ANEXO.- EVOLUCIÓN DE LOS MOLINOS EÓLICOS

pfernandezdiez.es

Las primeras referencias al viento, como fuente de energía, se encuentran en los viejos mitos de las antiguas civilizaciones; así, en los poemas sumerios de la creación y de Gilgamés aparece Enlil, que representaba la fuerza del viento, cumpliendo importantes funciones dentro de la tríada de los dioses sumerios, funciones que más tarde heredará Eolo en el mundo greco-romano. Giovanni Boccacio, en su *Genealogía de los dioses paganos*, describe los vientos como fuerzas creadas para alterar el orden impuesto desde el Olimpo, según:

- *Lactancio por Juno para vengar alguna de las infidelidades de Júpiter*
- *Pronápides por Litigio quien, expulsado del cielo, bajó al infierno y convenció a las Furias para que incitaran a los vientos a perturbar la tranquilidad del dios*

Virgilio cuenta que el dios puso a los vientos a buen recaudo encerrándolos en una cueva, encargando a Eolo la función de contenerlos y darles rienda suelta.

La historia parece demostrar que los avances científicos y tecnológicos dependen del interés de cada cultura por desarrollarles, interés que puede ser de tipo religioso, social, cultural, político, o económico. Así, en las antiguas sociedades teocráticas, donde la religión desempeñaba un papel político y social preponderante, fueron especialmente importantes las:

- *Ciencias astronómicas*
- *Técnicas de embalsamamiento asociadas a usos religiosos*
- *Constructivas destinadas a la edificación de templos y monumentos funerarios*

En los grandes imperios basados en el dominio político se desarrollaron las técnicas metalúrgicas aplicadas a la fabricación de armas u ornamentos, mientras que en las sociedades más modernas, con espíritu comercial, tienen interés las máquinas como técnica susceptible de mejorar los métodos de producción.

En las culturas antiguas, en las que debido a su eficaz organización política y religiosa se alcanzó una gran extensión territorial, el interés por desarrollar algún tipo de aprovechamiento energético se limitaba a sus necesidades de desplazamiento. Así, la primera y más sencilla aplicación de la energía del viento, corresponde al uso de las velas en la navegación; la fuerza del viento se utilizó desde épocas muy remotas para impulsar las embarcaciones que recorrían los ríos de Mesopotamia y Egipto. La referencia más antigua que se conoce relativa a la navegación fluvial, se encuentra en un grabado egipcio. perteneciente al Alto Imperio, que data del IV milenio a.C.

El interés por las máquinas de potencia, capaces de realizar trabajo mecánico, fué muy posterior, probablemente, incluso al período griego; existe cierta referencia algo confusa relacionada con la utilización de la energía del viento en un proyecto de irrigación del emperador Hammurabi, hacia 1700 a.C.

Durante el período griego y a pesar de su importante desarrollo científico, no se manifestó un especial interés por las aplicaciones tecnológicas. Ni su economía basada en una agricultura de subsistencia, con un escaso nivel de intercambios comerciales, ni su estructura social basada en mano de obra esclava, eran muy adecuadas para el desarrollo de ningún tipo de maquinaria que favoreciera una mejora de los métodos de producción.

Desde un punto de vista cultural o religioso, la mitología griega consideraba que las fuerzas de la naturaleza, ya se tratase del fuego, agua o viento, eran de uso exclusivo de los dioses y éstos no solían ver con buenos ojos ningún tipo de intromisión en sus dominios. El mito que Esquilo refiere sobre el castigo de Júpiter a Prometeo por haber proporcionado el fuego a los hombres es un buen ejemplo de ello. Parece, pues, demostrado que un concepto demasiado mítico de la naturaleza no era favorable al desarrollo de la técnica, hasta la llegada del cristianismo, en que los dioses naturales dejaron de ejercer sus funciones, y el uso de las máquinas de potencia mantendrá cierto carácter irreverente.

En consecuencia, la $\begin{cases} \textit{creación de una economía de carácter mercantilista} \\ \textit{escasez de mano de obra} \\ \textit{desmitificación de la naturaleza} \end{cases}$ aparecen en el proceso evolutivo de la tecnología como condiciones necesarias del desarrollo

Los ingenios hidráulicos fueron las primeras máquinas utilizadas para obtener fuerza mecánica, ya que los de viento presentan mayores dificultades técnicas. Sobre la existencia de los primeros molinos de agua, existe una referencia señalada por V. Gordon-Childe en un epigrama de Antipatro de Salónica (siglo I a.C.). Otras referencias a las ruedas hidráulicas se encuentran en Lucrecia y en Estrabón, que cita una crónica sobre el rey Mitrídates, en cuyo palacio existía una.

Estos molinos eran bien conocidos entre los pueblas del Norte de Italia a partir de las primeros siglos de nuestra era. Vitrubio, en sus *Diez Libros de Arquitectura* describe en el año 25 d.C. un molino de agua dentro de un conjunto de máquinas de bombeo. Se trata de un molino de eje horizontal, por lo que debía disponer de engranajes y transmisiones bastante evolucionados. Este tipo de molino parece ser una adaptación de la rueda persa saqiya, de uso corriente en esa época en las riberas orientales del Mediterráneo y Asia Menor.

La frecuencia conque se encuentran citas sobre ingenios hidráulicos, contrasta con la escasa utilización que de los mismos se hizo con anterioridad, lo que confirma el escaso interés del mundo romano, con abundancia de mano obra esclava, en desarrollar aplicaciones técnicas que sustituyesen fuentes de energía. Por razones de tipo social, los romanos no manifestaron demasiado interés por estas máquinas hasta los siglos IV y V, en que empezó a escasear la mano de obra.

Las peculiares características de los vientos, su comportamiento irregular, tanto en intensidad como en dirección, exigían para su aprovechamiento de una tecnología capaz de desarrollar unos mecanismos de regulación y orientación de nivel más complejo que los de los molinos hidráulicos. Por otra parte, el impulso que se produce sobre las palas del molino se debe al efecto de unas fuerzas de presión que no resultan demasiada intuitivas; de hecho, hasta que se desarrollan las ciencias aerodinámicas a principios del siglo XX, no han llegado a ser bien comprendidas.

