éxito de la saga de los Darby fue el bajo contenido de azufre que presentaba el carbón de la zona, inferior al 0,5% [MOTT, 1957, p. 63], por lo que les resultó más fácil conseguir una buena desulfuración mediante la carbonización en pilas.

Una carta enviada en 1712 por Darby I a su colega cuáquero William Rawlison demuestra que no intentó preservar su descubrimiento como un secreto industrial, pero su sistema no fue admitido por el resto de fundidores [HYDE, 1977, p. 25]. Incluso en la propia instalación de Coalbrookdale se pone en duda que se utilizase el coque como combustible de forma continuada durante los primeros años [DEANE, 1991, p. 116]. Tampoco se dispone de muchos datos que permitan conocer cómo se fue produciendo la lenta difusión de este procedimiento.

Los historiadores arguyen diferentes motivos para explicar por qué el nuevo sistema de fundición al coque no se generalizó en la industria metalúrgica británica durante la primera mitad del siglo XVIII. Uno de ellos es que el hierro conseguido era de inferior calidad al obtenido con carbón vegetal, de modo que era prácticamente imposible utilizarlo para obtener hierro forjado, el más empleado en la época [BOUCHU, 1762, p. 97]. Otro, que el coque obtenido en Coalbrookdale era más apropiado que el de otras zonas carboníferas británicas, en las que el contenido de azufre de los carbones oscilaba entre el 1% y el 3% [MOTT, 1957, p. 63]. Por último, también se ha señalado que el hierro fundido con coque no consiguió imponerse en el mercado hasta que, en la década de los cincuenta del siglo XVIII, empezó a resultar más barato que el elaborado con carbón vegetal [HYDE, 1977, p. 38-40], procedente en su mayor parte de Suecia [ÅSTRÖM, 1982].<sup>3</sup>

Fue por aquel entonces cuando Darby II realizó sucesivos ensayos fundiendo diferentes tipos de mineral de hierro con coque, hasta obtener un arrabio que podía ser empleado en las ferrerías para conseguir hierro forjado de cierta calidad [HAYMAN, 2003, p. 50]. En 1753 se empezaron a utilizar con éxito en Maryport (Cumbria) cámaras de ladrillo para el desazufrado del carbón, lo que proporcionó una alternativa al tradicional procedimiento de carbonización en pilas y constituyó un precedente para el desarrollo de los hornos de colmena, si bien estos fogones tuvieron poca relevancia en el suministro de coque hasta la segunda mitad del siglo XIX [MARTIN, 2020].

En esa misma década, el maestro ferretero John Wilkinson comenzó a utilizar coque para hacer cañones de hierro. Poco después, en 1768, introdujo en Bradley (West Midlands) una importante mejora en el proceso de elaboración del coque en pilas, al disponer en el centro del montón una chimenea de ladrillos, provista de aberturas alrededor que permitían la salida de los gases. Un regulador de hierro colocado en la parte superior del conducto ayudaba a regular el tiro y controlar el proceso (figura 2), con lo que mejoró tanto el rendimiento como

---

3. Los países nórdicos optaron por apostar por la calidad del hierro producido con el carbón vegetal que obtenían de sus ingentes recursos forestales, el cual aprovechaban también para la producción de brea vegetal, adoptando el uso del coque en los procesos siderúrgicos de forma muy tardía. Véase LINDMARK & OLSSON [2018].

la densidad del coque obtenido [JACKSON, 2008]. Y en 1776 creó en su fábrica *New Willey Ironworks* (Shropshire) un sistema soplante de cilindros accionado por vapor que no solo permitió aumentar el tamaño de los altos hornos que utilizaban coque, sino también prescindir de la proximidad a una corriente de agua, que hasta entonces constituía un ineludible factor de localización para este tipo de instalaciones [CHALONER, 1951, p. 63-69].

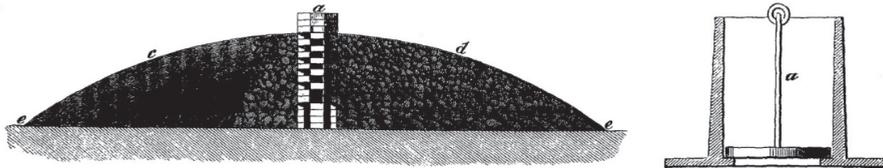


Figura 2. Pila según el modelo de Wilkinson en Russell's Hall Furnaces y detalle del regulador de tiro [PERCY, 1861, p. 149]

Paralelamente, en 1762, John Roebuck patentó el sistema de refinado del hierro que había puesto en funcionamiento en sus forjas de Carron (Stirlingshire, Escocia) [MANTOUX, 1906, p. 295]. Este procedimiento era muy parecido al pudelado que, dos décadas después, desarrollaría Henry Cort, mejorando las ideas de Peter Onions [MOTT, 1983]. Asimismo, el horno de reverbero inventado en 1766 por los hermanos Thomas y George Cranage, que empleaba el carbón mineral en crudo para recalentar el arrabio obtenido con coque, sin que entrara en contacto directo con él, permitió obtener hierro forjado en cantidad y de buena calidad [WERTIME, 1961, p. 230].

### 1.3. La obtención de productos derivados de la destilación del carbón mineral: alquitranes y breas

En el proceso de depuración del carbón de piedra en pilas al aire libre, los componentes bituminosos se volatilizaban con el calor, perdiéndose en la atmósfera sin obtener ningún provecho de ello. Pero a medida que el uso del coque se empezó a generalizar, resurgió el interés por recuperar los productos aceitosos volátiles emitidos, procediendo a destilar el carbón en recipientes cerrados y calentados externamente.

Así, a comienzos de la década de 1770, Christian Wilhelm baron Van Haake patentó en Gran Bretaña un procedimiento para obtener alquitrán y aceites del carbón mineral que podían ser empleados en el calafateado de los barcos y la impermeabilización de las jarcias [ANÓNIMO, 1857]. Estos productos eran esenciales para la navegación y su producción a gran escala resultaba estratégica, ya que durante el siglo XVIII el suministro de la brea y del alquitrán obtenidos por descomposición térmica de la madera había estado prácticamente monopolizado por las potencias bálticas [CLOW, 1942]. El nuevo sistema se intentó poner en práctica en los hornos del marqués de Rockingham, situados en las inmediaciones de Sheffield, así como en Coalbrookdale y Newcastle, pero con escaso éxito, ya que no se obtuvieron cantidades importantes para resultar competitivas en el mercado [PAUL, 1863, p. 472].

No fue hasta 1780 cuando Archibald Cochrane, noveno conde de Dundonald, consiguió desarrollar en Upper Cranston (Escocia) un nuevo y más sencillo método de extraer alquitrán del carbón mineral, a la vez que destilaba varios subproductos [COCHRANE, 1785, p. 3]. El procedimiento consistía en quemar parcialmente el carbón en una gran cámara, que podía cerrarse completamente y admitir un suministro regulado de aire para mantener la combustión en el grado deseado. Los vapores desprendidos se pasaban por una tubería a un condensador, donde eran recolectados, obteniéndose finalmente un alquitrán excelente, brea y una solución acuosa de amoniaco.

Dundonald constituyó *The British Tar Company* y, asociándose con otros empresarios como William Reynolds o John Wilkinson, desarrolló la destilación del carbón a gran escala con intención de obtener no sólo coque, también alquitrán y otros derivados en gran cantidad [LUTER, 2006]. Estos productos se recomendaron para la conservación de tuercas y pernos, así como para preservar eficazmente tanto el hierro fundido como el forjado frente la oxidación, incluyéndose entre sus aplicaciones el recubrimiento del interior de los cañones en los astilleros navales [CLOW, 1942].

Gracias a estos y otros adelantos tecnológicos, Gran Bretaña pudo disponer de abundante hierro y alquitranes a precios mucho más económicos que el resto de las grandes potencias. Estas materias primas le proporcionarían, a la postre, el predominio militar y marítimo [CIPOLLA, 1967]. Debido a ello, la nueva tecnología inglesa para el destilado del carbón se convirtió rápidamente en objeto primordial del espionaje militar industrial de la época [BRADLEY, 1992].

## **2. LOS PAÍSES EUROPEOS A LA BÚSQUEDA DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS DEL DESAZUFRAO DEL CARBÓN MINERAL**

### **2.1. Primeros intentos de desazufrar carbón y fundir hierro en la Europa continental**

El interés por dar nuevos usos al carbón de piedra se suscitó relativamente pronto en Francia; ya en 1740 Nicolas François Deville, ingeniero establecido en Lyon, realizó varios experimentos para comparar el calor producido por el carbón mineral y el de leña. Pero los intentos para desulfurarlo y poder utilizarlo como combustible en los diferentes procesos metalúrgicos se demoraron hasta la siguiente década, cuando ya comenzaba a extenderse por Gran Bretaña el empleo del coque en los hornos de fundición de diferentes metales.

La primera mención al nuevo combustible, que aparece denominado como *coucke*, figura en una referencia sobre la refundición del plomo en Escocia publicada en 1753, en la edición francesa de una obra de Cristophe-André Schlutter [1753, p. 412]. Cinco años después, Peter Alexander, conde de Tilly, comentó que para obtener hierro fundido en las ferrerías se podía emplear el carbón vegetal o el carbón mineral despojado del azufre. Añadía que, para conseguir carbón depurado, los ingleses aplicaban un proceso similar al de la obtención del carbón vegetal, y que denominaban *coucke* al producto así preparado [1758, p. 25].

Fue también en 1758, en plena Guerra de los Siete Años (1756-1763) cuando el capitán del Cuerpo Real de Artillería, Blanc Dangenoust, llevó a cabo, en la localidad de Saurbrick

(Alsacia), el primer intento en territorio francés de sustituir el carbón vegetal por el mineral en una fundición de hierro. Para ello purificó el carbón en unos hornos cerrados, a la vez que intentaba beneficiar los betunes para obtener alquitrán siguiendo el sistema *per descensum* descrito por Johann Joachim Becher [RYSS-PONCELET, 1811]. No obstante, la calidad del hierro que obtuvo fue muy mediocre [DANGENOUST, 1761].

Una vez terminado el conflicto bélico, la necesidad de remediar el desorden que reinaba en la explotación de las minas, así como la escasez y carestía de la leña y el aumento del consumo de hierro y acero, impulsó al recién nombrado secretario de Estado, Henri-Léonard-Jean-Baptiste Bertin, a comisionar en 1764 al experimentado ingeniero Gabriel Jars para que pasara a Gran Bretaña en un viaje de espionaje industrial, entre cuyos objetivos se encontraba el de adquirir los conocimientos necesarios para emplear el carbón mineral en las operaciones metalúrgicas [HARRIS, 1998]. Siguiendo el itinerario organizado por el industrial John Holker, que trabajaba para el Gobierno francés, durante 1764 y 1765 visitó varias minas de Escocia y altos hornos de Inglaterra, teniendo ocasión de observar detenidamente el proceso que se llevaba a cabo en las fundiciones de Carron, Clifton y Newcastle para depurar el carbón [JARS, 1774-1781] (figura 3). En 1766 reconoció otras explotaciones mineras de Hanóver, Hesse, Noruega, Suecia, Lieja y Holanda, en compañía de su hermano mayor [WEIGHTMAN, 2007, p. 24].

