

La trompa de agua o trompa de los Pirineos. Recuperación del principio funcional para aplicaciones de bombeo. Aproximación mediante las ecuaciones electromagnéticas.

Dr. Ricard Bosch y Tous¹, Víctor Fuses Navarra²

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica (DEE)
E.T.S.E.I.B., Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
Avda. Diagonal, núm 647. 08028 Barcelona (Spain)
Tel.:+34 93 401 67 30, e-mail: bosch@ee.upc.edu

² Estudiante de doctorado al mismo departamento (DEE – ETSEIB – UPC)
e-mail: vfuses@catalonia.net

Resumen

La “Farga Catalana”, o procedimiento directo de obtención de hierro y acero a partir del mineral, es un claro ejemplo del éxito de la orquestación de múltiples disciplinas, ya que su hierro gozó de un gran prestigio durante siglos. Parte de este éxito provenía del uso de la trompa de agua para obtener aire a cierta presión para inyectarlo al horno.

La construcción en el laboratorio de un modelo piloto a escala 1:3 de trompa a partir de fuentes históricas escritas, ha conducido al estudio del fluido bifásico que desciende por la trompa mediante la adaptación de las ecuaciones del electromagnetismo para modelizar y mejorar su comportamiento.

Su bajo rendimiento sirvió de inspiración para iniciar el desarrollo de una máquina hidroeléctrica para recuperar parte de esta energía. No obstante, la trompa de agua puede usarse directamente como tecnología para el desarrollo como artilugio de extrema sencillez para proporcionar aire a partir de un caudal de agua, y por el mismo principio funcional, para elevar agua a partir de aire.

Palabras llave

“Farga Catalana”, “Método Catalán”, “trompa de agua”, “flujo bifásico”, “flujo aire agua”, ecuaciones electromagnéticas, máquina hidroeléctrica integrada.

1. La “Farga Catalana” y la trompa de agua o de los Pirineos

La arqueología industrial cuando se junta con la ingeniería puede ofrecer múltiples ideas a desarrollar que por separado no parecían interesantes.

Históricamente, la técnica hidráulica, neumática, mecánica, química, metalúrgica, y posteriormente eléctrica, han ido de la mano para dar grandes frutos de la técnica y la civilización.

El método directo de obtención de hierro a partir del mineral por acción del carbón vegetal es conocido como “procedimiento catalán” o de la “Farga Catalana”. Igualmente, se entiende por “Farga Catalana” el establecimiento donde se aplicaba este procedimiento, y en general, toda “farga” situada en Cataluña.

Sería lo equivalente a una forja, en la acepción de “lugar donde se reduce a metal el mineral de hierro”, y no en la acepción de forjar el hierro para la obtención de herramientas o productos intermedios o finales, ya que en la “farga”, la materia prima es el mineral de hierro y el carbón vegetal.

Tuvo una fuerte implantación en los Pirineos catalán y francés hasta el desarrollo de los métodos indirectos (alto horno y convertidores) hacia finales del siglo XIX [1]

Este método consiste en el calentamiento de la “mena” o mineral de hierro con carbón vegetal en un horno bajo, que recibe el aire de la trompa de agua o de fuelles, y la posterior reducción del mineral a hierro, sin llegar al punto de fusión como en los altos hornos o fundiciones. Mediante el forjado del “masser” (nombre que recibe la masa esponjosa obtenida) con el mazo, se va expulsando la escoria que contiene. Esta masa esponjosa se divide en trozos, llamadas “masocas” (cuando son dos), y “masoquetas” (cuando son cuatro) para poder calentar unos y trabajar otros simultáneamente, hasta conseguir hierro consolidado.

El emplazamiento de las “fargas”, durante la baja edad media, con motivo del aumento de la demanda de utensilios de hierro, se vincula a los cauces de los ríos y cursos menores de agua para disponer de la fuerza motriz

necesaria para mover los martillos y accionar la trompa, y se aleja del pie de mina y del pie de las explotaciones forestales.