No es probable, por tanto, que los molinos de viento fueran conocidos hasta ya avanzados los primeros siglos de nuestra era. Parece demostrado que estos molinos eran desconocidos en 537, cuando el general Belisario, durante el asedio de Roma, tuvo que construir dos ruedas hidráulicas sobre barcazas para bombear agua del Tiber, cuando un sistema basado en molinos de viento hubiera sido más sencillo y eficaz.

Los primeros mecanismos impulsadas por el viento fueron las ruedas de oraciones, que se utilizaron en el Tibet y Mongolia, cuya objeto era producir sonidos rituales en las ceremonias religiosas. Estos ingenios, de eje vertical, probablemente se difundieron hacia Persia y China con anterioridad al siglo II.

Tal vez por esa época hayan existido otras aplicaciones de la energía eólica que pudieran tener cierta similitud con los molinos de viento. De ser así, las primeros ingenios eólicos debieron desarrollarse en la antigua Persia, cuyos territorios eran muy ventosos, y donde se reunían los más avanzados conocimientos técnicos del momento, tanto del extremo oriente como de la cultura helénica. Lyhn White señala la semejanza de las ruedas de oraciones con los sistemas eólicos utilizados por los persas.

Hubo que esperar un par de siglos para disponer de una tecnología capaz de desarrollar má-

quinas tan complejas como un molino de viento. Sólo a partir de la Escuela de Alejandría a la que pertenecieran Arquímedes, Ctesibio, y Herón, se puede afirmar que los ingenieros de la época están capacitados para diseñar y construir mecanismos tan sofisticados. Existe, como prueba, una máquina neumática atribuida a Herón (siglo II d.C) y conocida como Aneuriom, que giraba impulsada por el viento, y que funcionaba como una especie de órgano con un rotor de eje horizontal, similar a las molinos mediterráneos y clásicos europeos.

Hasta el siglo X no es posible encontrar un documento histórico en el que se haga mención al uso de los molinos de viento como práctica generalizada; son mencionados en el *Libro de Ingenios Mecánicos* de los hermanos Banu Musa, 850, y los geógrafos árabes Al-Taban (fallecido en 923) y Al-Masudi (nacido en Bagdad en 912) mencionan su utilización, muy difundida, en las llanuras de Sijistán (Persia) donde soplaban vientos muy fuertes; en ambos casos se habla de su doble aplicación como molinos harineros y molinos de agua.

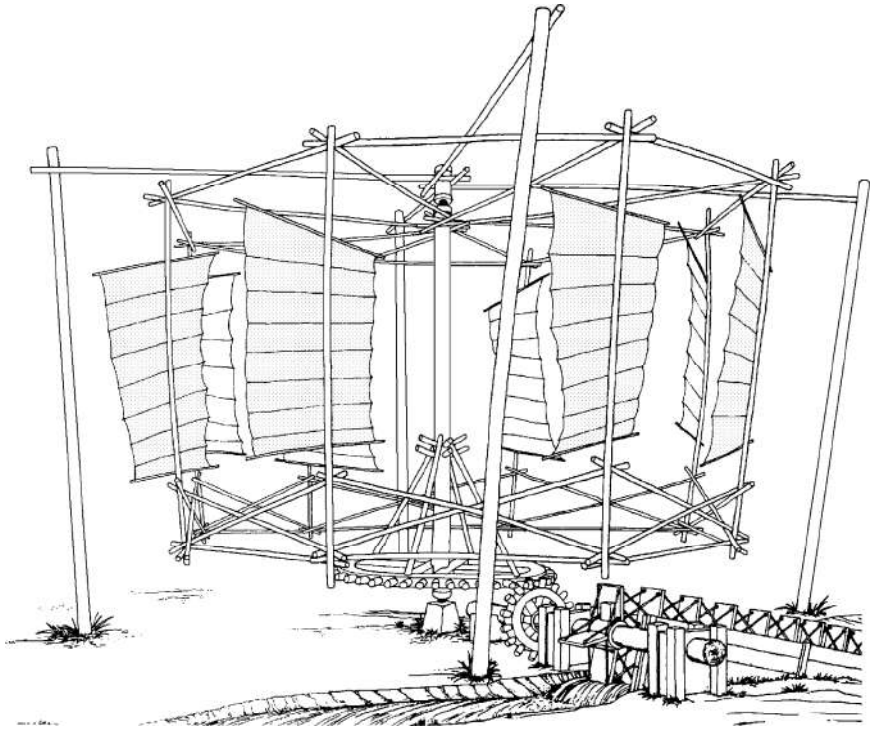
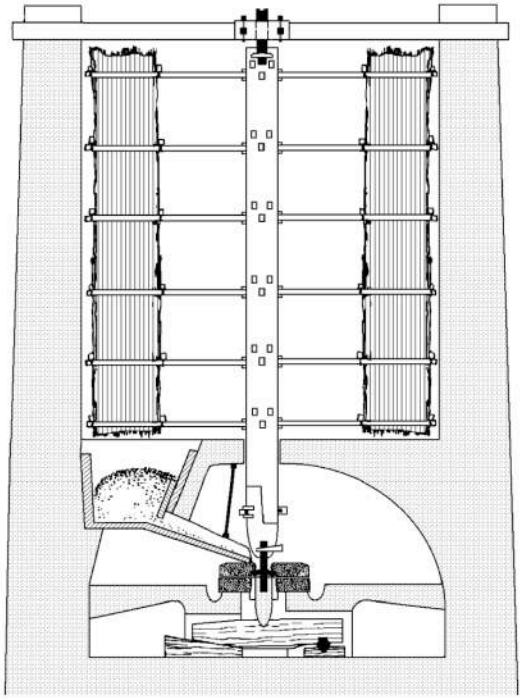


Fig B.1.- Panémona china de eje vertical utilizada para el riego

Existe una leyenda, atribuida a Al-Tabari, sobre un molino de viento mandado construir por el califa de Bagdad, Omar II, año 644, basándose en tradiciones orales traídas desde Oriente par un esclavo, leyenda que sugiere la posibilidad de que la invención del molino de viento sea anterior a la época islámica. Otros autores posteriores, como lbn Hawqal, que revisó la obra de Abu-AI-lstakri y AI-Mukadassi, encargado de introducir los molinos en la España árabe, nos han dejado abundantes textos en los que se hace constante referencia a estas máquinas eólicas.