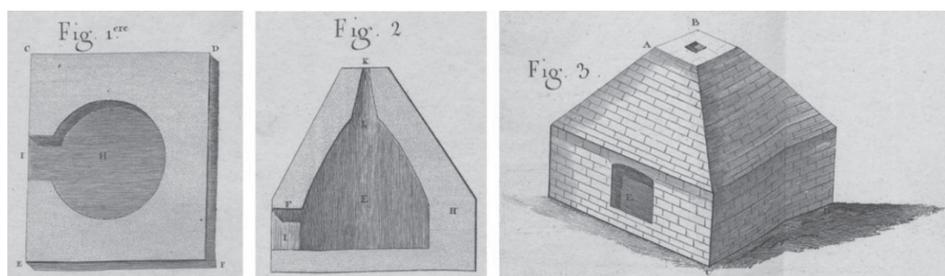


Figura 3. Horno de Newcastle [JARS, 1774, lámina LIX]

Tras su regreso a Francia, Jars fue nombrado inspector general de fábricas; las memorias que redactó durante sus viajes, en las que dejó recogidas sus minuciosas observaciones,<sup>4</sup> le valieron su nombramiento como miembro de la Académie des Sciences en mayo de 1768. En ellas describe, entre muchos otros asuntos, los procedimientos que empleaban los ingleses para obtener los productos que denominaban *coaks* y *cinders*.<sup>5</sup> Unos meses después, durante una

4. Sus cuarenta y cuatro memorias de viaje fueron publicadas, póstumamente, por su hermano en tres volúmenes bajo el título de *Voyages Metallurgiques* (1774-1781). Fueron traducidos al alemán en 1777 y Jean-François-Clément Morand reprodujo numerosos fragmentos en *L'art d'exploiter les mines de charbon de terre* (1768-1779).

5. "Las 'cinders' de Newcastle son unas brasas de color gris ceniza muy porosas, pero que tienen mucha más consistencia que los llamados 'coaks', que también son solo un carbón desprovisto de su ácido sulfuroso, pero por un proceso diferente" [JARS, 1774, p. 212]. VENEL [1775, p. 532-533] aclara que las *cinders* se obtenían

visita de inspección por las provincias del Este de Francia —Borgoña, Franco Condado, Alsacia, Lorena y La Champaña— realizó una demostración de cómo fabricar coque con el carbón de las minas de Montcenis, próximas a Le Creusot (Borgoña), e informó a Bertin de que este lugar era muy adecuado para instalar una fundición importante [CHEVALIER, 1946, p.34].

En enero del siguiente año, el de 1769, consiguió fundir hierro con una mezcla de coque y carbón de leña en la herrería que la familia del capitán de artillería François Ignace de Wendel tenía en Hayange (Lorena) [JAMES, 2006, p. 45-46]. Dos meses después llevó a cabo con éxito nuevas pruebas de desulfuración en Sainbel, en las proximidades de Lyon, empleando carbones de Rive-de-Gier y de Sainte-Foi-l'Argentiere y realizó una comparación entre el uso de carbón vegetal y de coque para fundir mineral de cobre, concluyendo que este último permitía ahorrar tiempo y dinero [CHERMETTE, 1981].

Estos logros le animaron a redactar una memoria en la que indicaba que el proceso de depuración consistía en suprimir tanto los betunes, que contenían aceites y ácidos, como las partes sulfurosas, que resultaban altamente destructivas para los metales<sup>6</sup> [JARS, 1770]. Resaltaba también que, a pesar de que en apariencia parecía un procedimiento fácil de ejecutar, dada su similitud con el que se utilizaba para obtener carbón vegetal, había que emplear carbones adecuados y se requería una buena práctica por parte de los carboneros para obtener un coque de calidad que pudiera ser empleado en los hornos metalúrgicos.<sup>7</sup> Atendiendo a ello, describía minuciosamente cómo elegir el carbón, así como la manera más adecuada de preparar las pilas y realizar la combustión, apuntando que esta debería durar unos cuatro días. Su prematura muerte, en agosto de 1769, privó a Francia de su valiosa experiencia, pero la publicación de sus memorias fue el revulsivo que despertó el interés por esta materia en toda Europa [BALLOT, 1978, p. 441].

Paralelamente, a comienzos de la década de los sesenta del siglo XVIII, el estrasburgués Roederer, contando con el patrocinio de Charles-Theodore, príncipe de Nassau-Saarbrücken, instaló en las forjas de Sulzbach (Sarre), varios hornos en batería para obtener coque y brea siguiendo el método de destilación *per descensum* ideado ochenta años antes por Becher. Estos hornos tomaban como modelo los denominados *fourneaux de coupelle* —hornos de taza—, que se utilizaban para purificar el oro y la plata de los diferentes metales con los que se podían alear [MORAND, 1768-1779, p. 1138]. Estaban contruidos con ladrillos refractarios y cerrados por

---

desulfurando el carbón en hornos, mientras que los *coaks* se preparaban, de forma más sencilla y económica, en pilas al aire libre. También indica que las *cinders* se utilizaban para algunas operaciones especiales y los coques para fundir hierro en altos hornos y para fundiciones análogas en otros hornos.

6. Para los alquimistas, el azufre era considerado el principio de combustibilidad. Stahl dio el nombre de flogisto a la tierra sulfurosa o 'principio inflamable', considerándolo como la materia pura del fuego. En el campo de las reacciones metalúrgicas, y con el lenguaje químico actual, podría considerarse como un 'principio reductor'. En el contexto de la época, las 'partes sulfurosas' no solo comprendían el azufre, sino también otras sustancias muy inflamables, como el carbono.
7. MORAND [1768-79, p.1141] insistiría: "El conocimiento del carbón mineral, en sus variedades más comunes, debe sumarse al del Arte mismo para el que se utiliza el fuego de este combustible; las dificultades que entraña este conocimiento no son menos reales ni menos considerables".

tapas metálicas. Por su parte inferior salía un tubo que se dirigía hasta un recipiente de hierro donde se recogía el betún desprendido, convirtiéndose en alquitrán una vez refrigerado, mientras que otro tubo evacuaba a la atmósfera el azufre [GENSSANE, 1770; 1779]. Aunque no lograron desplazar el uso del carbón de leña por no resultar más rentables, durante la segunda mitad del siglo XVIII fueron objeto de numerosas visitas por parte de científicos y espías industriales.

Así, cuando Charles-Nicolas d'Oultremont, príncipe-obispo del Estado eclesiástico de Lieja, tuvo noticia de estos nuevos métodos industriales, envió en 1768 al médico y maestro de forjas de Theux, Jean-Philippe de Limbourg, en viaje de reconocimiento a Sulzbach. Este comprendió que Roederer aplicaba a la hulla un proceso de carbonización similar al del carbón vegetal. A su regreso, Limbourg escribió una extensa memoria para informar a su protector sobre lo que había visto en el viaje y, en julio de ese mismo año, construyó un horno para coquizar carbón en Jusleville. Sin embargo, sus primeros intentos de desazufrado fueron infructuosos, no logrando obtener un coque aceptable hasta el mes de diciembre. Al año siguiente, el de 1769, realizó una serie de ensayos para fundir mineral de hierro con el coque obtenido. Pero a pesar de haber construido un horno más grande, sus coladas no alcanzaron la calidad necesaria, por lo que se propuso hacer nuevas pruebas con otro de mayores dimensiones. No obstante, la muerte en 1770 de Oultremont le dejó sin financiación, teniendo que abandonar definitivamente sus experimentos [FAIRON, 1926, p. 19-35].

Tras la muerte de Jars, Antoine de Genssane se convirtió en el principal adalid, en Francia, de la utilización del carbón mineral desazufrado en los procesos metalúrgicos. En 1768 visitó Sulzbach y, dos años después, redactó una memoria en la que describía minuciosamente el proceso de destilación y los hornos que se empleaban allí (figura 4), a la vez que proponía varios modelos de hornos aptos para fundir diferentes tipos de menas metálicas con carbón de piedra [GENSSANE, 1770, p. 271]. Empeñado en introducir la nueva técnica siderúrgica en Francia, Genssane promovió varias tentativas incompletas en las que se combinaron los esfuerzos de particulares y gubernamentales, llegando el Rey a conceder franquicias y privilegios para establecimientos destinados a producir coque con el que poder fabricar hierro fundido a la inglesa. Pero estas empresas fracasaron, tanto por los conflictos de intereses surgidos, como por problemas técnicos y financieros, sin que llegaran a operar lo suficientemente en grande.

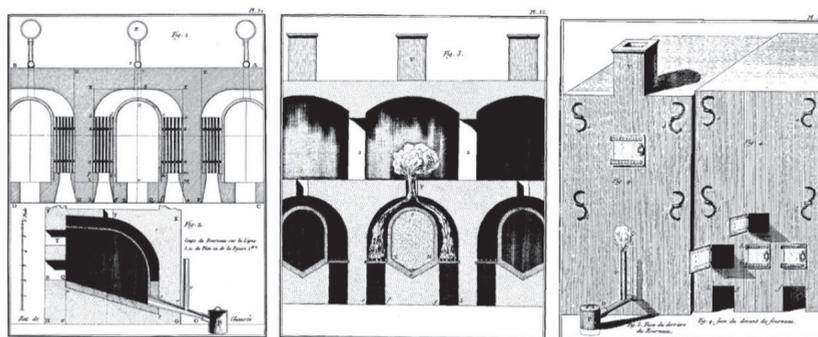


Figura 4. Hornos de Sulzbach [GENSSANE, 1770, láminas 32, 33, 34]

También tiene interés el intento desarrollado por el célebre naturalista Georges-Louis Leclerc, conde de Buffon. Tras haber realizado numerosos ensayos con hierro en la fragua de Aisy-sur-Armançon y en Petit Fontenet (Borgoña), entre 1768 y 1772 construyó cerca de Montbard un complejo siderúrgico integrado —uno de los primeros de la época—, dotado con un alto horno y dos forjas, en el que experimentó con innovaciones técnicas y sociales. Él mismo dirigió esta fábrica durante doce años, consiguiendo obtener, no sin bastante dificultad, buen hierro con carbón mineral. Pero se lamentaba de que en Francia existían muchos “obstáculos físicos y morales” que se oponían a la perfección de este arte, a los que se añadía la poca atención que se prestaba a la diferente calidad de los hierros y la libre entrada de los hierros extranjeros. Todo ello hacía languidecer esta rama de comercio, lo que le llevaría finalmente a arrendar su fragua al no resultar tan rentable como esperaba [BUFFON, 1783].