La trompa de agua o trompa de los Pirineos es una máquina hidráulica por la que a partir de un caudal de agua suficiente y un desnivel de entre cinco y doce metros, se obtiene un cierto caudal continuo y sostenido de aire a la presión suficiente para conducir e inyectar en el horno para alimentar la combustión del carbón y aportar el oxígeno para la reducción del mineral en metal. [2],[3] Otras referencias indican que el desnivel mínimo necesario es de 3,5 m.

En este tipo de instalaciones el aprovechamiento del agua era un factor clave para la producción del hierro. Generalmente, una toma desviaba parte del caudal de un curso de agua hacia un canal de derivación que llevaba el agua hasta el emplazamiento de la “farga”, donde se acumulaba en una balsa superior de regulación para garantizar la disponibilidad de agua en los momentos de mayor consumo.

La energía hidráulica se empleaba por un lado para mover las ruedas, de palas o cajones, que accionan a su tiempo los mazos, los martinets, y los fuelles de aire si los había, y por otro lado, el agua de la balsa alimentaba también las trompas de agua, en una proporción mucho menor. En el apartado “2. Trompa de agua de referencia” se describen las partes y componentes de una trompa típica.

La trompa, como elemento característico del “procedimiento Catalán” [1] es un aparato de soplar aire de concepción robusta: dado que no tiene partes móviles, requiere poco mantenimiento y raramente era causa de parada del proceso, en contraposición a los fuelles, que requerían ajustes y reparaciones con más frecuencia. Otra ventaja de las trompas es la constancia del caudal de aire, frente a la variabilidad propia del sistema alternativo de los fuelles. Esto permitía obtener una temperatura más elevada y constante en el horno, y posiblemente reducir el tiempo de la operación (a unas 6 horas).

En cuanto a las características del aire inyectado, tanto su temperatura como la humedad eran diferentes en uno y otro caso. Parece que en el caso de la trompa, una temperatura del aire posiblemente menor y un mayor contenido en agua, ya sea en forma de vapor o de pequeñas gotas, podía favorecer el proceso de reducción del mineral y conferir al hierro algunas diferencias en sus propiedades.

También se apunta la posibilidad de que en las épocas de más calor del verano, el aire de las trompas fuera perjudicial para el proceso, ya que a finales del verano normalmente se reducía la actividad en las “fargas” con motivo de la compaginación de este trabajo con las tareas del campo, un motivo al que se podría añadir una peor calidad del sople de la trompa. Durante este tiempo de parada, normalmente se optaba por realizar tareas de mantenimiento.

2. Trompa de agua de referencia

La fuente utilizada como principal referencia, por su detalle y exhaustividad, es la descripción que hace T. Richard, ingeniero de “fargas” y altos hornos, en 1838. Entre 1.832 y 1.836 se encargó de los ensayos de perfeccionamiento de las “fargas” del departamento del Ariège, en el sur de Francia. A continuación se presenta un resumen de la descripción que hace de la trompa de del pueblo de Montgaillard [2],[3]:

1. Una balsa superior mantenida constantemente llena, con un tapón de regulación (“trompill”).
2. Uno, dos o tres árboles verticales vaciados interiormente con una sección normalmente cuadrada de unos 19 cm de lado y 7,3 m de largo, para un salto de unos 9 m. Tiene unos agujeros a pocos centímetros de la parte superior llamados “espiralls” por donde entra el aire. A esa altura, en el interior, hay un estrechamiento “escanyall”. Esto conlleva la aceleración del agua y la reducción de su presión por debajo de la atmosférica (efecto Venturi).
3. Una caja herméticamente cerrada, la caja de los vientos. A unos 17 cm de la boca de los árboles hay una losa donde pica el agua (banqueta).
4. Un tubo vertical sobresaliendo llamado hombre o “centinella” por donde sale el aire a presión, situado alejado de la caída del agua para evitar arrastre de gotas de agua.
5. Un pico (la “burja”), alargado mediante un tubo de piel de cordero (el “buirac”), adaptado a un tubo de hierro (la “busca” o cañón del “buirac”) que conduce el aire hasta la tobera que a su vez comunica con el interior del horno.
6. Un tubo de salida del agua de la caja de los vientos.