La abundancia documental permite suponer que las primeras aplicaciones de los molinos de viento corresponden a un tipo de molino de eje vertical, similar a los molinos hidráulicos de rodezno, y que se difundieron probablemente en los primeros siglos del Islam, aunque pudieron ser conocidos con anterioridad.



Vowles cita en su obra *The Quest for Power from Prehistoric Times to die Present Day* a un explorador holandés que viajó a China hacia 1655 y observó unos molinos de viento de eje vertical con cierto parecido con las molinos hidráulicos de rodezno. Las chinos parece que utilizaban desde tiempos inmemoriales estos molinos llamados *panémonas*, Fig B.1, que se usaban para bombear agua en las salinas. Forbes sostiene en *Studies in Ancient Technology* que estos molinos existían con anterioridad al año 400 d.C. , y otros autores que pudieran ser los precursores de las molinos persas. Las *panémonas* eran de eje vertical y sus palas estaban construidas a base de telas sujetas a largueros de madera. La posición de las palas se podía variar para regular la acción del viento sobre el molino.

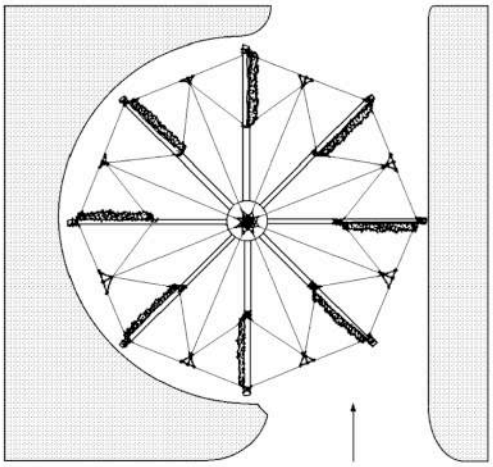


Fig B.2.- Molino persa de eje vertical utilizado para moler el grano

El molino persa de eje vertical pudo ser de uso corriente en las planicies del Sijistán, en la frontera de Persia con Afganistán, tal vez algún siglo antes del periodo islámico, Fig B.2.

Su diseño era extremadamente sencillo, según una descripción del mismo hecha por el cosmógrafo sirio Al-Dimashqi (siglo XI). El ingenio estaba formado por una torre de mampostería provista de una pared frontal, que actuaba como pantalla deflectora dirigiendo el viento sobre las palas motoras y regulando su intensidad mediante un sistema de compuertas de madera, que, operadas manualmente, permitirían una mayor o menor entrada de aire. El rotor dispondría de 6 u 8 palas de madera o caña, unidas a un eje central que se acoplaba directamente a las muelas situadas en la base, y cuya separación se podía variar mediante cuñas. El sistema no requería de engranajes que cambiaran la dirección de la fuerza motriz, ya que la dificultad técnica de los engranajes debió condicionar la construcción de los primeros molinos, tanto hidráulicos como de viento; de este tipo de molinos

existen todavía unas ruinas descubiertas por el explorador sueco Sven Hedin en Niyazarab.

Los molinos de eje horizontal también debieron surgir en zonas de la antigua Persia, tal vez con anterioridad a la época islámica. Su invención debió responder a la necesidad de adaptar las máquinas de eje vertical al bombeo de agua, ya que este sistema presenta ventajas para mover una noria sin tener que variar la dirección de la fuerza motriz mediante engranajes. Estos molinos a vela se extendieron por todos los territorios de influencia del Islam, hacia el Oeste por toda la cuenca del Mediterráneo y hacia el Este hasta la India y China, donde se utilizaron también para triturar caña de azúcar.

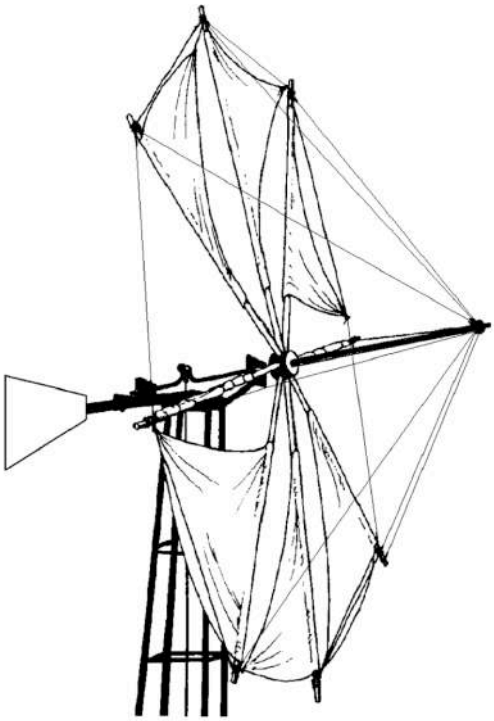


Fig B.3.- Molino de vela montado sobre trípode, utilizado en la isla de Creta para bombear agua

La difusión del molino de viento como máquina capaz de producir energía mecánica sigue dos canales aparentemente independientes.

-El primero de ellos se extiende a través de la civilización islámica, que ocupa todo el Mediterráneo, llegando hasta la mitad sur de la Península Ibérica

- El segundo toma como centro de partida el triángulo formado por Bretaña, Inglaterra y los Países Bajos, donde pudo haber sido llevado por los cruzados al volver de Palestina, siguiendo las rutas comerciales de la Rusia Meridional y el mar Báltico, o bien haber surgido espontáneamente

El molino mediterráneo, con su característico rotor a vela, se utilizó para moler grano y bombear agua en todos los territorios de influencia islámica. La expansión del molino de viento por la cuenca inferior del Mediterráneo no es todavía demasiado precisa. En la Península Ibérica existen numerosos documentos de la época del Califato de Córdoba, siglo X, en los que se hace constante referencia al uso generalizado de molinos de viento para el bombeo de agua.

No está muy claro, sin embargo, si las máquinas que se utilizaban por esta época en el sur de la Península eran de eje vertical u horizontal. lbn Abd el Munim al Himyari se refiere en su libro sobre jardines a la existencia de molinos de viento de eje vertical en Tarragona, siglos XII y XIII.