En este estado de cosas, en 1781 Wendel y el ferretero británico William Wilkinson —hermano pequeño de John Wilkinson, que trabajaba al servicio de la corona francesa—, se encargaron de buscar lugares apropiados para establecer altos hornos de tipo inglés con los que surtir de arrabio adecuado a la fábrica de cañones de la Marina creada en la Isla de Indret [BRET, 2009, p. 60-61]. Finalmente, y contando con el apoyo de Luis XVI, se decidió fundar una sociedad anónima que construyó una gran fundición adaptada a las nuevas técnicas industriales en Le Creusot, donde había carbones de bajo contenido de azufre y obreros con cierta experiencia en la técnica de desazufrado [BALLOT, 1912, p. 45]. La instalación contaba con cuatro hornos altos de 39 pies (12,7 m) de altura, que casi duplicaban el tamaño de los de leña de la época gracias a una máquina de vapor que accionaba tres grandes soplantes de pistones. Otras se empleaban para mover los martillos y martinets, el taladro y la máquina de extracción de carbón de la mina. Tras cuatro años de problemas económicos, jurídicos y técnicos, el 11 de diciembre de 1785 se logró obtener la primera colada industrial utilizando solamente coque como combustible [DELAMÉTHÉRIE, 1787, p. 63]. Pero el hierro obtenido era demasiado irregular para la fabricación de cañones y la empresa terminó quebrando en 1788 [CONTURIE, 1951].

De esta forma, durante las dos últimas décadas del siglo XVIII, la fabricación de coque llegó a convertirse en una práctica relativamente común en algunas regiones de Francia, Alemania, Lieja y los Países Bajos austriacos, pero en todos los casos surgieron dificultades para utilizar el nuevo combustible en la fundición y afino del mineral de hierro, quedando esta cuestión sin resolver en el Continente hasta los años veinte del siglo XIX [DOUXCHAMPS-LEFÈVRE, 1968].

## **2.2. El horno de desazufrado de carbón ideado por Faujas de Saint-Fond.**

En 1784, el conde de Buffon, que desempeñaba el cargo de intendente en el Jardin du Roi, envió al geólogo Barthélemy Faujas de Saint-Fond a Gran Bretaña con el pretexto de hacer estudios naturalistas, aunque su intención era que analizase, fundamentalmente, las nuevas tecnologías siderúrgicas empleadas en dicho país. En su visita a la gran fundición de cañones de Carron (Escocia), Faujas observó con detenimiento el procedimiento que se

utilizaba para depurar el carbón y obtener coque según el método patentado por Dundonald [FAUJAS, 1797] y elaboró algunos dibujos de los hornos de destilación del carbón mineral (figura 5).

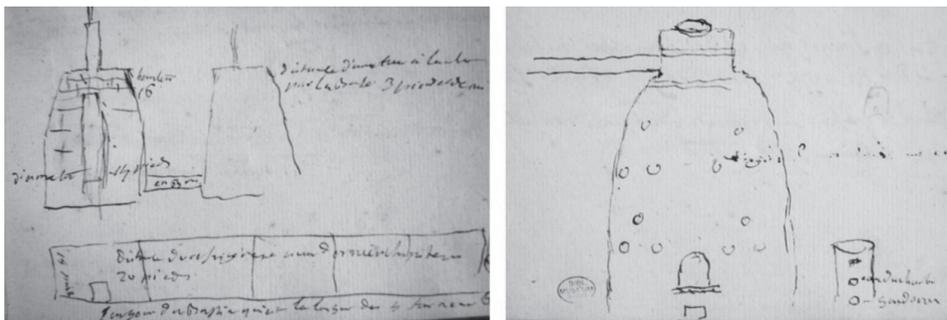


Figura 5. Hornos de Carron dibujados por Faujas [Comparato, 2018, p. 290]

Al regresar a Francia, el 15 de abril de 1785, llevó a cabo un experimento en el Jardin du Roi con la intención de extraer alquitrán del carbón mineral de las minas de Decise (Nivernois) mediante un gran horno de destilación, provisto de varias cámaras abovedadas y otros accesorios que permitieran la condensación por refrigeración del humo grasoso y aceitoso desprendido durante la combustión del carbón (figura 6). En él consiguió procesar 13.000 libras (6,4 toneladas) de carbón, obteniendo aproximadamente un 4% de alquitrán (252 kg), así como álcali volátil, producto de gran utilidad en muchos procesos industriales. Faujas consideraba que las cenizas resultantes, muy ligeras y depuradas del azufre, eran un excelente *coaks* que se podría emplear sin ningún problema en los altos hornos de fundición [ANÓNIMO, 1790].

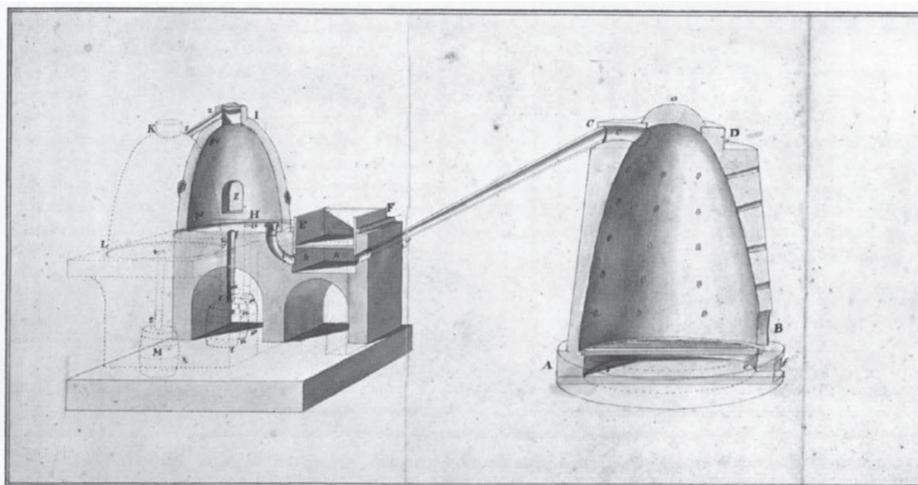


Figura 6. Horno de Faujas dibujado por Betancourt [BONET, 1988, p. 280]

Para verificar los resultados del ensayo, se encomendó a Antoine Lavoisier y a Claude Louis Berthollet, dos ilustres miembros de la Academie Royal des Sciences, que analizaran el proceso y el alquitrán obtenido. Estos consideraron que el procedimiento podría ser optimizado gestionando mejor la combustión del carbón para reducir la pérdida de alquitrán, pero reconocieron que el ‘aceite de Faujas’ era mucho más colorido, más empireumático y menos aglutinante que el de origen vegetal, por lo que penetraba bien en la madera y la preservaba mejor de la humedad y de la acción de los insectos. En cambio, opinaban que el alquitrán ordinario resultaba más apropiado para mantener la flexibilidad de los cordajes y evitar los efectos de la fricción de sus partes. Por último, señalaban que la operación de destilación del carbón de piedra no era barata, por lo que sólo se podría generalizar si los resultados conseguidos fueran perdurables en el tiempo [LAVOISIER & BERTHOLLET, 1790].

### **3. LA RECEPCIÓN DE LA TÉCNICA DEL DESAZUFRAO DEL CARBÓN MINERAL EN ESPAÑA EN LA SEGUNDA MITAD DEL SIGLO XVIII**

#### **3.1. Espías y Reales Sociedades de Amigos del País a la búsqueda de la nueva tecnología**

En la segunda mitad del siglo XVIII la Corona española tomó consciencia de que el país se estaba quedando al margen de gran parte de los avances científicos y técnicos que se estaban produciendo en el extranjero, lo que provocaba un atraso considerable de su capacidad militar y económica [PESET & LAFUENTE, 1988]. Para tratar de revertir esta situación, se invirtió una ingente cantidad de recursos en tres líneas de acción complementarias [VILLAS, 2005]. Por un lado, se fomentó la constitución de las Reales Sociedades Económicas de Amigos del País, que tenían como fin promover el saber científico y divulgar los nuevos adelantos técnicos mediante la publicación de memorias y la traducción de obras consideradas importantes [ENCISO, 2010]. Por otro, se pensionó a jóvenes aplicados, técnicos y militares para que realizaran viajes de estudio y de reconocimiento por Europa, sobre todo a Francia [LAFUENTE & PESET, 1985]. Muchos de estos viajeros actuaron como auténticos espías industriales<sup>8</sup> [HELGUERA, 2011]. Simultáneamente, se llevó a cabo una política de contratación de profesores y técnicos extranjeros para que enseñaran y divulgasen los nuevos conocimientos en centros educativos e industriales [PORTELLA, 1996, p. 48].

Durante este periodo, España rivalizó con Gran Bretaña y Francia por desarrollar una Marina que le permitiera el dominio de los mares del mundo. Ello requería dotar a los astilleros de las materias primas necesarias tanto para construir y pertrechar los buques de guerra de nueva construcción, como para reparar periódicamente los deterioros ocasionados por el duro servicio marino a los que se encontraban en servicio. Tal y como se ha señalado, el desazufrado del carbón de piedra permitía obtener como subproductos coque y betunes

---

8. La primera ley moderna de patentes industriales se promulgó en Francia en 1791, mientras que en España el primer decreto de patentes de invención data de 1826, por lo que este sistema pudo impulsar la investigación en el sector del carbón ya en el siglo XIX. Véase Sáiz [1999].

[QUINTERO, 2007]. El empleo del coque ya empezaba a ser esencial para el funcionamiento de los hornos de fundición de hierro en los que se fabricaban los cañones que precisaba la Armada, mientras que la breá y alquitranes eran indispensables para el calafateado y el carenado de los cascos de madera de los navíos, así como para la impermeabilización de los cabos y jarcias [DÍAZ, 2020]. Sin disponer de estos elementos no era posible mantener una escuadra poderosa que pudiera garantizar el comercio de la metrópoli con las colonias de ultramar.

Pero el consumo de carbón mineral carecía de tradición en España, por lo que inicialmente se recurrió a la importación de hulla británica para abastecer a los arsenales de la Marina de Guerra [COLL & SUDRIA, 1987]. Asimismo, para surtirlos de betunes se llegaron a crear tres Reales Fábricas: Tortosa (Tarragona) en 1748, Castril de la Peña (Granada) en 1759 y Quintanar de la Sierra (Burgos) en 1778, en las que se utilizaba la resina de los pinos como materia prima. Sin embargo, la producción no cubría las necesidades de los astilleros, lo que obligó a hacer importantes compras en los feraces países bálticos a través de los intermediarios que monopolizaban su comercio y que habían sido enemigos de España desde el siglo XVI [GARCÍA, 2006, p. 216-218]. Esta arriesgada dependencia de un insumo estratégico convirtió a la técnica de desazufrado del carbón en un objetivo prioritario para la Marina, en el marco de su estrategia defensiva imperial.

Igualmente, y con la intención de conseguir una explotación más racional de los recursos energéticos, el 15 de agosto de 1780 Carlos III promulgó una real cédula por la que concedía privilegios y franquicias a los explotadores de las minas de carbón mineral. Cinco años después, el conde de Campomanes, tras haber impulsado la creación de las sociedades económicas de amigos del país, les remitió una circular en la que, como procurador del Consejo Supremo de Castilla, les instaba a que algunos de sus socios se dedicaran con preferencia a la búsqueda de yacimientos de carbón de piedra y propusieran reglas para su aprovechamiento. Estas medidas dieron lugar a varias iniciativas, siendo, por tanto, las minorías cultas las que promoverían la explotación y el consumo de carbón en nuestro país [COLL & SUDRIA, 1987].

