

La aparición del caballo de fuerza

Los ejemplos elocuentes del trirreme y de la nave longa nos demuestran que para la humanidad es antiguo el manejo de la energía desde el punto de vista de su uso óptimo, si bien sin comprenderla en sus fundamentos íntimos, proeza intelectual que exigió aguardar hasta las décadas centrales del siglo XIX para su debida consolidación en cuanto a su formulación matemática se refiere. Y, la verdad sea dicha, no puede realmente decirse que, en nuestro tiempo, la comprendamos a plenitud.

A la par que los *drakkars* dominaban los mares y ríos en las centurias centrales del Medioevo europeo, en el ámbito de la agricultura, en pleno auge del modo de producción feudal, adquirió corporeidad, literalmente hablando, un concepto técnico de amplio uso hoy día en el mundo complejo de la tecnociencia: el concepto de “caballo de fuerza”. Lynn White se ha encargado de armar el puzle correspondiente (White, 1990: 73-85). Extractemos aquí, para nuestras necesidades, sus tesis y argumentos centrales. Veamos.

En el septentrión europeo, el arado fue el primer aspecto clave de la revolución agrícola en la Alta Edad Media. El segundo paso fue la creación de un arnés que, junto con la herradura de clavos, convertiría al caballo en una ventaja económica y militar a la vez. En especial, a raíz del clima característico del norte de Europa, las patas de los caballos son bastante sensibles a la humedad, circunstancia que llevó a la invención de la herradura de clavos para proteger del desgaste los cascos de los nobles brutos. En la antigüedad, los romanos no conocieron la herradura de clavos dado que el clima mediterráneo es más seco y, por ende, los cascos de los caballos se mantienen duros y pueden éstos galopar sin herraduras por terrenos rocosos, no así en Europa septentrional. En todo caso, llegado el siglo XI, las ventajas de la herradura eran muy notorias tanto para el campesino como para el señor feudal, máxime que los campesinos podían costearse el hierro necesario.

No obstante, el caballo herrado es apenas aplicable para trabajos de arada o de transporte, salvo que su arnés esté diseñado de tal forma que le permita desarrollar toda su fuerza de tracción. Al efecto, según señala White (1990),

Lefebvre des Noëttes demostró de manera experimental que un tiro de caballos puede arrastrar tan sólo unos 500 kg con arnés de yugo, mientras que, con arnés de collera, el mismo tiro puede arrastrar un peso cuatro o cinco veces mayor. Así las cosas, hasta que no contaron con el arnés moderno, los campesinos no pudieron emplear el caballo, animal más veloz y resistente, en vez del buey, para tareas de arada, rastreado o tracción pesada. Desde luego, la mayor velocidad y resistencia del caballo cobra singular importancia en el clima caprichoso del norte europeo, donde el éxito de una cosecha bien puede depender de que se are y se siembre en circunstancias favorables. También, la velocidad del caballo facilita sobremanera el rastreado, más importante en el Norte que en el Mediterráneo, en donde el sistema de arado en cruz permitía deshacer bien los terrones.

La revolución agrícola descrita hasta aquí fomentó así mismo el proceso de urbanización en la Europa de entonces, justo por la misma época en la que nacían las primeras universidades en la Europa cristiana. Según Lynn White, la clave parece estar en la sustitución del buey por el caballo como animal principal de la granja. En efecto, dada la lentitud de los bueyes, los campesinos tenían que vivir cerca de sus campos. Con el paso al uso del caballo, la misma cantidad de tiempo que tomaba ir al campo y volver le permitía al campesino recorrer una distancia mucho mayor. Por ende, la relación matemática entre el radio de un círculo y su superficie rigió la redistribución de los poblados. Y con sólo un aumento ligero de la distancia que era posible recorrer cómodamente desde la aldea hasta el campo más lejano bastaba para ampliar en grado sumo la superficie total arable que era factible explotar desde la aldea. En consecuencia, regiones extensas otrora salpicadas de minúsculos caseríos terminaron como terrenos cultivados y dominados por grandes aldeas que, aunque mantuvieron su economía agraria, tanto en lo arquitectónico como en el modo de vida pasaron a ser sorprendentemente urbanas.