Se tiene la certeza de que en la isla de Creta y otras islas del Egeo era ya de uso corriente un molino de trípode de eje horizontal antes de la dominación veneciana (1204-1269), que aún se sigue utilizando, aunque acoplado a una bomba de pistón. Sólo en las llanuras de Lasithi, Creta, pudo haber en su momento más de 10.000 molinos de trípode, Fig B.3

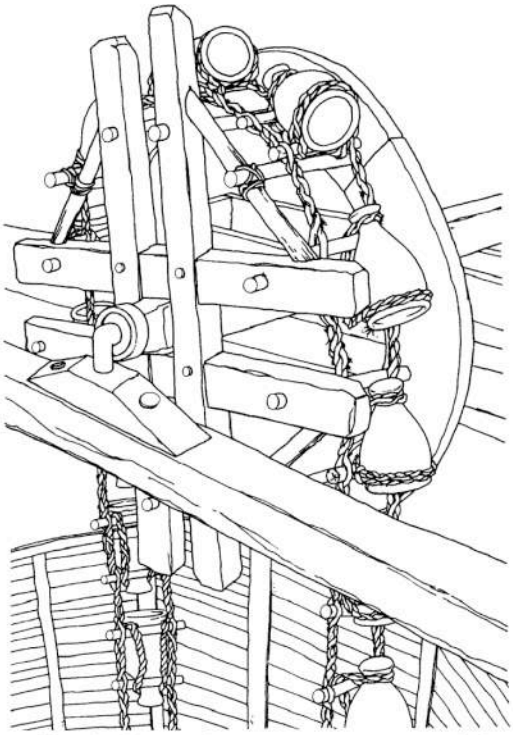


Fig B.4.- Rueda de cangilones para sacar agua de los pozos

La disposición horizontal del rotor es mucho más eficaz desde el punto de vista aerodinámico que el de eje vertical, ya que el empuje del viento actúa de forma continua sobre la superficie completa del mismo, mientras que en el vertical sólo una parte es operativa en cada momento. Las alas estaban formadas por velas, cuyo funcionamiento guarda cierta similitud con las que se utilizaban en la navegación; el eje sobre el que se unían las 6 u 8 palas movía una rueda a la que se acoplaba la noria, Fig B.4; el conjunto se apoyaba en un rudimentario trípode de madera, que se situaba sobre la boca del pozo.

Las aspas de estos molinos se fabricaban atando telas a los palos del rotor, de forma similar a los molinos persas de eje horizontal, de los que sin duda proceden.

La velocidad de giro se podía regular soltando o recogiendo la vela, siendo ésta una de las principales ventajas de este tipo de rotor; tanto las velas como los tirantes de sujección tenían cierta elasticidad para deformarse, proporcionándole cierta capacidad de autorregulación al variar su comportamiento aerodinámico.

Sin embargo, frente a tormentas imprevistas, las velas no eran muy resistentes y se rompían con facilidad. Este tipo de rotores a vela ha sido objeto de detenidos estudios por parte de Sweeney en la Universidad de Princeton, USA, quien en la década de 1970 utilizó el mismo sistema para diseñar un aerogenerador de baja potencia, aprovechando las ventajas de autorregulación que el sistema presentaba, Fig B.5.

La cultura árabe no se limitó a servir de vehículo a la expansión del molino de viento, sino que lo desarrolló técnicamente, adaptándolo de diferentes maneras en cada área de utilización. En un libro del siglo X, escrito por lbn Musa, se habla de máquinas eólicas y se describe una de 16 palas. Los primeros molinos de grano eran máquinas rudimentarias con un rotor sin posibilidad de orientarse en la dirección del viento, ya que los mecanismos de orientación resultaban técnicamente complejos. Con el tiempo, estos molinos irían evolucionando hasta convertirse en los de tipo torre. la cual, construida en mampostería, estaba coronada por una cúpula orientable donde se alojaban el eje, los engranajes y demás mecanismos que transmitían el movimiento a las mue-

las situadas en un nivel inferior, Fig B.6. El molino de vela alcanzó una gran difusión en toda la cuenca inferior del Mediterráneo, hacia los siglos XII y XIII, durante el imperio de los almohades. En ellos se conservan a grandes rasgos las características esenciales del molino, su sistema de aspas y el esquema general de la torre.

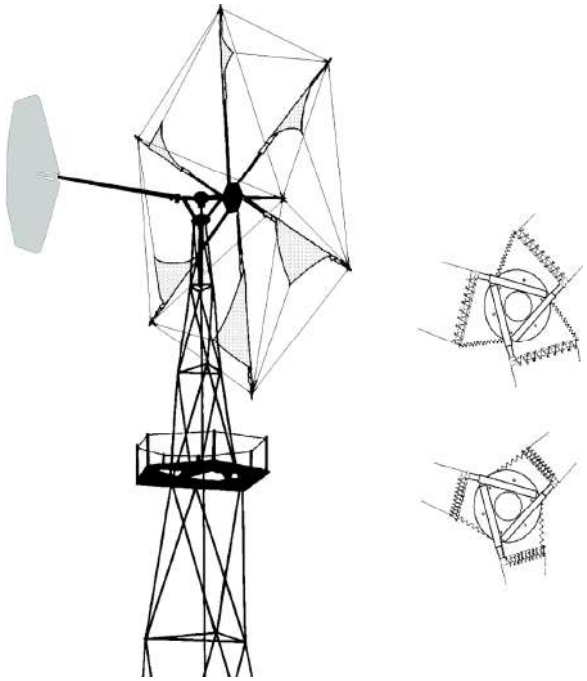


Fig B.5.- Aerogenerador con rotor a vela de la Universidad de Princeton, USA,
y sistema de regulación del rotor basado en la variación de la curvatura adoptada por la vela