### **3.2. La repercusión en España de los métodos de desazufrado del carbón mineral propuestos por Jars, Genssane y Faujas de Saint Fond**

La primera vez que se hizo referencia en España al coque fue en una reseña titulada “Del carbón de piedra reducido a coac”, publicada en septiembre de 1776 por la Real Sociedad Bascongada de Amigos del País. En ella se comentaba que los ingleses daban dicho nombre “al carbón de piedra despojado de las partes azufrosas que le hacen dañoso a las fundiciones, logrando por medio de una operación sumamente sencilla el ponerlo en estado de emplearse sin riesgo y con economía en las fraguas, ferrerías y oficinas de fundición”. La sociedad consideraba muy importante promover el uso del coque en las ferrerías como medio para procurar la conservación de los montes y el precio equitativo de la madera y el carbón de leña, cuyo incremento incidía en los costes de producción del hierro. Para ello, reproducía los resultados de los ensayos llevados a cabo por Jars en Sainbel, en 1769, y daba cuenta del

encargo que habían realizado al maestro anconero guipuzcoano Juan Antonio de Guilisasti para que hiciera una prueba similar en su establecimiento con arreglo a una instrucción obtenida de los *Voyages Métallurgiques*. El ferrón consiguió obtener coque quemando una pila de carbón mineral, pero fracasó al intentar fundir hierro con él, pues la fundición obtenida se hizo pedazos al primer golpe del mazo, “observándose que ni era hierro ni arrabio, ni cosa alguna útil” [ANÓNIMO, 1776, p. 37-44].

Ni él, ni los miembros de la Sociedad alcanzaron a comprender los motivos del mal éxito de esta tentativa, en la que simplemente se limitaron a sustituir un combustible por otro, obviando el hecho de que los británicos empleaban el coque en hornos altos que producían arrabio para su conversión posterior en hierro dulce o acero en forjas de afino. Tampoco hay constancia de que se hicieran nuevas pruebas. No obstante, dos años después publicaron unas *Noticias sobre el arte de fundir el acero, sacadas de la obra de Mr. Jars, intitulada viages metalúrgicos*, en las que se señalaba que, para poder fundir el acero con carbón mineral según el método propuesto por Jars, era necesario purificarlo del azufre que contenía y reducirlo a coque, aunque sin indicar nada sobre los métodos para obtener este último [ANÓNIMO, 1778, p. 57].

Ya en la década siguiente, el periódico de carácter político y militar *El Mercurio de España* dio a conocer, en mayo de 1785, el experimento realizado el mes anterior por Faujas en el Jardín du Roi para extraer alquitrán del carbón de piedra. Indicaba que el naturalista francés había tenido ocasión de comprobar cómo se obtenía este producto en Escocia aplicando el método patentado por *lord* Dundonald y, a pesar de que los técnicos locales habían tratado de ocultarle el procedimiento, con gran ingenio había conseguido construir un horno y obtener alquitrán de excelente calidad en presencia de importantes personalidades y químicos. Además, remarcaba que las cenizas del carbón, una vez despojado del betún, perdían su olor incómodo, pero no su fuerza calorífica, por lo que podían ser utilizadas de manera ventajosa en las fraguas y hornos [*Mercurio de España*, 05/1785, p. 19-21].

Al mismo tiempo, la escasez de leña padecida por la ciudad de Zaragoza en el invierno de 1784 impulsó al secretario de la Real Sociedad Económica Aragonesa de Amigos del País, Diego Torres, a redactar una memoria sobre el uso del carbón de piedra de las minas de Utrillas (Teruel) “y demás del Reyno”, que fue publicada al año siguiente. Inspirándose en los usos que se le daba a dicho combustible mineral en Alemania, Francia, Inglaterra y Suiza “según los métodos que se leen en la Enciclopedia, y otros autores extranjeros”, Torres se esforzó en demostrar las utilidades del carbón local, tanto en los usos industriales como domésticos, con el fin de extender su utilización y desengañar al público de los supuestos efectos nocivos para la salud que se atribuían al tufo que desprendía.

Para ello hizo un ensayo en la fragua del maestro armero y cerrajero Bernardo Marañés, comprobando que el carbón de Utrillas era más ventajoso que el de leña para trabajar el hierro. Animado por ello, se lo dio a conocer gratuitamente a varios artesanos —herreros, cerrajeros, incluso relojeros— y a muchos vecinos, que reconocieron sus ventajas (*Gaceta de Madrid*, 16/08/1785). En su empeño contó con el apoyo del capitán general Félix O’Neille, que pudo comprobar que el carbón de Utrillas era de tan buena o mejor calidad que el de Francia e Inglaterra. También se remitió una remesa a Barcelona, que fue ensayada en la

fábrica de cañones de bronce por el teniente coronel del Real Cuerpo de Artillería Andrés Aznar, en presencia de varios holandeses y alemanes, resultando ser superior al de Francia y Alemania.

Como medida para disminuir el mal olor del carbón, Torres proponía airearlo durante unas horas o, alternativamente, someterlo a una breve torrefacción, apagando las piedras una vez que estuvieran del todo encendidas. Por último, consideraba que si se consiguiera extraer el alquitrán del carbón mineral, supondría un considerable ahorro y beneficio para los arsenales y se evitaría la destrucción de los montes. En este sentido, hacía referencia al artículo publicado en *El Mercurio de España* del mes de mayo de 1785, en el que se daba noticia del experimento de Faujas y del horno de Dundonald [TORRES, 1785].

Ese mismo año de 1785, y por iniciativa de la Sociedad de Amigos del País de Valladolid, se publicó un pequeño cuadernillo titulado *Arte de descubrir y hacer el carbón mineral*. Se trataba de la traducción realizada por Juan María Nicolás de Saint Pastous, profesor de francés, del artículo “Art du Charbon minéral”, incluido en el primer tomo de la *Encyclopédie Méthodique. Arts et Metiers Mécaniques*, editado por Charles-Joseph Panckoucke apenas un año antes. En él se exponía la necesidad de desazufurar el carbón de piedra para que fuera utilizado en usos domésticos e industriales, indicando que la operación se podía llevar a cabo por el sistema de pilas carboneras o el de hornos empleado en Sulzbach [SAINT PASTOUS, 1786].

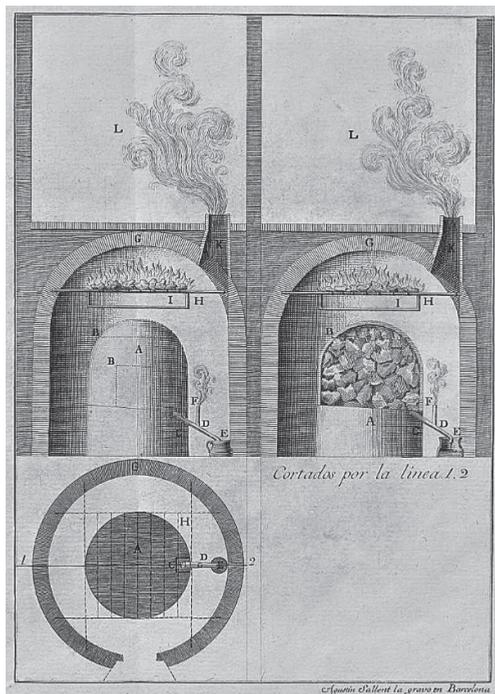


Figura 7. Horno de Comés [COMES, 1786, p. 51]

De igual forma, en noviembre de 1785 la Real Academia de Ciencias Naturales y Artes de Barcelona se interesó por el carbón de piedra de dos minas situadas en las inmediaciones de Tárrega (Lérida). A resultas de ello, encargó un informe al director de Historia Natural, Joseph Comes i Bonells, que fue publicado al año siguiente con el título *Memoria sobre el carbón de piedra para persuadir y facilitar su uso en Cataluña* [GÓMEZ-ALBA, 2007]. En ella, el naturalista señalaba la posibilidad de utilizar el combustible mineral en gran número de aplicaciones industriales, aunque advertía de que previamente era necesario depurar el carbón de las partes bituminosas, sulfúreas y arsenicales que contenía. Apuntaba también los dos procedimientos que permitían llevar a cabo esta operación, ya fuera quemándolo y reduciéndolo a brasas en pilas, o mediante la destilación *per descensum* y separación del azufre por evaporación, decantándose por este último método, ya que proporcionaba, además, una brea de buena calidad. Para poder aplicarlo, describió con todo detalle el tipo de horno necesario y su funcionamiento, incluyendo un dibujo (figura 7). Concluyó con un alegato a favor de la utilización del carbón de piedra depurado en los usos domésticos, considerando que su utilización no resultaría tan costosa como el de leña si se trabajaban sus minas con método y economía [COMES, 1786].

Apoyándose en la obra de Comes, el ingeniero de minas Francisco Carlos de la Garza redactó, en 1789, un manuscrito remitido al ministro de Marina, Antonio Valdés, en el que proponía un horno mejorado para depurar carbón “más prontamente, con menos leña y más fruto de este betún” [GARZA, 1789, p. 113]. Este dispositivo presentaba la novedad de condensar el betún y los vapores sulfúreos y aceites mediante sendos serpentines sumergidos en un estanque de agua (figura 8).

Por último, en febrero de 1786 la Real Sociedad Patriótica de Sevilla reaccionó a la petición del Supremo Consejo de Castilla encargando a su socio de número Pedro Henry, súbdito francés que había contratado en julio de 1780 como catedrático de Matemáticas, la redacción de una memoria sobre el carbón mineral que se explotaba en Villanueva del Río (Sevilla) [DURÁN & CURBERA, 2005, p. 91-95]. El exhaustivo informe fue publicado en 1790

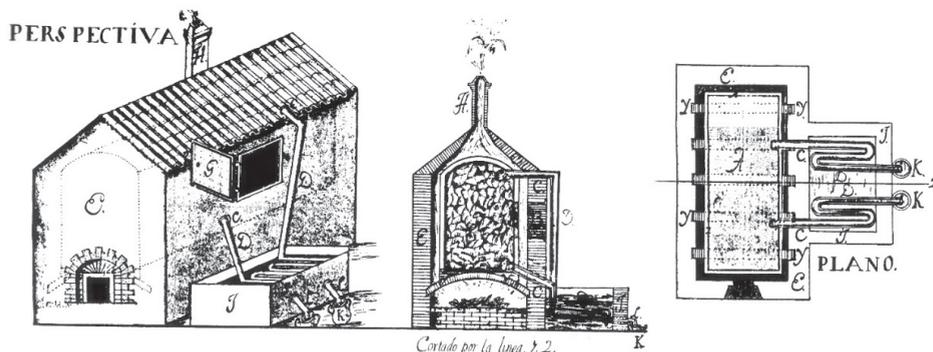


Figura 8. Horno de la Garza [GARZA, 1789, lámina IV]

en cinco entregas [HENRY, 1770]. En la tercera de ellas, Henry reprodujo, en español, la manera de preparar el coque para que pudiera ser utilizado en los procesos metalúrgicos, tal y como la había descrito Jars en su obra. Comenzaba señalando que habían sido los ingleses quienes “de bastante antiguo” intentaron remediar los inconvenientes que presentaba el carbón mineral para este tipo de operaciones, consiguiendo con el tiempo vencer las dificultades y quitarle sus cualidades nocivas. Y añadía que, aunque guardaron en secreto sus procesos, estos pudieron llegar a ser conocidos gracias a las memorias escritas por el técnico francés.