El cañón del buirac tiene 1,61 m de longitud con un agujero de salida de unos 35 mm de diámetro. Este se puede introducir más o menos a la tobera, que es una especie de cucurucho o cono aplastado de cobre rojo de boca en forma de elipse de ejes 13 cm el vertical por 23 cm la horizontal y desembocadura dentro el crisol de forma rectangular irregular de entre 30 y 45 mm de lados

La medida de la presión del aire se realiza en la parte superior del hombre o “centinella”, mediante un manómetro de mercurio llamado “pesavientos”. La presión obtenida se mide en grados, cada uno de los cuales equivale a 4,51 mm Hg. La presión de trabajo máxima habitual era de 18 °, que son 81,2 mm de Hg (10,82 kPa)

El caudal de agua necesario para dar la máxima presión de aire es de 0,153 m³/s. El salto de agua de esta trompa es de unos 9 metros entre la superficie libre del canal y la

cota de la banqueta donde choca el flujo. Bajo estas condiciones de funcionamiento y por una temperatura y presión ambientales de 20 ° C y 760 mm de Hg, se obtiene un caudal de aire de 8,9 kg/min (0,1783 kg/s), de densidad 1,309 kg/m³, que representa un volumen de 6,8 m³/min de aire (0,1133 m³/s).

El rendimiento entendido como la relación entre la potencia neumática del aire y la potencia hidráulica del agua varía entre el 8% y el 15% según el punto de funcionamiento.