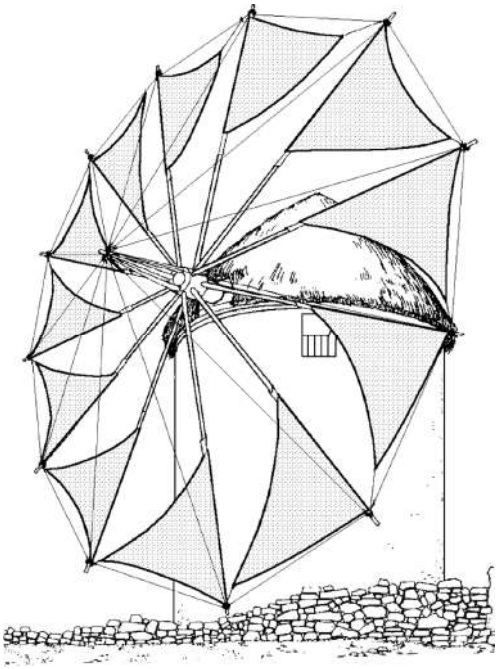


Fig B.6.- Molino tipo torre, con rotor de vela utilizado en las islas del mar Egeo, siglo XII

Sin embargo, en cuanto al número y disposición de las velas y a los detalles arquitectónicos de la torre, existen diferencias importantes, incluso entre los que se utilizaban en regiones próximas. La torre del molino andaluz es cilíndrica, de muros muy gruesos construidos en piedra o arcilla, de 7 a 8 m de altura y otros tantos de diámetro; el rotor tenía 8 velas dispuestas sobre dos planos ligeramente desplazados.

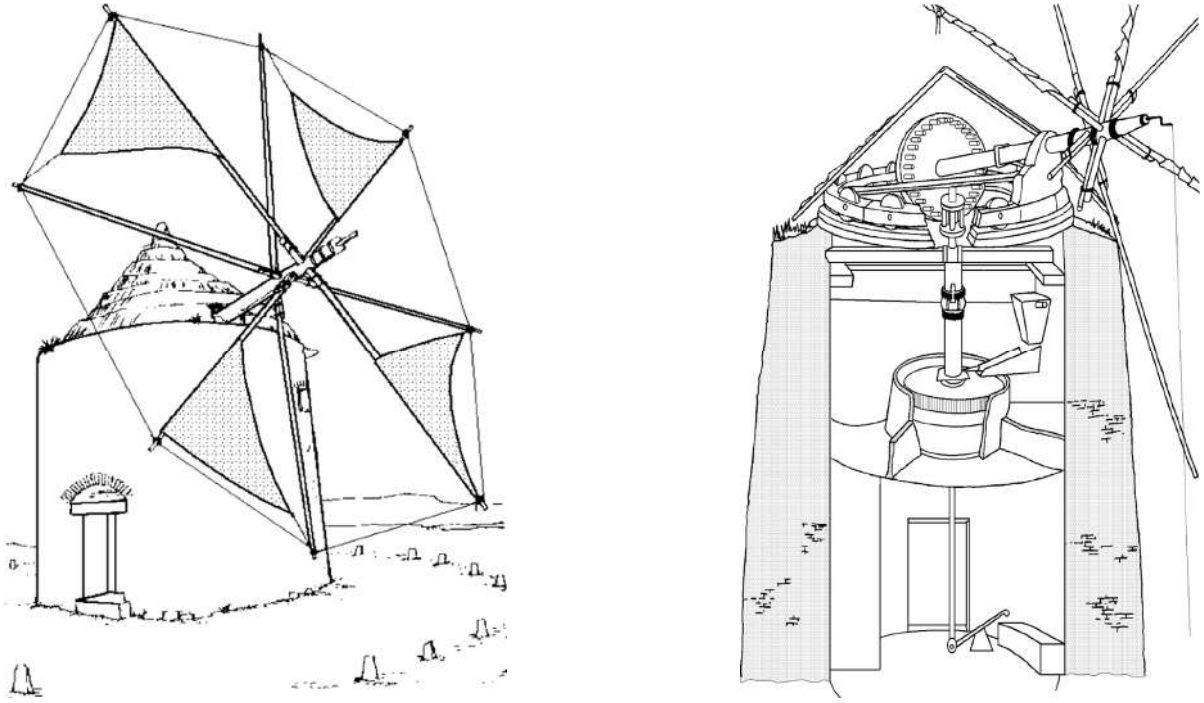


Fig B.7.- Molino de vela típico de la baja Andalucía, Puebla de Guzmán, Huelva

En la baja Andalucía, zona de Huelva y Cádiz, se utilizó este tipo de molino al que pertenece el de Puebla de Guzmán (Huelva), descrito por Caro Baroja, Fig B.7, en el que se usaba un ingenioso sistema de palancas para regular la separación entre las muelas, en función de la finura de grano deseada. Referencias a otros molinos existen en Santa Bárbara, El Almendro, El Alosno, El Cerro de Andévalo, Cabezas Rubias y Sanlúcar de Guadiana.

En la zona de Murcia y Cartagena se utilizaron molinos similares a los andaluces, pero adaptados para el bombeo de agua; el movimiento del eje descendía a lo largo de la torre mediante engranajes y acababa impulsando una noria, que elevaba el agua mediante cangilones almacenándola en un estanque, Fig B.8.

En Portugal el uso de molinos de viento de eje vertical es muy antiguo, como parece deducirse de un poema de lbn-Mucane escrito hacia el año 1000; en el siglo XIII los menciona AI-Himyari. Sobre molinos de eje horizontal, las referencias más claras se remontan al siglo XII. En 1182 se cita uno en Lisboa en un legado testamentario al monasterio de San Vicente; en 1262 aparece otro en el monasterio de Alcobasa y en 1303 se menciona uno en la capilla del Cabildo de Evora.