A continuación, describía cómo hacer el coque en pilas, resaltando la importancia de proceder con “una práctica entendida”, muchas precauciones y empleando carbones de buena calidad y sin piedras, en pedazos no mayores de tres o cuatro pulgadas cúbicas (38-50 ml). Las carboneras deberían ser similares a las de leña, con una capacidad de 50 a 60 quintales (2,7 a 2,8 toneladas), un diámetro de 10 a 15 pies (2,8 a 4,2 m) y una altura de 2,5 a 3 pies (0,7 a 0,8 m), pues las de mayor tamaño dejaban una buena parte del carbón medio cocido, e incluso completamente crudo. Asimismo, en el vértice se tenía que dejar una abertura de 7 a 9 pulgadas (16 a 21 cm) de profundidad para recibir el fuego. Finalmente, la pila tenía que ser tapada con paja bastante espesa, u hojas secas, y recubierta con una capa de una pulgada (2 cm) de tierra o de carbón menudo y restos de coque.

La combustión se debería conducir como en el caso del carbón de leña, conservando la carbonera el fuego durante cuatro días. Después se ahogaría tapándola con tierra y se dejaría reposar de doce a quince horas. Una vez enfriados los *coaks*, se deberían almacenar en un lugar muy seco, comprobando que no hubiera pedazos de carbón mal desazufrados, en cuyo caso se separarían para ponerlos de nuevo en otra carbonera, ya que su utilización sería muy perjudicial para cualquier operación metalúrgica. Estimaba que tres obreros serían capaces de preparar, en una semana, de trescientos cincuenta a cuatrocientos quintales (16,1 a 18,4 toneladas) de coque.

Henry también refería la observación que había hecho Jars sobre el otro método que empleaban los ingleses para preparar el carbón mineral para las fundiciones en hornos cerrados. En este caso denominaban al producto obtenido *cinders* y recuperaban también “la parte untosa, con la qual fabrican su brea”.

El profesor de Matemáticas completó su encargo con una experiencia práctica, desazufrando una pila del carbón extraído de la mina de Villanueva del Río según las indicaciones de Jars. El experimento se vio alterado, pues unos pastores abrieron huecos en la carbonera antes de que concluyera el proceso, pero aun así, el coque resultante fue probado en una fragua “e hizo todas sus operaciones con mucha mas brevedad que el carbón de brezo”. No obstante, a la vista del fracaso de la empresa que explotaba la mina, concluía su informe advirtiendo que los excesivos gastos que conllevaba el laboreo de un criadero de carbón resultaban inasequibles para los particulares, por lo que recomendaba que fuera el Gobierno quien abriese el camino, demostrando prácticamente el modo de explotar con utilidad este tipo de yacimientos y aplicando el carbón, en las oficinas reales, en todos aquellos usos para los que resultaba apropiado.

### 3.3. Los informes de los artilleros Tomás de Morla y Jorge Juan Guillelmi sobre la desulfuración del carbón mineral en las ferrerías británicas de John Wilkinson

Desde mediados del siglo XVIII el Gobierno español intentó recabar información sobre las nuevas técnicas de fundición de metales que se estaban desarrollando en algunos países de Europa, recurriendo para ello a misiones de espionaje industrial. En un principio las operaciones estuvieron protagonizadas por militares: Antonio de Ulloa (1749-1752), Enrique Enríqui (1750-1751), Dámaso Latre y Agustín Hurtado (1751-1754), José Manes y Francisco de Estachería (1751-1760) [HELGUERA, 2011], aunque más tarde también se intentó con civiles: Juan José Deluyar e Ignacio de Montalbo (1778-1783), contando para ello con la mediación de la Real Sociedad Bascongada de Amigos del País [ROMÁN, 2017]. En todos los casos los esfuerzos resultaron infructuosos y no se logró ningún resultado práctico.

En 1787, el entonces director general de Artillería, conde de Lacy, encargó a dos profesores del Real Colegio de Artillería de Segovia, Tomás de Morla y Jorge Juan Guillelmi, que realizasen un viaje por las naciones que disponían de las mejores y más actualizadas industrias de aplicación militar para recoger información de primera mano sobre los principales adelantos técnicos y armamentísticos [HERRERO, 1992].

Un manuscrito titulado *Copia de los autógrafos del General Morla existentes en la Biblioteca de la Academia de Artillería*, hoy custodiado en la Biblioteca Central Militar (Madrid), permite conocer muchos detalles de la misión. El viaje comenzó en Francia, donde visitaron la moderna factoría siderúrgica a la inglesa establecida en Le Creusot, aunque la referencia de su paso por estas instalaciones no se ha conservado en los *Apuntes...* Seguidamente se dirigieron a Gran Bretaña, reconociendo el 11 de abril de 1789 la avanzada fundición de John Wilkinson en Bradley. Esta se encontraba próxima a numerosas minas de carbón que proporcionaban el combustible necesario, tenía un canal que la comunicaba con Birmingham y contaba con ocho bombas a vapor para accionar las grandes máquinas.

En Bradley, Morla pudo comprobar el eficaz uso que se hacía del coque, lo que le llevó a redactar una memoria titulada “Noticia del modo de preparar el carbón de tierra en las fábricas de Bradley, en el Condado de Warwick”. En ella afirmaba que era indispensable coquizar el carbón mineral cuando se tenía que emplear para reducir o afinar metales “porque de lo contrario se hace pastoso a la acción del fuego, cubre los metales, y esta no se ejerce contra ellos”; mantenía que el coque se quemaba sin ablandarse, ardía con más intensidad que la leña y el carbón vegetal, y no provocaba ningún perjuicio.

Seguía describiendo la batería de veinte hornos de destilación en línea que se empleaba para obtener el coque y consideró que este procedimiento de depuración de la hulla tenía una utilidad más grande y lucrativa que el de carbonización en pilas que se empleaba en Le Creusot, ya que permitía obtener los siguientes derivados:

1. un aceite esencial, blanco y suelto que se dice ser mucho mejor que el de linaza para la pintura y la imprenta; 2. un aceite empineumático y negro bueno para los navíos, y que tiene dicen la ventaja de matar la polilla e insectos; 3. brea; 4. alquitrán.

Añadía que, en aquel momento, se debatía intensamente sobre si estos productos eran corrosivos y podrían sustituir a los semejantes extraídos de maderas, y concluía intuyendo:

si como estos insulares pretenden se puede reemplazar por los productos de vapor de la hornaguera el aceite de linaza para las imprentas, y pintura; y la brea y alquitrán para los navíos, el descubrimiento será de indecible utilidad, pues que estaban obligados a comprar las cuantiosas cantidades que exige su Marina de brea y alquitrán en Rusia y América del Norte [MORLA, 1891, p. 591-597].

Lamentablemente, la falta de experiencia práctica de Morla y Guillelmi en estas cuestiones impidió que se pudiera llevar a cabo la transferencia a España de la tecnología de fabricación del coque y de sus productos derivados.

### **3.4. La memoria para purificar el carbón redactada por Agustín de Betancourt y los primeros hornos de desazufrado construidos en Asturias**

En 1780 se fundó la Sociedad Económica de los Amigos de Asturias. Uno de sus miembros, que tenía contacto con la Académie des Sciences de París, tuvo noticia de que, en Francia, habían encontrado el procedimiento para despojar al carbón mineral de las partículas bituminosas y sulfúreas que producían su tufo. A raíz de ello, en 1785 la Sociedad se puso en contacto con el conde de Aranda, que desempeñaba por aquel entonces el cargo de embajador en París, para que recabara información sobre el asunto [ADARO, 2003, p. 97-98]. Este encargó la tarea al joven Agustín de Betancourt, que se encontraba en la capital francesa como pensionado de la Corona para ampliar estudios y, con el tiempo, se convertiría en el ingeniero español más polivalente del Siglo de las Luces [GOUZÉVITCH, 2010].

Como resultado de sus indagaciones, en el mes de noviembre de 1785, Betancourt redactó una *Memoria sobre la purificación del carbón de piedra y modo de aprovechar las materias que contiene*, en la que describía detenidamente el experimento realizado por Faujas y sus resultados, acompañándola de unos dibujos del horno y su sistema de condensación de humos para obtener el betún. Este informe sería el precedente de otro posterior titulado *Memoria sobre el método de construir y usar los hornos para extraer el betún que tiene el carbón de piedra, quedando éste purificado*, que, según parece, fue el documento remitido en 1786 por el conde de Aranda a la Sociedad de Asturias, aunque su paradero actual se desconoce [BONET, 1988]. Como muestra de agradecimiento, la Corporación distinguiría a Aranda y al ingeniero canario como socios de mérito [CRABIFFOSSE, 1996].

En su memoria, Betancourt comparó los hornos utilizados en Sulzbach y Escocia con el construido en el Jardin du Roi. Consideraba que el modelo alemán era un conjunto de retortas que consumían mucho combustible para destilar el carbón, mientras que destacaba la economía y simplicidad del horno británico frente al francés, más “complicado, dispendioso y sujeto a continuas reparaciones”, lo que hacía que solo pudiera ser manejado por personas muy experimentadas, siempre difíciles de encontrar.

Indicaba que los hornos empleados por Dundonald habían sido diseñados a imitación de las carboneras de leña, ya que consistían en simples conos truncados en los que se amontonaba

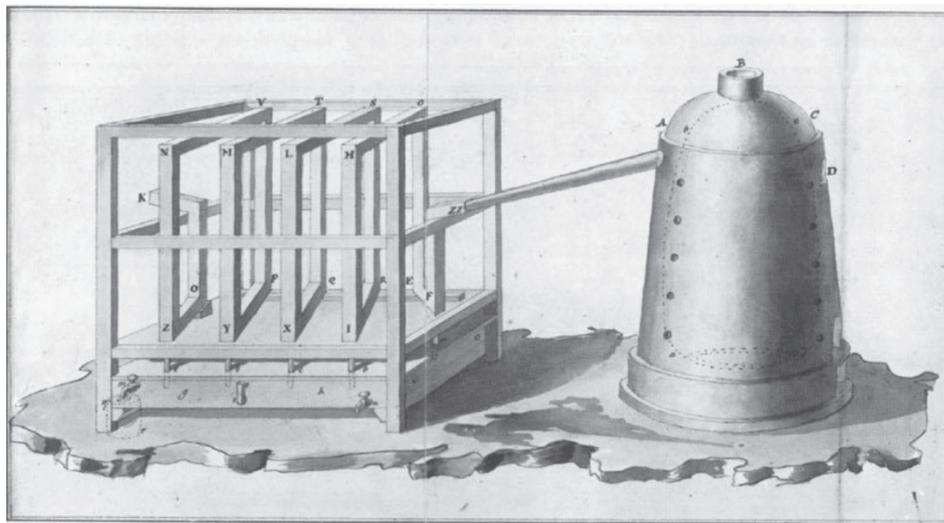


Figura 9. Horno de Betancourt [BONET, 1988, p. 282]

el carbón de piedra y que contaban con una serie de respiraderos dispuestos en varios círculos a diferente altura, imitando a los que se abrían en las pilas para que respirase el fuego que se producía en su interior. Para recoger los productos oleosos desprendidos durante la combustión de la hulla, se hacía pasar el humo por una zona fría en la que se condensaba la brea.