Ya muy avanzada la Edad Media, tal urbanización de los trabajadores agrícolas echó las bases para un cambio de foco de la cultura occidental a fuer del desplazamiento del campo a la ciudad. Con el correr de los siglos, esto se reflejará en la revolución industrial basada en el uso del vapor.

Raíces de la revolución industrial en la Edad Media

La revolución industrial es un acontecimiento mal comprendido en el seno del mundo hispano hasta donde puede decirse, a fuer de su descuido en lo que atañe a la docencia e investigación en los campos de la historia y filosofía tanto de la ciencia como de la tecnología. Por ende, es aconsejable aclarar la esencia del acontecimiento de marras como condición indispensable para la comprensión del surgimiento del principio de la conservación de la energía. Para ello, los hallazgos de Terry S. Reynolds son sencillamente imprescindibles (Reynolds, 1994: 29-38).

De hecho, el término “revolución industrial” es bastante inexacto habida cuenta que sugiere que se produjo una ruptura del período correspondiente a fines del siglo XVIII y comienzos del siglo XIX en relación con los siglos anteriores desde la óptica de la escala de producción, esto es, de lo artesanal a lo industrial. Sin embargo, como dice Reynolds, la historia de la energía hidráulica en la Europa medieval y los comienzos de la Edad Moderna sugiere otra imagen. En dos palabras, las máquinas arrinconaron el trabajo manual mucho antes del siglo XVIII.

Propiamente, el cambio radical en la Edad Media estuvo muy ligado al sistema monástico, sobre todo por la Regla de San Benito, esto es, *Ora et labora*, dictada a principios del siglo VI, por la cual, durante ciertos períodos, los monjes debían dedicarse al trabajo manual, la lectura y el estudio, amén de prácticas espirituales como la meditación y la oración. Junto con esto, el monasterio tenía que ser autosuficiente, tener una economía saneada y aislarse del mundanal ruido. Lo anterior estimuló la introducción y difusión de la rueda hidráulica, tecnología que permitió el logro de los objetivos planteados por la Regla antedicha. Al parecer, la orden monástica que mejor partido sacó de la energía hidráulica fue la cisterciense. De facto, la orden del Císter se caracterizó porque sus miembros eran, para decirlo con precisión, monjes ingenieros (Evans, 1996-97: 1-28). Por el estilo, lo fueron también los miembros de la orden del Temple, al punto que los caballeros templarios fueron los mejores ingenieros del orbe cristiano por aquellos días. En cualquier caso, hacia el año 1500 había ruedas hidráulicas por toda Europa.

En cuanto a las innovaciones técnicas, los técnicos de los siglos X al XV aportaron dos soluciones al problema de la transformación del movimiento de rotación en lineal, necesaria para accionar martillos, a saber: la leva y la biela —si bien Lynn White señala que la leva fue un invento de la época helenística—. Al llegar el año 1500, los ingenieros europeos habían desarrollado dos clases de martillos accionados con agua: el apisonador vertical y el apoyado. Entre otras industrias, la del batanado y la del cáñamo adoptaron los martillos hidráulicos en los siglos X y XI. En sí, tras tejer la lana en paños, machacaban o aporreaban éstos en una solución limpiadora, lo que obedece a tres propósitos, cuales son: (1) limpiar el paño y quitar gran parte de la grasa de oveja que queda; (2) encoger la lana, de manera que pueda luego coserse a la medida con seguridad; y (3) convertir las fibras de lana en fieltro, reforzándose así el tejido. De otro lado, al mecanizarse con la ayuda de la rueda hidráulica, la industria del hierro dejó de ser un proceso discontinuo al acabarse el apagado del horno a fin de obtener la flor. De esta suerte, tal proceso pasó a ser semicontinuo. En suma, antes de concluir el siglo XVI, no menos de 40 procesos industriales diferentes pasaron a depender de la energía hidráulica en Europa. Más tarde, entre 1550 y 1750, dicha energía extendió su aplicación a otros procesos.