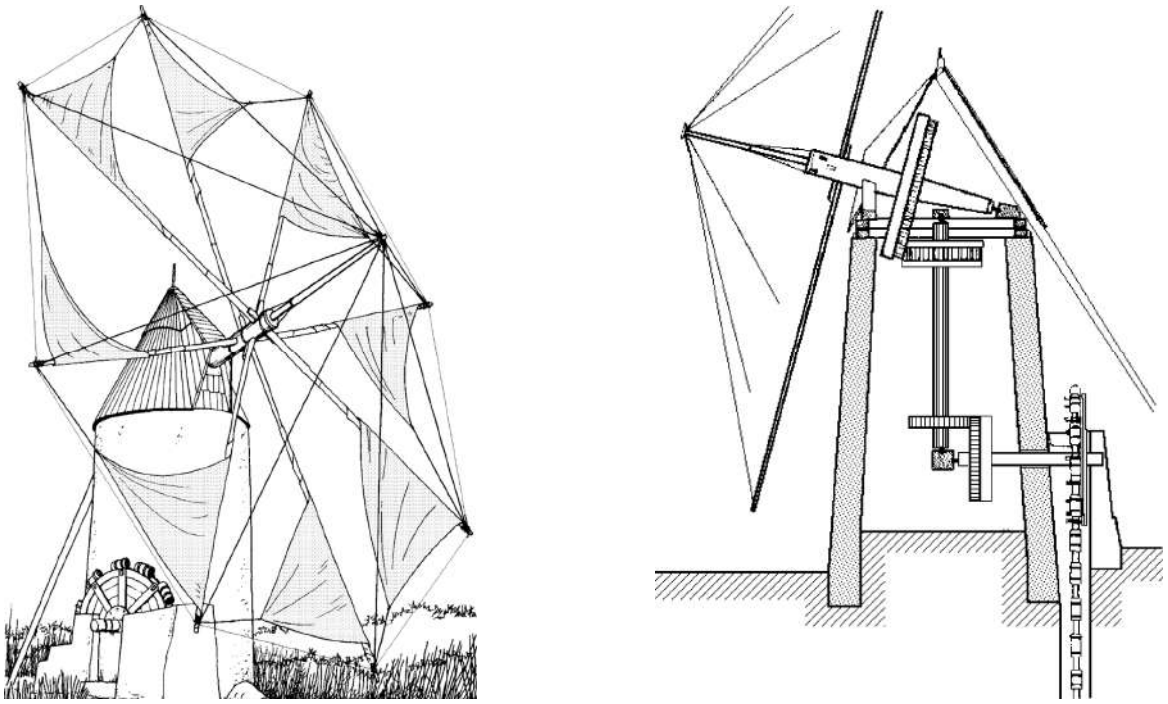


Fig B.8.- Molino de vela de Cartagena adaptado a una noria de cangilones

El molino típico utilizado en Portugal tiene 4 velas, con forma y disposición parecidos al andaluz, y con un dispositivo singular para avisar al molinero de cuándo cambiaba la dirección del viento. El sistema consistía en unos cántaros de barro, atados en los tirantes exteriores del rotor, que producían un sonido distinto, según incidiera el viento sobre su embocadura, Fig B.9. Krugger menciona la abun-dancia de molinos en toda la extensión del país, y especialmente en la costa de Vila do Obispo a Ca-minha.

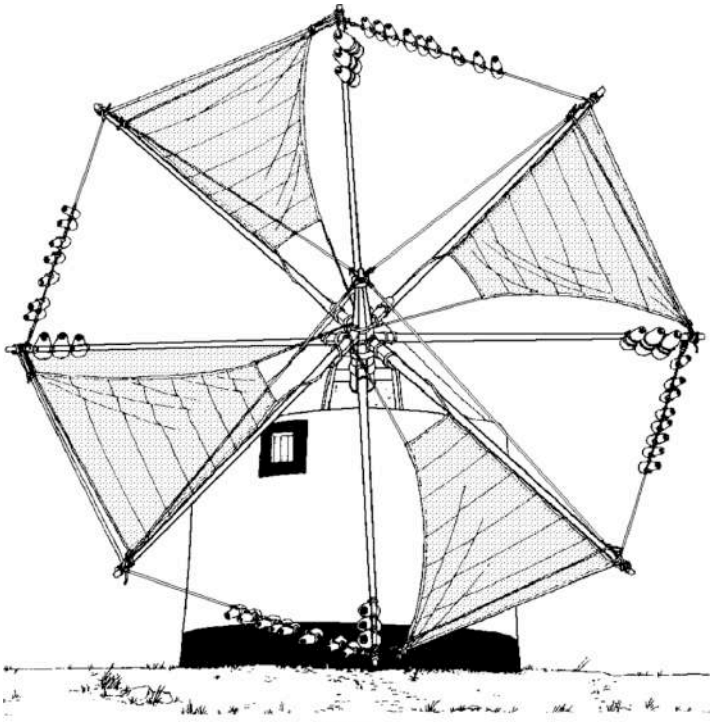


Fig B.9.- Molino portugués

En Galicia, debido a su peculiar régimen de vientos dominantes según direcciones opuestas (NE y SO), se emplearon unos molinos con dos rotores opuestos acoplados a un mismo árbol y sin ningún sistema de orientación. Dependiendo del sentido del viento, actuaba un rotor u otro. En los alrededores de Catoira se conserva un conjunto de molinos de este tipo, que también se utilizó en Portugal, pero con dos ejes dispuestos a 90º acoplados a la misma rueda, Fig. 10.