Habiendo tenido también ocasión de observar con detalle el horno de Faujas, Betancourt complementó su descripción con dos láminas para explicar mejor su funcionamiento. Su experiencia con los hornos de tostación de cinabrio de las minas de Almadén, que había estudiado en 1783 durante una comisión encargada por Floridablanca, le permitió señalar los defectos de los que adolecía el dispositivo francés. Además, con su genial inventiva, propuso una serie de modificaciones para conseguir un aparato más sencillo que mejorara la combustión del mineral, facilitara la expulsión de los vapores y optimizara la condensación y separación de los productos volátiles resultantes de la coquización, añadiendo el correspondiente dibujo (figura 9).

Para ello, entendía que la cámara no debería tener forma parabólica, sino cilíndrica, rematada con una bóveda esférica provista de una chimenea regulable y con una rejilla más pequeña en su base. También creía conveniente sustituir el complicado dispositivo de destilación por una única tubería de sección cuadrada en forma de alambique y añadir un gran recipiente lleno de agua para separar el alquitrán, el aceite y el álcali volátil por decantación [GOUZEVITCH, 2011].

Siguiendo las instrucciones de Betancourt, en 1786 la Sociedad Económica de Amigos del País de Asturias llegó a construir un horno “de dimensiones normales” para coquizar carbón cerca de Oviedo. Pero a pesar de los cuidados que se pusieron para reproducir el

experimento, el dispositivo reventó durante las operaciones de carbonización. En un informe que la Sociedad remitió al ministro de Marina, Antonio Valdés, el 23 de febrero de 1788, reconocía desconocer la causa exacta del accidente, barajando como posibilidades la falta de experiencia de los operarios, el no tener instrucción sobre la manera de amasar el barro con el que se hizo el horno o que el barro empleado no fuera capaz de resistir la actividad del fuego. También señalaba que habían tenido que abandonar los costosos ensayos por falta de recursos económicos [ADARO, 1981, p. 106].

Unos meses después, se constituyó en 1789 la *Compañía de Pumarejo*, posteriormente denominada *Compañía de San Luis*, que contrató a algunos técnicos ingleses con el doble fin de explotar en exclusiva las minas de carbón de piedra de las montañas de Santander y Asturias y de fabricar carbón desazufrado [COLL & SUDRIA, 1987]. A finales de ese mismo año, Francisco de Paula de Jovellanos le comunicó por carta a su hermano Melchor Gaspar que no se conocía en Asturias “la maniobra de desazufar el carbón” y le mencionaba el fracaso del horno construido por la Sociedad de Amigos del País. Seguidamente describía el método de carbonización en pilas como se lo había explicado Price, un ceramista inglés asentado en la región que le había asegurado que haría un horno formal para desazufar y recoger el alquitrán, “lo que casi se dispone como las alquitaras de los destiladeros ordinarios” [HUICI, 1931, p. 177]. Sin embargo, no parece que fuera este el que vio Jovellanos el 21 de octubre de 1790 en Carbayín (Siero), durante su tercera expedición de minas, y que describe como “un horno para ensayos pequeño, muy rebajado, sin respiradero, con boca en arco” [GARCÍA y DÍAZ, 2011, p. 77].

La *Compañía de Pumarejo* llegó a construir unos hornos de destilación operativos, de cuyas características y ubicación no ha quedado constancia, ya que en 1791 solicitó que su coque fuera admitido a prueba en la Real Fábrica de cañones de La Cavada (Cantabria) para sustituir al carbón de leña, indicando en su instancia que las muestras que remitía habían sido preparadas en unos nuevos hornos [ADARO, 1981, p. 277].

El ministro de Marina, Antonio Valdés, pidió informe al ingeniero Fernando Casado de Torres,<sup>9</sup> el cual afirmó que el producto era adecuado para ser usado en las fundiciones y que no cedía en calidad al de Staffordshire. Pero Casado, al igual que Jovellanos, se oponía al monopolio que pretendía obtener dicha compañía, por lo que propuso que sería más económico que la explotación de las minas y el transporte del carbón se hiciera por cuenta de la Real Hacienda [ADARO, 2003, p. 259], propuesta que sería finalmente aceptada.

---

9. Fernando Casado se había formado en la *Reale Accademia Militare* de Nápoles y posteriormente pasó a París, siendo pensionado por la Secretaría de Indias para mejorar sus conocimientos de maquinaria y geometría subterránea, lo que le permitió viajar por varios países europeos. Su sólida formación fue apreciada por Valdés quien, en 1789, promovió su ingreso en el Cuerpo de Ingenieros de la Marina y depositó en él toda su confianza para las cuestiones relacionadas con el aprovechamiento del carbón mineral y la aplicación de las nuevas tecnologías siderúrgicas. Ese mismo año el ministro de Marina le financió un segundo viaje a Inglaterra, donde visitó la fundición *Bradley Works*, propiedad de Wilkinson, y pudo estudiar la forma de preparar el coque.

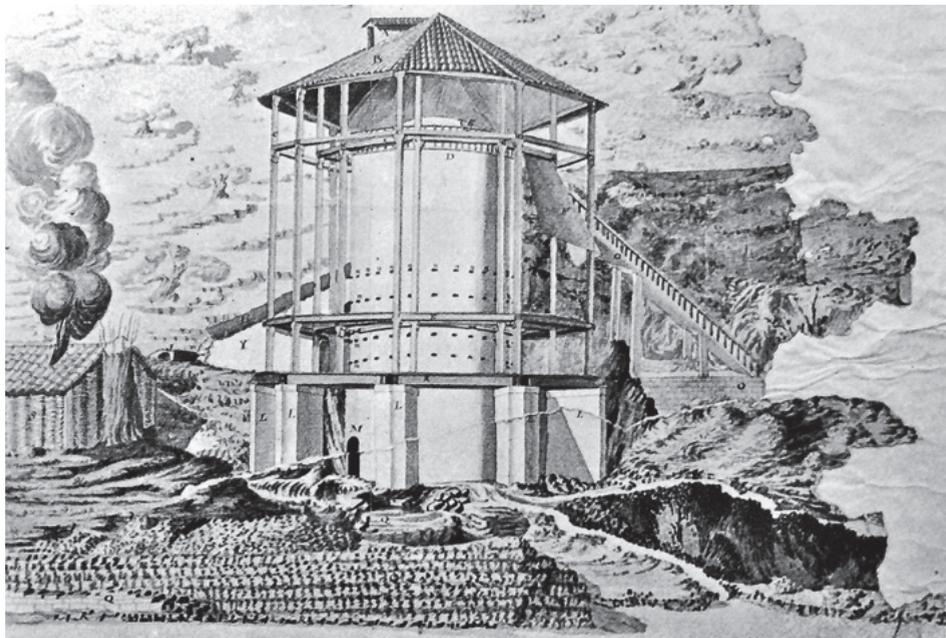


Figura 10. Horno de Casado [1794, Archivo General de la Marina Álvaro de Bazán]

La empresa también solicitó la exención de derechos durante veinte años para todo el carbón desazufrado que exportara, privilegio que tampoco le fue concedido. Estos reveses, añadidos a diversos pleitos que mantuvieron por la propiedad de algunas minas, provocaron su disolución, desconociéndose lo que fue de los primeros hornos de destilación de carbón construidos en España.

A manera de epílogo, se debe señalar que, en 1793, el ingeniero de marina Fernando Casado de Torres diseñó y construyó en Langreo (Asturias) un gran horno de destilación de carbón con recuperación de subproductos que colocaba a España en la vanguardia de esta tecnología [figura 10]. Analizar la importancia de ese innovador dispositivo requiere un artículo específico. Pero la fatalidad quiso que Fernando Casado se intoxicara durante las pruebas de funcionamiento y, en su ausencia, un accidente provocó la explosión del ingenio en octubre de 1794 [ADARO, 1981, p. 439-476]. La crisis finisecular y los aciagos acontecimientos con los que se inició el siglo XIX determinaron el abandono de nuevos intentos de desazufrado en hornos durante más de cincuenta años y, para entonces, el interés por obtener breas y alquitranes ya había decaído.

#### 4. CONCLUSIÓN

A lo largo del siglo XVIII se solventaron en Gran Bretaña las dificultades técnicas que entrañaba la fundición de hierro en alto horno utilizando coque. El cambio de paradigma

energético del carbón de leña al carbón mineral abrió el paso a la industrialización, así como a la obtención masiva de diversos productos derivados de la destilación de la hulla, especialmente breas y alquitranes, que resultaban esenciales para la navegación en aquella época. Estos logros tecnológicos se alcanzaron de forma totalmente empírica y gracias a la concurrencia de un conjunto de factores sociales, demográficos y económicos que conformaron un círculo virtuoso, pero en el que también intervino, de forma decisiva, la fortuna de contar con yacimientos de carbón fácilmente coquizable.

El resto de potencias europeas trataron de adoptar la ‘fundición a la inglesa’, pero se encontraron con diversas dificultades que retrasaron dicha consecución durante casi medio siglo. Francia fue la nación que puso mayor empeño en abordar el problema desde el punto de vista científico. Ya en 1774 Gabriel Jars subrayaba en sus *Voyages Metallurgiques* “la necesidad de una metalurgia razonada y sujeta a principios que solo la experiencia, la química y varias partes de la física pueden establecer firmemente”. Pero aunque en un periodo relativamente breve de tiempo la ciencia consiguió evolucionar desde los tradicionales saberes de la alquimia al nacimiento de la química cuantitativa, pasando por la teoría del flogisto, la enorme complejidad del proceso siderúrgico quedó fuera del alcance de los conocimientos de la época. La gran variedad de carbones existentes supuso otro obstáculo, debido a la dificultad de caracterizarlos [GONZÁLEZ *et al.*, 2020] y de conseguir las propiedades de un buen coque siderúrgico [DÍEZ, 2013]. A todo ello se añadieron las trabas y recelos para incorporar al mercado un nuevo producto de características distintas al tradicional, como amargamente señalaría Buffon. Estos problemas incidieron en que decayera el interés por la obtención de los productos derivados de la destilación del carbón.