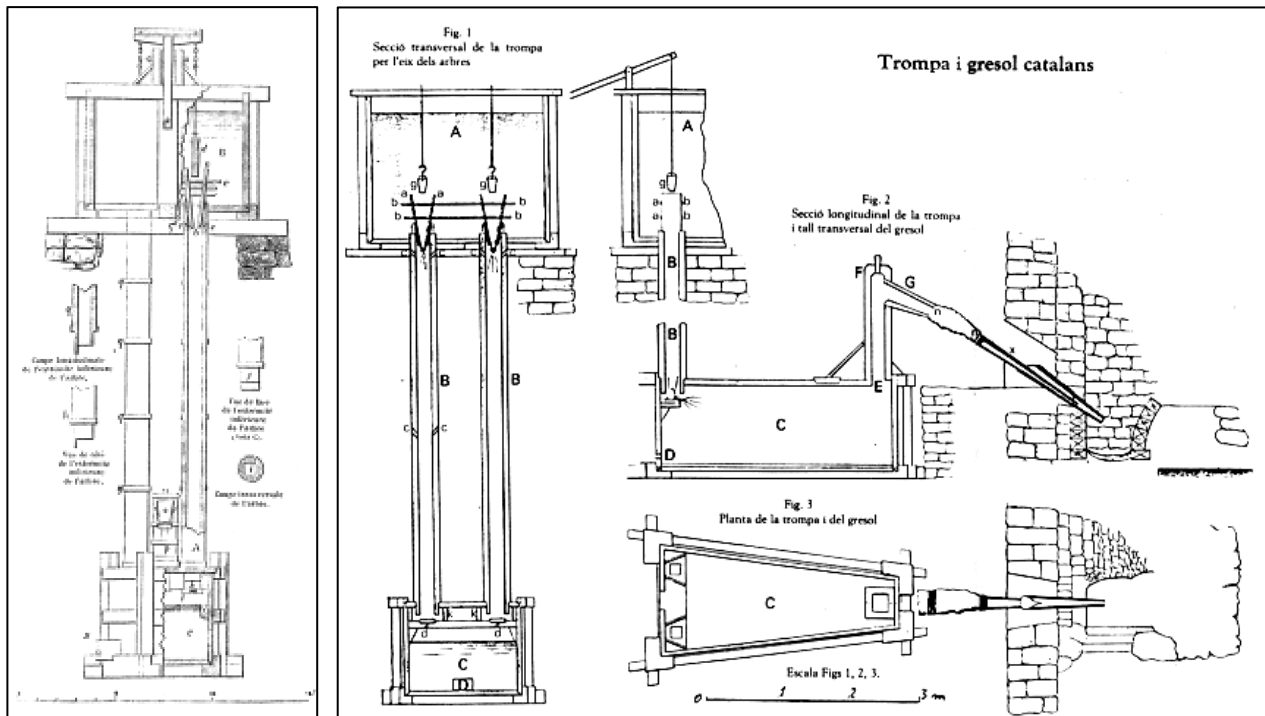


Fig. 1. Planta, alzado y detalles de una trompa de agua. [2] y [3]

3. Construcción del modelo piloto de trompa de agua

El objetivo de la construcción de un modelo piloto de trompa es el de evaluar las posibilidades que puede tener una máquina sencilla de construcción en aras de su aprovechamiento como tecnología sostenible y para el desarrollo.

La reconstrucción de la trompa de agua a partir de fuentes históricas y arqueológicas ya ha sido realizada con anterioridad en otras ocasiones, pero su comportamiento y claves de diseño no han sido suficientemente estudiados.

La trompa piloto fue construida en 2007-2008 a escala reducida 1:3. Para conseguir el caudal de agua continuado, se utilizaron dos bombas centrífugas de 2 kW cada una trabajando en recirculación en un circuito cerrado, entre la caja de vientos y la parte alta de la trompa. La caja de vientos se construyó con un depósito cilíndrico de unos 100 litros de capacidad. El “árbol” se asimiló a un tubo cuadrado de 3 m de longitud y 6 centímetros de lado. Disponiendo uno, dos o tres tubos en serie, se conseguían 3, 6 y 9 metros de desnivel.

El caudal de se puede regular entre 0 y 20 l/s, (es decir, hasta un noveno del caudal de la trompa de referencia, como corresponde a la escala 1:3 para magnitudes volumétricas). La presión del aire puede llegar a los 0,2 hPa (0,2 atm. aprox.).

Para una altura de 3m., la potencia hidráulica implicada es de 588W, mientras que el caudal de aire resultante puede ser de 4,4 l/s, a 0,2 bar, siendo la potencia neumática de 88W. La relación entre potencia hidráulica y potencia neumática es inferior al 15%, debido principalmente a la pérdida de energía que se produce al chocar el agua contra la banqueta, dentro de la caja de vientos.

Un aspecto fundamental que se evidenció durante las pruebas es la importancia de la sección de la trompa o árbol. Un árbol vaciado en sección redonda en lugar de cuadrada marcaba un mal funcionamiento de la trompa, Este factor de forma facilita o entorpece la rotación del fluido bajante por el conducto, por acción de la fuerza de Coriolis. Es una componente rotacional que se asimila a la componente imaginaria de la corriente, y en altas frecuencias, se asemeja al efecto pelicular.

4. Análisis mediante las ecuaciones del electromagnetismo

Dado que el trabajo se desarrolla en el marco del departamento de Ingeniería Eléctrica, resultado lógico aprovechar la experiencia y las herramientas propias del estudio de las máquinas eléctricas para analizar el comportamiento del agua en la trompa.

El fluido que circula por la trompa es, en la mayor parte del recorrido, un fluido bifásico por mezcla de aire y agua, de modo que la densidad no es constante para distintos puntos de funcionamiento, ni tampoco a lo largo de la bajada hasta la caja de vientos. Esta peculiaridad, junto con la asimilación de la presión a una tensión, y la asimilación del caudal a una corriente, permite usar las ecuaciones del electromagnetismo para estudiar el fluido.