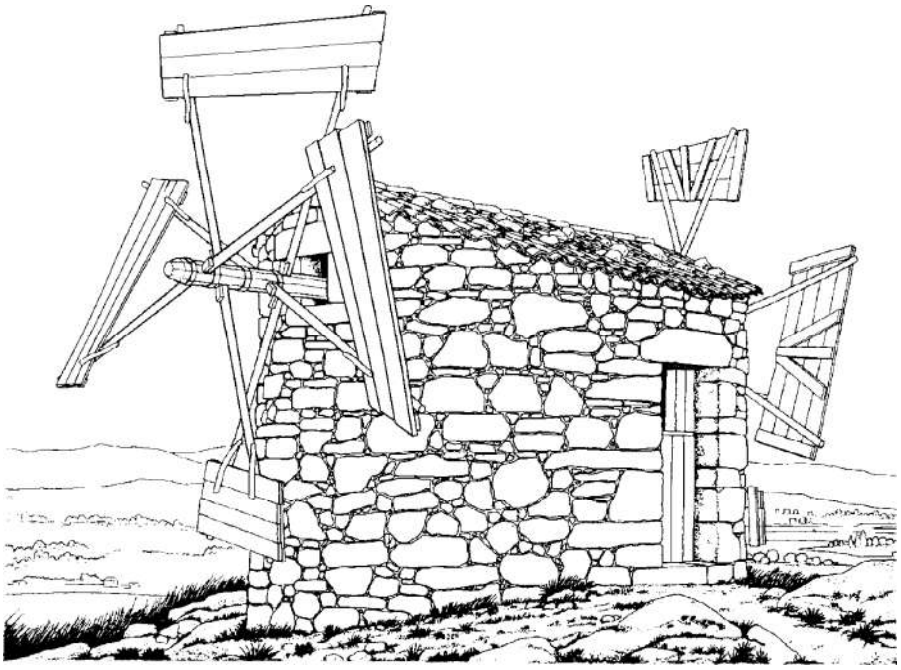


Fig B.10.- Molino gallego con dos rotores opuestos acoplados al mismo eje

Los molinos manchego y mallorquín se pueden considerar variantes del molino mediterráneo, especialmente en la ejecución de la torre. Sin embargo, la forma y construcción de las palas es de influencia europea. Ambos constituyen un nexo de unión entre las dos culturas. El molino manchego estaba formado, como los andaluces, de una torre de mampostería construida a base de piedra y adobe. Sobre la torre se situaba una techumbre cónica, en cuyo interior se alojaban los ejes y engranajes de 4 palas fabricadas con un entramado de madera recubierto con tela, Fig B.11.

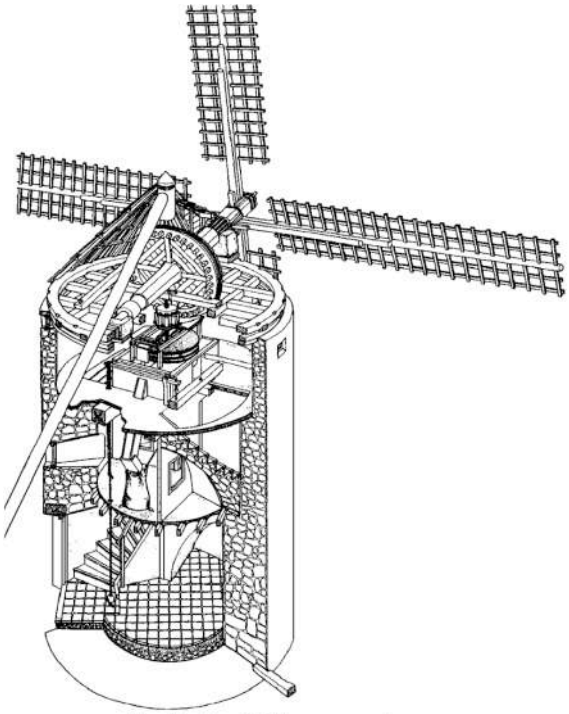


Fig B.11.- Molino manchego

En los reinos cristianos de la Península Ibérica el molino de viento aparece más tarde que en los reinos musulmanes, posiblemente en los siglos XIII y XIV. En el siglo XIV, 1330, tenemos una referencia sobre su existencia en el *Libro del Buen Amor* del Arcipreste de Hita, que los denomina atahonas, vocablo que según Caro Baroja está relacionado con *tahuna*, término utilizado por AI-Moqqaddasi, siglo X, para referirse a los molinos del Sijistán; también se mencionan en la *Crónica del Halconero* de Juan II en relación con una escaramuza ocurrida en 1441 en Tordesillas.

A lo largo del siglo XVI se produce un progresivo aumento de las referencias a los molinos de viento manchegos, lo que indica que en este periodo es

cuando se extiende su uso, tal vez como consecuencia de la influencia flamenca en el ámbito político español. Otros adelantos técnicos, como el coche de cuatro ruedas, aparecen en España durante esa época, y es indudable que la influencia flamenca proveniente del país más industrializado del momento está relacionada con el desarrollo de los ingenios eólicos de la Mancha. El nombre de Klaas Lawrence Bloom aparece en algunos documentos como el introductor de los molinos en España hacia el año 1549.

Sin embargo, un ingeniero anónimo de la época de Felipe II, autor de *Los Veintiún Libros de Ingenios y Máquinas*, verdadero compendio de las técnicas ingenieriles del momento, hace escasa referencia a los molinos de viento e incluso niega que existieran en España. Algunos estudiosos del Quijote interpretan su confusión, al creer gigantes a los molinos, como un indicador de que se trataba de ingenios de uso reciente que no debían ser muy corrientes antes de 1575.

A pesar de todo, existen bastantes evidencias de que eran sobradamente conocidos en la época de Felipe II e incluso de Carlos V, y un ejemplo es el proyecto de Fernán Pérez de Oliva, muerto en 1531, que participó en uno de los numerosos proyectos de la época para hacer navegables los ríos españoles y que proponía sustituir los molinos de agua del Guadalquivir por molinos de viento para facilitar la navegación. Por otra parte, las primeras Ordenanzas sobre molineros en que se mencionan específicamente los de viento datan de 1550 y sólo desde esa fecha aparecen en un censo del Monasterio de Uclés. En consecuencia, se puede suponer que los molinos de La Mancha se introducen hacia mediados del siglo XV, y se difunden durante el XVI; aunque de influencia mediterránea, su desarrollo esta relacionado con los europeos, a juzgar por su semejanza con los del Languedoc francés. Esta semejanza, analizada por Rivals, no se limita al diseño y construcción, sino que alcanza a la terminología empleada en la denominación de sus elementos.

Su difusión durante el siglo XVI se realizó con considerable retraso en relación a Europa, y aunque se han seguido utilizando hasta el siglo actual, su evolución desde un punto de vista técnico duró menos de dos siglos. Las continuas mejoras que se van introduciendo en los molinos europeos durante los siglos XVII y XVIII apenas se incorporan en los molinos manchegos e incluso se aprecia un cierto estancamiento en los que se construyen a partir de la mitad del XVIII. El número de molinos existentes parece ser el mismo en los dos documentos de censo disponibles, el realizado en el *Catastro de Ensenada* de 1750-56 y el *Diccionario Geográfico, Histórico y Estadístico de España y sus Posesiones de Ultramar* de Pascual Madoz, de 1846.