En España, los sucesivos ministros de Marina borbónicos trataron de promocionar la actividad científica y técnica para evitar el retraso de la industria militar nacional. En el último cuarto de siglo XVIII se prestó especial atención a la fabricación de cañones de hierro fundidos con coque y a la obtención de breas y alquitranes minerales. Se dedicaron considerables recursos para tratar de conseguir la transferencia tecnológica desde Gran Bretaña y Francia. No obstante, las luchas políticas determinaron que las medidas adoptadas adolecieran de cierta improvisación y carecieran de garantías para sostener los planes emprendidos a lo largo del tiempo. Los resultados prácticos del espionaje industrial, de la contratación de técnicos extranjeros y de la promoción del conocimiento fomentada por los ‘amigos del país’ fueron muy parcos y puntuales, pues la sociedad española no estaba preparada para abordar los cambios que requería la Revolución Industrial.

## BIBLIOGRAFÍA

- ADARO, Luis (1981). *Datos y documentos para una historia minera e industrial de Asturias*. Gijón, Suministros Adaro S.A.
- ADARO, Luis (2003). *Jovellanos y la minería en Asturias*. Gijón, Fundación Foro Jovellanos del Principado de Asturias / Unión Española de Explosivos S.A.
- [AENOR] (1990). *Carbón y coque. Terminología*. [UNE 32101:1990]. Madrid, Asociación Española de Normalización y Certificación.

- ANÓNIMO (1776). *Extractos de las Juntas generales celebradas por la Real Sociedad Bascongada de los Amigos del País en la villa de Vergara por septiembre de 1776*. Vitoria, Por Tomás de Robles y Navarro, Impresor de la misma Real Sociedad.
- ANÓNIMO (1778). *Extractos de las Juntas Generales celebradas por la Real Sociedad Bascongada de los Amigos del País en la villa de Bilbao, septiembre de 1778*. Vitoria, Por Tomás de Robles y Navarro, Impresor de la misma Real Sociedad.
- ANÓNIMO (1790). “Procès-verbal fait au Jardin du Roi, le 15 avril 1785, sur l’opération du goudron et de l’alkali volatil, tirés du charbon de terre”. En: Barthélemy Faujas. *Essai sur le goudron du charbon de terre*. París, Faujas-de-St.-Fond, 38-41.
- ANÓNIMO (1857). *English patents of inventions, Specifications. A.D. 1772, n° 1.015: Manufacture of mineral tar and oil and accessory products*. Londres, George Edward Eyre and William Spottiswoode.
- ANÓNIMO (1865). *Calendar of state papers domestic: Elisabeth, 1581-1590*. Londres, Her Majesty’s Stationery Office.
- ASHTON, Thomas S. (1924). *Iron and steel in the Industrial Revolution*. Manchester, University Press.
- ÅSTRÖM, Sven-Erik (1982). “Swedish iron and the english iron industry about 1700: Some neglected aspects”. *Scandinavian Economic History Review*, 30(2), 129-141.
- BALLOT, Charles (1912). “La révolution technique et les débuts de la grande exploitation dans la métallurgie française: L’Introduction de la fonte au coke en France et la fondation du Creusot”. *Revue d’histoire des doctrines économiques et sociales*, 5, 29-62.
- BALLOT, Charles (1978). *L’Introduction du machinisme dans l’industrie française*. Geneve, Slatkine Reprints.
- BECHER, Johab Joachim (1683). *Narrishe weisheit, un weise narrheit*. Francfort, Verlag Johann Peter Bubrobé.
- BONET, Antonio (1988). “Un manuscrito inédito de Agustín de Betancourt sobre la purificación del carbón”. *Fragmentos, Revista de Arte*, 12/14, 279-285.
- BOSTWICK, William (2015). *The brewer’s tale: A history of the world according to beer*. New York, Norton.
- BOUCHU, Etienne-Jean (1762). *Art des forges et fourneaux a fer*. París, Saillant et Nyon.
- BRADLEY, Margaret (1992). “Engineers as military spies? French engineers come to Britain 1780-1790”, *Annals of Science*, 49, 137-161.
- BRET, Patrice (2009). “La fonderie de canons d’ Indret. De quelques modes de circulation technique a la fin du XVIIIe siècle”. *Quaderns d’Historie de l’Enginierie*, 10, 53-66.
- BUFFON, Georges Louis Leclerc de (1783-1788). *Histoire naturelle des minéraux*. París, l’Imprimerie Royale. 6 vols.
- CRABIFFOSSE, Francisco (1996). “El horno de Agustín de Betancourt: ciencia, técnica y carbón en la Asturias del siglo XVIII”. En: Ignacio González (dir.). *Betancourt, los inicios de la ingeniería moderna en Europa*. Madrid, CEHOPU, 71-77.
- CHALONER, William H. (1951). *Builders of industry Part-I: John Wilkinson, ironmaster*, <<https://www.historytoday.com/archive/builders-industry-part-i-john-wilkinson-ironmaster>> [Consulta: 01/12/2021].
- CHERMETTE, Alexis (1981). “La famille Jars et sa contribution à l’exploitation des mines lyonnaises au XVIIIe et au XIXe siècles”. *Bulletin mensuel de la Société Linnéenne de Lyon*, 5, 1-11.
- CHEVALIER, Jean (1946). *Le Creusot: berceau de la grande industrie française*. París, Perspectives.
- CIPOLLA, Carlo M. (1967). *Cañones y velas. Las bases del predominio europeo en el mundo (1400-1700)*. [Traducción de Gonzalo Pontón]. Barcelona, Aries.
- CLOW, Archibald & CLOW, Nan L. (1942). “Lord Dundonald”. *The Economic History Review*, 12(1-2), 47-58.

- COCHRANE, Archibald (1785). *Account of the qualities and uses of coal tar and coal varnish*. Edinburgh, Printed by William Smellie.
- COLL, Sebastián & SUDRIA, Carles (1987). *El carbón en España, 1770-1961: una historia económica*. Madrid, Turner.
- COMES, Joseph (1786). *Memoria sobre el carbón de piedra, para persuadir y facilitar su uso en Cataluña*. Barcelona: Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona.
- COMPARATO, Guillaume (2018). *Barthélemy Faujas de Saint-Fond, parcours d'un homme de science mondain au tournant des Lumières (1741-1819)*. Grenoble, Histoire, Université Grenoble Alpes.
- CONTURIE, Pierre (1951). *Histoire de la fonderie nationale de Ruelle (1750-1940) et des anciennes fonderies de canon de fer de la Marine. Première partie (1750-1855)*. Paris, Imprimerie Nationale.
- COX, Nancy (1990). "Imagination and innovation of an industrial pioneer: The first Abraham Darby". *Industrial Archaeology Review*, 12(2), 127-144.
- DANGENOUST, Blanc (1761). "Détails sur la consommation du charbon pour les forges & fourneaux à fer, avec des réflexions utiles pour l'exploitation des mines de fer, & des tentatives pour y employer du charbon de houille". En: Henri Lousie Duhamel. *Art du charbonnier, ou manière de faire le charbon de bois. Additions et corrections relatives à l'Art du charbonnier*. Paris, Desaint & Saillant, 2-5.
- DEANE, Phyllis (1991). *La primera revolución industrial*. Barcelona, Península.
- DELAMÉTHÉRIE, Jean-Claude (1787). "Mémoire sur la fonderie et les forges royales établies au Creusot, pres de Mont Cenis en Bourgogne". *Observations sur la Phisique, sur l'Histoire Naturelle et sur les Arts*, 30, 60-67.
- DÍAZ, Manuel (2020). "El arsenal de Cartagena y Jorge Juan: historia, proyecto, diques y producción de jarcia para la Real Armada". En: Manuel García (ed.). *Las innovaciones de la Armada en la España del siglo de Jorge Juan*. Madrid, CSIC, 557-598.
- DÍEZ, María Antonia (2013). "Del carbón vegetal al coque en la industria del hierro y del acero". *Fundipress: revista de la fundición*, 45, 48-56.
- DOUXCHAMPS-LEFÈVRE, Cécile (1968). "Les premiers essais de fabrication du coke dans les charbonnages du Nord de la France et de la région de Charleroi à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle". *Revue du Nord*, 50(196), 25-34.
- DUHAMEL, Henri Lousie (1761). *Art du charbonnier, ou Manière de faire le charbon de bois*. Paris, Chez Desaint & Saillant.
- DUNN, Kevin M. (2003). *Caveman chemistry: 28 Projects, from the creation of fire to the production of plastics*. Irvine [California], Universal Publishers.
- DURÁN, Antonio José & CURBERA, Guillermo (2005). "Quinientos años de Matemáticas en Sevilla y algunos menos en la Universidad". En: Manuel Castillo (coord.) *Historia de los estudios e investigación en Ciencias en las Universidad de Sevilla*. Sevilla, Universidad de Sevilla, 75-144.
- ELE, Martin (1697). "An account of the making pitch, tar, and oil out of a blackish stone in Shropshire". *Philosophical Transactions*, 19(228), 544.
- ENCISO, Luis Miguel (2010). *Las Sociedades económicas en el siglo de las Luces*. Madrid, Real Academia de la Historia.
- FAIRON, Émile (1926). *Les premiers essais de fabrication du coke en Belgique*. Lieja, Éditions de la Vie Wallonne.
- FAUJAS DE SAINT-FOND, Barthlemy (1797). *Voyage en Angleterre, en Écosse et aux îles Hébrides*. Paris, Chez H.J. Jansen, 2 vols.
- FLACHAT, Eugène; BARRAULT, Alexis & PÉTIET, Jules (1842-1844). *Traité de la fabrication du fer et de la fonte envisagée sous les rapports chimique, mécanique et commercial*. Paris, Imprimerie de Crapelet. 2 vols.