Para expresar este fenómeno mediante guarismos, hasta bien entrado el siglo XIX, la potencia media de las máquinas de vapor era inferior a los 20 caballos. Todavía en 1835 las fábricas de algodón mecanizadas no alcanzaban por término medio más de 35 caballos de vapor. En todo caso, como destaca Reynolds, concentraciones de energía de este tenor no eran raras en las fábricas hidráulicas entre el siglo IX y mediados del siglo XVIII. Más aún, en el siglo XIII surgió en Toulouse una división entre capital y trabajo característica de las primeras fábricas de algodón británicas: los molinos eran propiedad de inversionistas, mientras que los molineros eran empleados. Como quien dice, ¡bien modernos los medievales! Por contera, las fábricas textiles británicas sólo constituyeron la culminación de un proceso evolutivo con orígenes en la Europa medieval, e incluso en el Mediterráneo clásico si somos rigurosos, intelectualmente hablando. He aquí, pues, las valiosas luces brindadas por Terry S. Reynolds para el mejor entendimiento de nuestro foco de interés en estas páginas.

Exploración de la energía en la Edad Media

Podemos ir en mayor profundidad con estos acontecimientos técnicos en el Medioevo, máxime cuando Lynn White (1990) brinda detalles preciosos que conviene no pasar por alto. En síntesis, veamos de qué se trata.

En primera instancia, pese a que en la época helenística se contaba tanto con la leva como con el mecanismo de transmisión en sus tres formas fundamentales (estrella, corona y tornillo sin fin), y a que en el siglo I a.C. se fabricaban engranajes muy complicados, los técnicos de entonces no avanzaron mayor cosa en el aprovechamiento de las fuentes de energía. La colipila de Herón de Alejandría y su pequeño molino de viento no ejercieron influencia sobre la tecnología hasta la llegada del Renacimiento. Por su lado, Roma proporcionó una conquista más duradera que la *Pax Romana*: los inicios del control de la energía hidráulica. Pero, como quiera que sea, ni Roma ni China por la misma época dieron muestras de imaginación con el uso de la energía hidráulica para fines industriales, incluso contando el Mediterráneo con la aún más potente rueda hidráulica de admisión superior (figura 4).

Figura 4. Rueda hidráulica de admisión superior.



Tomada de: Museo Arqueológico Nacional de España.

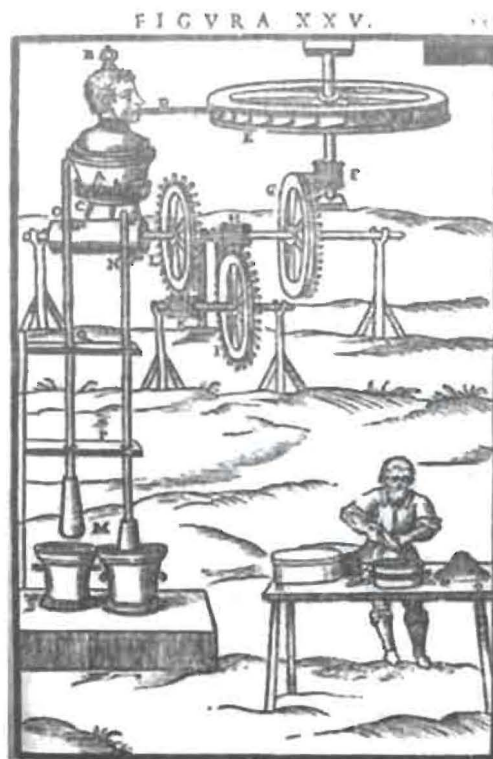
En: http://man.mcu.es/exposiciones/exposiciones_temporales/2002.html