En base a un estudio previo sencillo usando las leyes de Kirchhoff, que vienen a expresar la ley de conservación de la materia, y la de conservación de la energía, se está desarrollando el modelo para el análisis de la turbulencia y del cambio de densidad por el aire que arrastra. [5] Esta modelización debería permitir optimizar el sistema.

Se habla pues de impedancia hidráulica e impedancia neumática, ambas relacionadas por la conversión energética de la trompa, con la ventaja que el aire se ve afectado unas 700 veces menos que el agua por la cota a la que se encuentra, por diferencia de densidades. Por esta razón, el aire a presión es más fácil de conducir para aprovechar-lo a mayor distancia o mayor altura.

5. Desarrollo de una máquina eléctrica especial

Del estudio energético de la trompa se deduce que la mayor parte de la energía se pierde en la caja de vientos por el choque del chorro de agua contra la "banqueta". Teniendo en cuenta este factor, parece lógico que en un departamento de ingeniería eléctrica se aproveche la ocasión para intentar el desarrollo de una máquina eléctrica especial adaptada a estas condiciones de contorno.

Se trataría de una máquina sumergible, de velocidad nominal reducida, que integrara los álabes de la turbina en el interior del rotor, sin eje, de modo que éste fuera sostenido por el estator por su perímetro exterior, de un modo similar a los modernos propulsores de proa de algunas embarcaciones deportivas.

Es una oportunidad para probar novedades e innovaciones que se desarrollan a nivel teórico en el departamento de Ingeniería Eléctrica, pero con un fin práctico concreto, siendo mayor la motivación. De este modo también entran en contacto estudiantes de proyecto de fin de carrera, estudiantes de doctorado y profesores, a un mismo nivel.

La modelización con elementos finitos de la máquina construida permite comprender mejor las capacidades y

limitaciones del prototipo construido. Los resultados simulados, validados por las magnitudes medidas en el prototipo, junto con la experiencia adquirida durante la construcción del mismo, permiten proponer modificaciones realizables que mejoren este primer intento constructivo.

6. Aplicaciones directas en el tercer mundo y perspectivas para la máquina eléctrica especial.

A parte de la generación de electricidad, las reducidas prestaciones hidroneumáticas del sistema pueden ser útiles como tecnología para el desarrollo como un equipo simple de bombeo. [6]

Efectivamente, dado que el proceso es reversible, a partir de un caudal de aire a cierta presión se puede elevar un cierto caudal de agua a cierta altura por mezcla con aire en un conducto vertical, y por lo tanto, por diferencia de densidad de la emulsión resultante. El fluido bifásico aire-agua puede alcanzar una posición más elevada que la del agua sola por tener menor densidad, aunque siempre con un rendimiento reducido.

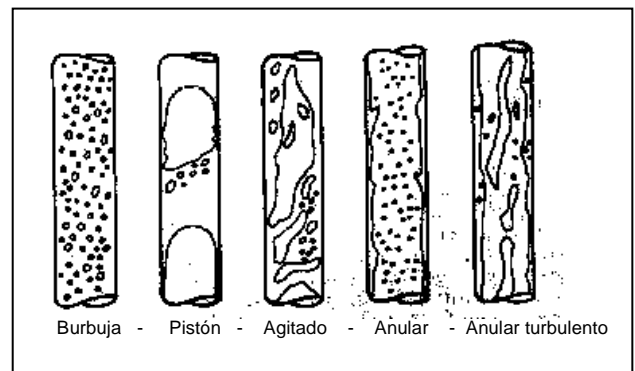


Fig. 2. Distintos tipos de flujo bifásico en tubería vertical, para distintas proporciones de aire y agua.

Por lo que se refiere a la máquina eléctrica en desarrollo, después de la colaboración de distintas personas en diferentes ámbitos, el resultado será una tesis doctoral, algunos proyectos fin de carrera, y si resulta de interés industrial, una propuesta de patente.

A nivel práctico inmediato, la tesis servirá para dar continuidad a las líneas de investigación del laboratorio, ya que recoge los resultados de tesis anteriores, y propondrá nuevos hitos en este largo pero incansable camino de la investigación.