- FLINN, M.W. (1959). "Abraham Darby and the coke-smelting process". *Economica*, 26(101), 54-59.
- FORBES, Robert J. (1970). *A short history of the art of distillation: from the beginnings up to the death of Cellier Blumenthal*. Leiden, Brill.
- GARCÍA, MARÍA NÉLIDA (2006). *Comerciendo con el enemigo: el tráfico mercantil anglo-español en el siglo XVIII (1700-1765)*. Madrid, CSIC.
- GARCÍA, Noelia & DÍAZ, Juan (2011). *Gaspar Melchor de Jovellanos. Los viajes por Asturias (1790-1801)*. Oviedo, ALSA Grupo.
- GARZA, Francisco Carlos de (1789). *Breve historia del carbón mineral*. Almadén, 24/5/1789. Biblioteca del IGME, signatura: Igni1-I/3.
- GENSSANE, Antoine de (1770-1776). *Traité de la fonte des mines para le feu du charbon de terre*. Paris, Chez Vallat-La-Chapelle, 2 vols.
- GENSSANE, Antoine de (1779). "Sur le dessouffrement du charbon-de-terre & sur la construction des fourneaux propres à cette opération". *Observations sur la Physique, sur l'Histoire Naturelle et sur les Arts*, 14, 337-343.
- GÓMEZ-ALBA, Julio (2007). "Historia económica, minera y geológica de la cuenca carbonífera de Surroca-Ogassa". *Monografías del Museu de Ciències Naturals*, 4, 15-90.
- GONZÁLEZ PRIETO, Luis Aurelio; GONZÁLEZ-PUMARIEGA SOLÍS, Pelayo & GONZÁLEZ PALOMARES, David (2020). "Louis-Joseph Proust y los primeros análisis de carbones asturianos. Crónica de unos ensayos químicos olvidados en la historia minero-industrial de Asturias". *Boletín Geológico y Minero*, 131(4), 867-888.
- GOUZÉVITCH, Irina (2010). "Les voyages en France et en Angleterre et la naissance d'un expert technique: le cas d'Agustín Betancourt (1758-1824)". *Documents pour l'histoire des techniques*, 19, 97-117.
- GOUZÉVITCH, Irina & GOUZÉVITCH, Dimitri (2011). "Agustín Betancourt and mining technologies: from Almadén to St. Petersburg (1783-1824)". En: Ian Inkster (ed.) *History of Technology*, 30 [European technologies in Spanish history]. London, The Institute of Historical Research, University of London, Bloomsbury, 13-31.
- HARRIS, John. R. (1998). *Industrial espionage and technology transfer. Britain and France in the eighteenth century*. Ashgate, Aldershot and Brookfield.
- HAYMAN, Richard (2003). *The Shropshire wrought-iron industry c. 1600-1900. A study of technological change*. Birmingham, The University of Birmingham.
- HELGUERA, José (2011). "The beginnings of industrial espionage in Spain (1748-1760)". En: Ian Inkster (ed.) *History of Technology*, 30 [European technologies in Spanish history]. London, The Institute of Historical Research, University of London, Bloomsbury, 1-12.
- HENRY, Peter (1770). "Extracto de una memoria sobre el carbón mineral". En: *Memorial literario, instructivo y curioso de la Corte de Madrid*, 19, 28-42; "Continuacion sobre la mina de carbon de Villanueva del Río", *Ibid.*, 96-104; "Prosigue el Señor Henry insertando el modo de preparar el carbon mineral, para substituirlo al carbon de leña en las operaciones metalúrgicas", *Ibid.*, 187-196; 258-265; "Carta de Don Pedro Henry, remisiva de los anteriores Discursos, sobre el carbon de piedra á la Real Sociedad de Sevilla". *Ibid.* 369-374.
- HERRERO, María Dolores (1992). *Ciencia y milicia en el siglo XVIII. Tomás de Morla, artillero ilustrado*. Segovia, Patronato del Alcázar.
- HIGGS, Carl (2009). "Dud Dudley and Abraham Darby; forging new links". *Black Country Society*, <[https://www.sedgleymanor.com/people/dud\\_dudley.html](https://www.sedgleymanor.com/people/dud_dudley.html)> [Consulta: 01/12/2021].
- HUICI, Vicente (1931). *Miscelánea de trabajos inéditos varios y dispersos de D.G.M. de Jovellanos*. Barcelona, NAGSA.

- HYDE, Charles K. (1977). *Technological change and the British iron industry. 1700-1870*. Princeton, Princeton University Press.
- JACKSON, Paul (2008). "Non-recovery coke making in the U.K. Part one: coking-in-heaps". *Archive. The Quarterly Journal for British Industrial and Transport History*, 57, 3-33.
- JAMES, Harold (2006). *Family capitalism: Wendels, Haniels, Falcks and the continental european model*. Cambridge [Mass.], The Belknap press of Harvard University Press.
- JARS, Gabriel (1770). "Manière de préparer le charbon minéral, autrement appelle houille, pour le substituer su charbon de bois dans les travaux métallurgiques, mise en usage dans les mines de Sainbel. En: Henri Lousie Duhamel, *Art du charbonnier, ou manière de faire le charbon de bois. Additions et corrections relatives a l'Art du chabonnier*. Paris, Desaint & Saillant, 325-338.
- JARS, Gabriel (1774-1781). *Voyages métallurgiques, ou recherches et observations sur les mines & forges de fer, la fabrication de l'acier, celle du fer-blanc, & plusieurs mines de charbon de terre, faites depuis l'année 1757 jusques & compris 1769, en Allemagne, Suède, Angleterre & Ecosse*. Lyon & Paris, Gabriel Regnault, 3 vols.
- KING, Peter W. (2002). "Dud Dudley's contribution to metallurgy". *Historical Metallurgy*, 36(1), 43-53.
- LABOULAIS, Isabelle (2010). *Les Voyages métallurgiques de Gabriel Jars (1774-1781). Un recueil au service de l'art de l'exploitation des mines*. Open Edition Books. <<http://books.openedition.org/pur/104351>> [Consulta: 01/12/2021].
- LAFUENTE, Antonio & PESET, José Luis (1985). "Militarización de las actividades científicas en la España ilustrada (1726-1754)". En: José Luis Peset (ed.). *La Ciencia moderna y el Nuevo Mundo*. Madrid, CSIC, 127-147.
- LAVOISIER, Antoine & BERTHOLLET, Claude Louis (1790). "Rapport de Mrs. les Commissaires de l'Académie Royale des Sciences, sur le goudron minéral tiré du charbon de terre, dans l'expérience faite au Jardin du Roi, par M. Faujas de Saint-Fond". En: Barthélemy Faujas. *Essai sur le goudron du charbon de terre*. Paris, Imp. Royale, 41-48.
- LINDMARK, Magnus & OLSSON, Frederik (2018). "From organic to fossil and in-between: new estimates of energy consumption in the Swedish manufacturing industry during 1800–1913". *Scandinavian Economic History Review*, 66(1), 18-33.
- LUTER, Paul (2006). "Archibald Cochrane, 9th earl of Dundonald (1748-1831): father of the British Tar industry". *Broseley Local History Society*, 28, 2-20.
- MANTOUX, Paul (1906). *La révolution industrielle au XVIIIe siècle. Essai sur les commencements de la grande industrie moderne en Angleterre*. Paris, Eduoard Cornély.
- MARTIN, John (2020). *Coke in West Cumberland*. Cumbria Industrial History- <<https://www.cumbria-industries.org.uk/cumbria-industrial-history-society>> [Consulta: 01/12/2021].
- MORAND, Jean-François-Clément (1768-1779). *L'art d'exploiter les mines de charbon de terre*. Paris, Desaint & Saillant. 3 vols.
- MORLA, Tomás de (1891). *Copia de los autógrafos del General Morla existentes en la Biblioteca de la Academia de Artillería*. Biblioteca Central Militar, signatura: MS-188.
- MOSLEY, Stephen (2014). "Environmental history of air pollution and protection". En: Mauro Angioletti & Simone Neri (eds.) *The basic environmental history*. London, Springer, 143-169.
- MOTT, Reginald Arthur (1957). "Abraham Darby (I and II). and the coal-iron industry". *Transactions of the Newcomen Society*, 31(1), 49-93.
- MOTT, Reginald Arthur (1983). *Henry Cort, the great finer: creator of puddled iron*. London, The Metals Society.
- MUSHET, David (1840). *Papers on iron and steel, practical and experimental; a series of original communications made to the philosophical magazine, chiefly on those subjects*. London, John Weale.

- NEF, John U. (1977). "An early energy crisis and its consequences". *Scientific American*, 237(5), 140-151.
- OSBORNE, Roger (2013). *Iron, steam and money. The making of the Industrial Revolution*. London, The Bodley Head.
- PAUL, B.H. (1863). "Destructive distillation, considered in reference to modern industrial arts". *The Journal of the Society of Arts*, 11, 470-478.
- PERCY, John (1861). *Metallurgy. The art of extracting metals from their ores*. London, John Murray.
- PESET, José Luis & LAFUENTE, Antonio (1988). "Las actividades e instituciones científicas en la España ilustrada". En: Manuel Sellés *et al.* (eds.) *Carlos III y la ciencia de la Ilustración*. Madrid, Alianza Universidad.
- PORTELLA, Eugenio (1996). *La Química en el siglo XIX*. Madrid, Akal.
- QUINTERO, José (2007). "Betunes para La Carraca". *Revista de Historia Naval*, 25(96), 87-96.
- RAISTRICK, Arthur (1953). *Dynasty of iron founders: The Derbys and Coalbrookdale*. London, Longman.
- ROMÁN, Pascual (2017). "Espionaje y azar en el aislamiento del wolframio". En: Juan Manuel Salas & Luis Fermín Capitán (coords.) *Entre la Alquimia y la Química*. Universidad de Granada, 93-120.
- RYSS-PONCELET, Maxime (1811). *Mémoire sur l'appareil de distillation propre à éclairer les ateliers, appartements, etc.* Lieja, J.A. Latour.
- SAINT PASTOUS, Juan María (1786). "Arte de descubrir y hacer el carbón mineral". En: *Memorial literario, instructivo y curioso de la corte de Madrid*, 26, 241-242.
- SÁIZ, J. Patricio (1999). "Patentes, cambio técnico e industrialización en la España del siglo XIX". *Revista de Historia Económica*, 17(2), 265-302.
- SCHLUTTER, Christopher-André (1753). *De la fonte des mines, des fonderies, &c.* Paris, M- Hellot.
- SCRIVENOR, Harry (1854). *A comprehensive history of the iron trade*. London, Longman.
- SPEAR, Brian (2014). "Coal-parent of the Industrial Revolution in Great Britain: The early patent history". *World Patent Information*, 39, 85-88.
- TILLY, M. de (1758). *Mémoire sur l'utilité, la nature et l'exploitation du charbon mineral*. Paris, Chez Augustin-Martin Lottin.
- TORRES, Diego de (1785). *Memoria en que se demuestran las utilidades que resultaran de usar el carbon de piedra de las minas de Utrillas, y demás del Reyno, y modo de conducirlo con mayor economía y beneficio à esta capital y otras partes*. Zaragoza, Mariano Miedes.
- TRINDER, Barriem S. (1974). *The Darbys of Coalbrookdale*. Chichester, Phillimore.
- VENEL, Gabriel F. (1775). *Instructions sur l'usage de la houille*. Avignon, Gabriel Regnault.
- VILLAS, Siro (2005). "Ciencia, técnica y poder". En: Manuel Silva (coord.). *Técnica e Ingeniería en España II. El siglo de las Luces. De la ingeniería a la nueva navegación*. Zaragoza, Real Academia de Ingeniería / Institución Fernando el Católico / Prensas Universitarias de Zaragoza, 75-114.
- WEIGHTMAN, Gavin (2007). *The industrial revolutionaries: The making of the Modern World, 1776-1914*. New York, Grove Press.
- WERTIME, Theodor A. (1961). *The coming of the age of steel*. Chicago, University of Chicago Press.
- WRIGLEY, Edward Arthur (1992). "El suministro de materias primas en la Revolución Industrial". En: Edward Arthur Wrigley *Gentes, ciudades y riqueza. La transformación de la sociedad tradicional*. [Traducción de Enrique Gavilán]. Barcelona, Crítica, 110-133.
- ZEEUW, Jan Willem (1974). "Peat and the Dutch Golden Age. The historical meaning of energy-attainability". *A.A.G. Bijdragen*, 21, 3-31.