En el siglo XI surge el primer indicio de interés en nuevas fuentes de energía bajo la forma de molinos accionados por la fuerza de las mareas. Por otra parte, en las regiones planas los ríos corrían con mucha lentitud como para hacer girar con energía una rueda, aparte del hecho que la construcción de una represa implicaba anegar demasiadas tierras buenas para la agricultura. La solución para semejante problema vino con la invención del molino de viento en el siglo XII, el cual rotaba en torno a un eje levemente inclinado por encima del horizonte para así asegurar un efecto de turbina en sus aspas. Ahora bien, el hecho de que en un lapso tan breve como siete años desde su aparición se haya observado el molino de viento desde Yorkshire hasta el Levante es una muestra elocuente del dinamismo tecnológico que había a la sazón. De todos modos, los molinos de marras se difundieron con mayor rapidez en Europa septentrional, acaso porque en el sur no era tan grande el problema de las heladas, circunstancia favorable para el aprovechamiento de las corrientes de agua en las ruedas hidráulicas, o quizá porque los cursos de agua son más veloces en la Europa meridional. Como quiera que sea, al llegar el siglo XIV, Europa avanzó sobremanera en la sustitución del trabajo humano por la energía hidráulica y la del viento en las industrias básicas. Lo anterior estuvo además aparejado con una nueva actitud exploratoria con respecto a las fuerzas de la naturaleza, actitud que le permitió a la Europa medieval descubrir y tratar de dominar otras fuentes de energía que han sido culturalmente eficaces, máxime en los tiempos modernos. Así las cosas, se pasó de la tecnología como mimesis a la tecnología como conquista de la naturaleza, cuyas consecuencias negativas sobre el ambiente se harán sentir con el correr del tiempo (Lain Entralgo, 1988: 120-135). Es justo lo que Oswald Spengler denominara el talante fáustico de la cultura europea (Spengler, 1935). Por otro lado, la Edad Media conoció también el uso del vapor. Sirva de ejemplo el siguiente fragmento de Alberto Magno:

Tomad una vasija de barro resistente en la que se hayan hecho dos orificios. Llenadla de agua, colocad tapones bien ajustados en los orificios y acercadla al fuego. Pronto el vapor hará saltar los tapones de los orificios y desparramarse el agua caliente alrededor. Por eso este tipo de vasija se llama *sufflator*, o sea fuelle, y se le da comúnmente la forma de un hombre (Alberto Magno, 1890, citado por White, 1990: 107).

Más tarde, se pasará del barro al latón como material de construcción de estas primitivas calderas, aunque se mantuvo la forma de cabeza humana. Al avanzar el tiempo, tales fuelles inspirarán las primeras turbinas de vapor. Para muestra un botón, el ingenio de Giovanni Branca de 1629 muestra un *sufflator* medieval como caldera, tal y como se aprecia en la figura 5.

Figura 5. Máquina de Branca.



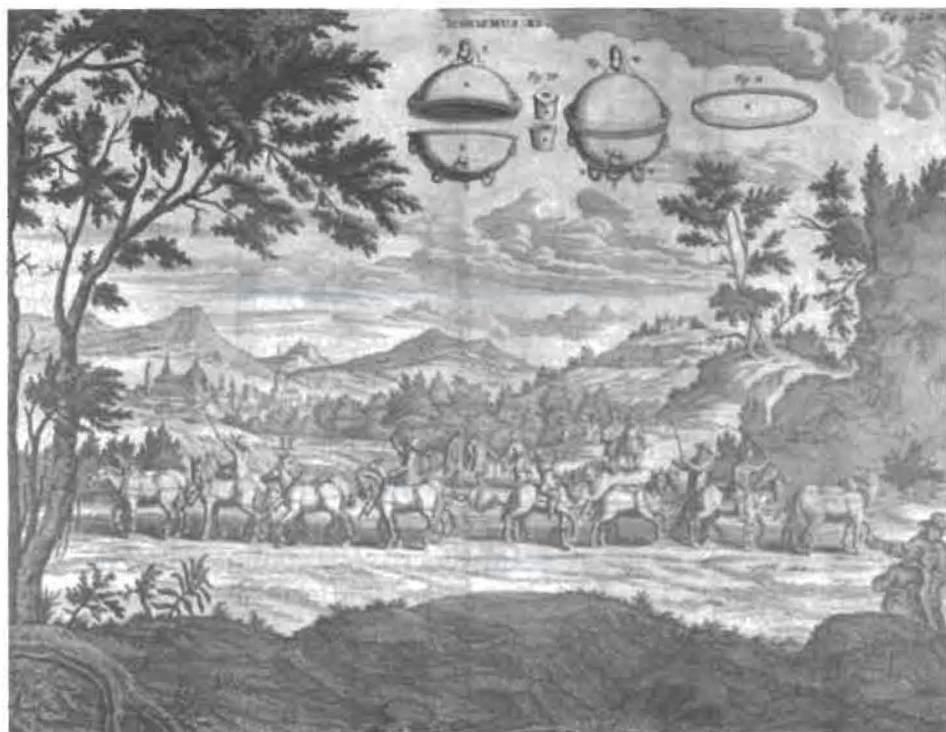
Tomada de: Biblioteca Universidad de Delaware. En:
<http://www.lib.udel.edu/ud/spec/images/udla/branca2.jpg>