Estos prototipos construidos son muy importantes a nivel de dinamización e interrelación de las personas implicadas, puesto que los resultados de cada uno se comparten por todo el equipo. También se transmite la cultura básica de trabajo del laboratorio sin haber de insistir individualmente, con el esfuerzo que representaría. Y siendo en trabajo de cada uno concreto permitiendo una mayor profundización, satisface más a todos un resultado final más visible y atractivo.

7. Conclusiones

La aplicación de las ecuaciones electromagnéticas a este sistema hidroneumático, denominado trompa de agua o de los Pirineos, permite estudiar adecuadamente el comportamiento del fluido bifásico aire-agua que circula por el mismo y también permite mejorar su rendimiento.

La mayor parte de la energía del sistema se pierde en el agua que cae y choca contra la banqueta, en cuyo caso podría ser sustituida por un generador hidroeléctrico. Esta circunstancia es la excusa para desarrollar una máquina eléctrica especial en el laboratorio de Ingeniería Eléctrica de ETSEIB, que forma parte de una tesis doctoral. .

El sistema de soplado de la trompa puede ser utilizado directamente como plataforma de desarrollo en el tercer mundo, y también puede utilizarse como parte de un dispositivo de bombeo por mezcla del agua a elevar con el aire soplado, siendo en principio funcional el mismo en la forma inversa. Su rendimiento, no obstante, no sería superior al 15%.

Agradecimientos

La Sociedad Catalana de Tecnología, filial del Instituto de Estudios Catalanes (c. del Carme 47, 08001 Barcelona), adquirió las bombas usadas para la recirculación para el estudio de la trompa de agua en el laboratorio, además de promover un estudio global del estado de conocimiento sobre la “farga catalana” y de publicarlo en formato cd-rom y en una página web en Internet. [4]

Además, estos estudios, y el desarrollo del motor eléctrico especial se están desarrollando en el marco del programa de doctorado del Departamento de Ingeniería Eléctrica (DEE) de la Escuela de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), teniendo como tutor de tesis al Dr. Ricard Bosch, gracias a una beca predoctoral del Departamento de Universidades, Investigación y Sociedad de la Información de la “Generalitat de Catalunya”, y del Fondo Social Europeo.

Referencias

- [1] Tomàs Morera, Estanislau, “The Catalan process for the direct production of malleable iron and its spread to Europe and the Americas”, Contributions to Science Vol. 1(2), Institut d’Estudis Catalans, Barcelona, 1999, p.225-232
- [2] FRANÇOIS, Jules, "*Recherches sur le gisement et le traitement direct des minerais de fer dans les Pyrénées et particulièrement dans l’Ariège*", Carilian-GGoeury et Von Dalmont, Éditeurs, Paris, 1843.
- [3] RICHARD, T, "*Études sur l’art d’extraire immédiatement le fer de ses minerais sans convertir le métal en fonte*", Librairie Scientifique et Industrielle de L. Mathias (Augustin), Paris, 1838, p. 169-229.
- [4] VVAA, “La Farga. Avaluació de l’obtenció directa del ferro a Catalunya”, CD-ROM, Xarxa Temàtica L’Home i el Ferro a Catalunya, II Pla de recerca de Catalunya 1997/2000, amb el suport del DURSI (Generalitat de Catalunya), Barcelona, 2000.
- [5] Marmanis, Haralabos, “Analogy between the electromagnetic and Hydrodynamic Equations. Application to Turbulence”, Thesis Submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in the Division of Applied Mathematics at Brown University, Providence, 2000.
- [6] Bosch Tous, Ricard, Fuses Navarra, Víctor, "Model Pilot de trompa d’aigua o trompa dels Pirineus", ponencia presentada a las “VIII Jornades d’Arqueologia Industrial de Catalunya”, MNACTEC, Tortosa, 19-21 de octubre 2006.