En aquellos tiempos ya lejanos del Medioevo solía confundirse el vapor de agua con el aire. Relacionados con esta confusión, al igual que con la fuerza del vapor, se llevaron a cabo experimentos con aire caliente y aire sometido a presión. Estos experimentos no llegaron a desarrollar una fuente importante de energía, pero originaron un subproducto curioso: el propulsor de hélice de los barcos y, más tarde, la hélice del aeroplano, inspirada por la forma de las turbinas metálicas de aire caliente de las chimeneas, derivadas éstas a su vez de los antiguos cilindros de rezos accionados a turbina en la corriente que se formaba sobre el fuego, habituales en el Tíbet y otras regiones asiáticas.

De mayor impacto tecnológico resultó ser el estudio de las presiones del aire en relación con la escopeta de aire, cuyo antecedente primordial es la cerbatana, arma originaria de la India y difundida hacia Europa por intermedio árabe. En el siglo XVII, varios autores europeos describen diversos tipos de

escopeta de aire: Bartolomeo Crescentio, Mersenne, Wilkins, Denis Papin y Otto von Guericke. Este último, célebre por sus experimentos con vacíos y presiones, construyó en la década de 1650 el *Madeburger Windbüchse*, una de las maravillas técnicas de su tiempo (figura 6). Por su lado, la invención de los cohetes es otra muestra elocuente del interés que la fuerza expansiva de gases y vapores produjo en el ocaso de la Edad Media. En general, más interesante que la dimensión práctica de todos estos artefactos es la actitud mental que evidencian, esto es, la determinación de explotar una nueva fuente de energía.

Figura 6. Experimento de Magdeburgo



Tomado de: <http://diariodeunexplorador.wordpress.com/2010/10/26/apuntes-de-fisica-teorias-y-leyes-8%C2%AA-parte/>

Otro artefacto de nuestro interés: el cañón, no sólo importante por sus aplicaciones bélicas, sino porque es una máquina de combustión interna de un cilindro, al punto que los motores modernos de este tipo descenden de aquél. En concreto, Leonardo da Vinci hizo el primer intento de sustituir la bala de cañón por un pistón. El combustible era pólvora, lo mismo que en el

invento patentado por Samuel Moreland en 1661, en la máquina de pistón diseñada por Huygens en 1673, y en una bomba parisiense de aire de 1674. Como anota White, al derivar en forma consciente del cañón, quedó perjudicado el desarrollo de estos dispositivos hasta el siglo XIX, cuando los combustibles sólidos pulverizados cedieron a favor de los combustibles líquidos.

¿Qué sucedía entretanto con la gravedad como fuente de energía? Con independencia de que se emplease agua que caía en algún recipiente con el fin de activar algún mecanismo o pesas metálicas con similar fin, o combinaciones de ambas, la falta de un mecanismo de escape que no fuese agua o mercurio, y que regulara en consecuencia la circulación de energía a través de la máquina, desalentó los intentos para sacarle partido a la fuerza de atracción gravitacional. En lo bélico, el trabuco fue la primera utilización mecánica importante de la fuerza de las pesas, sobre todo en el septentrión europeo, puesto que la artillería basada en la torsión de fibras, por lo general, adolecía de serias limitaciones habida cuenta de lo húmedo del clima, lo que hacía perder elasticidad a las fibras y dar al traste con una victoria militar.

En síntesis: la Edad Media marcó una época tanto en la exploración de las fuentes de energía como en la invención de medios para encauzarla y controlarla. Pero todavía hay mucho más al respecto.



Perfeccionamiento de las máquinas

Como vimos más arriba con Reynolds, la leva y la biela fueron piezas clave en el perfeccionamiento de la maquinaria medieval. Ampliemos esto merced a la información proporcionada por Lynn White al respecto.

Después de la rueda, la manivela es el dispositivo mecánico individual más importante dado que permite la conversión del movimiento rotativo continuo en movimiento alternativo, y viceversa. *Stricto sensu*, los chinos inventaron la manivela desde muy antiguo, si bien no sacaron partido de su gran potencialidad para la mecánica aplicada. En cuanto a la primera aplicación propiamente dicha de la manivela, los molinos de mano son el ejemplo por excelencia gracias al mango de palo vertical, el cual permitió la rotación continua del molino en cuestión con ayuda de la manivela. Empero, el pensamiento tecnológico la asimiló con increíble lentitud. Botón de muestra, a comienzos del siglo XV la manivela era todavía un elemento latente en la tecnología. En el mundo islámico, por su parte, el uso de la manivela aparece en el libro del conspicuo ingeniero Al-Jazari del año 1206.

Sin embargo, tras tan prolongado letargo, la manivela encontró amplio uso. En primera instancia, la biela, sustituto del brazo humano, quedó aplicada a las manivelas. Luego entraron en escena manivelas compuestas dobles, provistas también de bielas. Por último, se aplicó el volante a estas manivelas con el objeto de poder vencer el “punto muerto”, principal dificultad del movimiento mecanizado de la manivela. Las aplicaciones no se hicieron esperar a partir de este momento: bombas de pistón y berbiquies, por mencionar un par de ejemplos.

En lo conceptual, llama poderosamente nuestra atención que, en el segundo cuarto del siglo XIV, Juan Buridán defendía su nueva teoría del ímpetu con la observación de que la piedra giratoria de afilar sigue dando vueltas mucho después de retirar la mano, lo cual sugiere que la muela almacena energía, en lenguaje moderno, o *vis impressa*, según la denominación de aquellos tiempos.

Amén de la manivela y el volante, otro dispositivo medieval relevante, y vinculado a la manivela, es el pedal. De esto, una buena muestra la tenemos en el genial Leonardo da Vinci, quien, hacia 1480, bosquejó un torno provisto de pedal, manivela compuesta y volante, con lo que mejoró la eficiencia al sustituir por el movimiento giratorio continuo los cambios de dirección del movimiento asociado al accionar el muelle y el pedal.

Acaso el proyecto medieval más ingenioso haya sido el del reloj mecánico, dada la fascinación que a los ingenieros del siglo XIII les producía el problema de inventar un cronómetro accionado por la fuerza de la gravedad. Desde luego, la dificultad estribaba en descubrir un escape, esto es, una manera de lograr un flujo uniforme de energía a través del mecanismo. Salvo el uso del agua, no se conocían precedentes sobre el particular. Y el agua ofrecía un recurso poco satisfactorio en el norte europeo en la época invernal a causa de las congelaciones. En todo caso, los grandes relojes simbolizaron todo un cambio de cosmovisión, bien expresado por White, de la siguiente forma:

Pero, a pesar de tratarse de juguetes gigantescos, estos relojes eran mucho más que juguetes: eran símbolos que reflejaban las más íntimas tendencias de la época, a menudo no expresadas en palabras. Por los años 1319-20 surgió una nueva teoría de la fuerza impulsora, una teoría de transición entre la de Aristóteles y la del movimiento inercial de Newton. De acuerdo con la concepción más antigua, nada se movía a menos que fuera impulsado constantemente por una fuerza externa. Según la nueva teoría física, las cosas se mantenían en movimiento por la acción de fuerzas impresas originariamente en ellas (*vis impressa*). Además, la regularidad, las relaciones matemáticamente predecibles y los hechos cuantitativamente mensurables resaltaban con mayor claridad en la imagen que los hombres se forjaban del universo. Y el gran reloj, en parte debido a su inexorabilidad tan traviesamente enmascarada y a su mecanismo tan humanizado por sus extravagancias, proporcionaba esa imagen. En las obras del gran eclesiástico y matemático Nicole Oresme, que murió en 1382 siendo obispo de Lisieux, encontramos por vez primera la alegoría del universo como un vasto reloj mecánico creado y puesto en marcha por Dios de suerte que “todas las ruedas se mueven tan armoniosamente como es posible”. Este concepto tenía un futuro: con el correr del tiempo, la alegoría se convertiría en una metafísica (White, 1990: 143).

En la evolución de los relojes, entra ahora en escena la incorporación del resorte, dispositivo que, desde la época de la primitiva trampera, se daba por descontado que almacenaba energía. Claro está, una percepción intuitiva