Los molinos manchegos se difundieron por Castilla la Nueva en Madridejos, Quintanar de la Orden, Consuegra y Puebla de Almonacid en Toledo, Alcázar de San Juan, Campo de Criptana y Argamasilla en Ciudad Real, Belmonte y Mota del Cuervo en Cuenca y Villarobledo en Albacete, de los que existen abundantes referencias.

Un tipo de molino similar al manchego, pero con sus peculiaridades autóctonas, ha sido estudiado por Krugger en las islas de Lanzarote, Fuerteventura y Tenerife. Las islas Canarias disponen de una gran escasez de cauces fluviales, y de un potencial eólico grande que, incluso hoy en día, las hace especialmente interesantes para aplicaciones de energía eólica; el uso de los molinos de viento debió extenderse, en las primeras etapas de la colonización, para moler harina y gofio. El molino canario típico tiene una torre troncocónica o cilíndrica, elevada sobre una plataforma, en la que hay dos estancias comunicadas por el exterior. El rotor tiene entre 6 y 8 aspas rectangulares o trapezoidales, unidas por cuerdas a la prolongación del mástil.

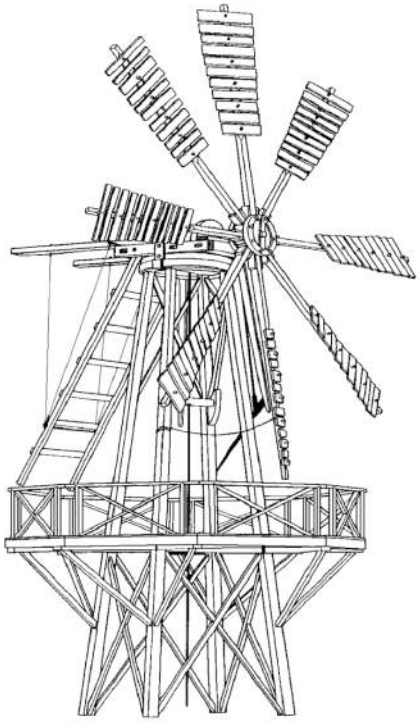


Fig B.12.- Molino canario para bombeo

En Baleares existe la referencia a un molino de viento que aparece en el libro de Mostassaf y con alguna representación gráfica del siglo XV. El molino mallorquín, Fig B.13, tenía una torre más esbelta que el manchego, y generalmente iba situado sobre la casa del molinero, de planta cuadrangular; la torre, de $8 \div 10$ m de altura, no tendría más de $3 \div 4$ m de diámetro. El rotor tenía 6 palas con un original sistema de tirantes que servía para darle rigidez y forma.

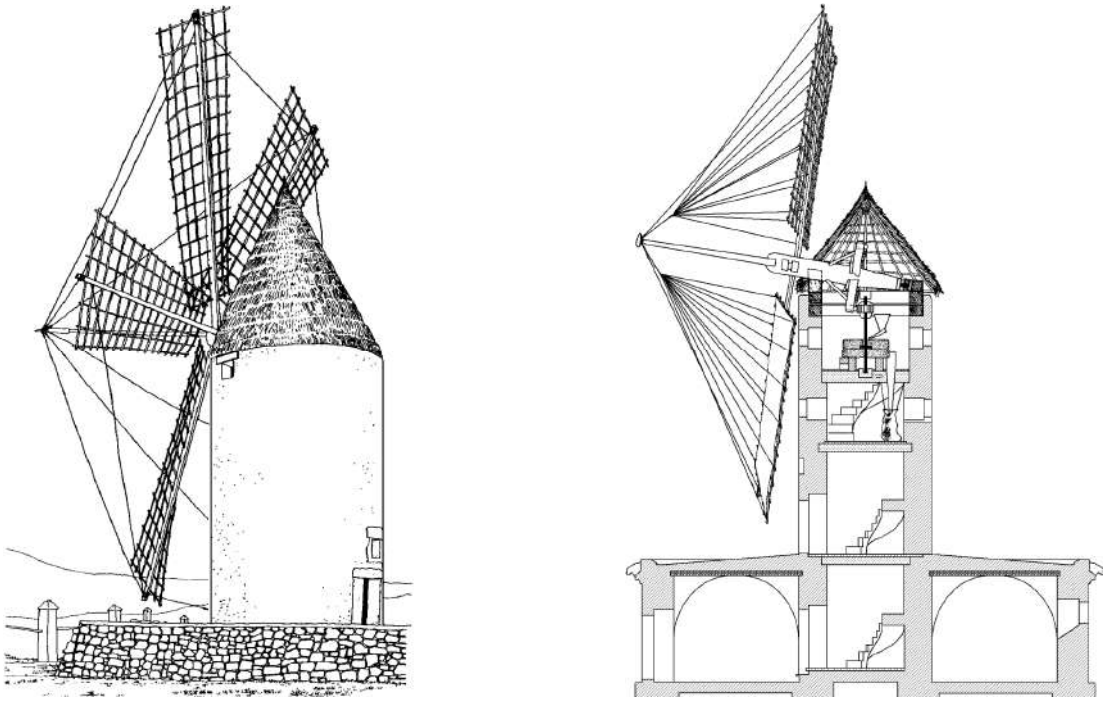


Fig B.13.- Molinos mallorquines

Las operaciones de orientación se realizaban mediante una palanca que, introducida en unos agujeros preparados al efecto, permitía apalancar el anillo de apoyo de la cúpula contra el anillo base dispuesto sobre la torre y girar uno sobre otro.

Las nuevas fuentes de energía caracterizaron el proceso innovador que, a partir del siglo XII, transformó los métodos de producción, sistemas económicos y estructuras sociopolíticas de la Europa medieval. Los ingenios hidráulicos y eólicos fueron determinantes del resurgimiento europeo, y constituyeron las primeras máquinas del mundo moderno, cuya difusión representa el fenómeno tecnológico de mayor importancia de los primeros siglos del II milenio.

A partir del siglo XII son numerosas las referencias relacionadas con los molinos que existen en todo tipo de documentos históricos. Los molinos hidráulicos se extendieron por toda Europa en las márgenes de cuencas fluviales, mientras que los de viento se concentraron en la costa atlántica, en Bretaña, Inglaterra y sobre todo, en los Países Bajos.

En Francia existe una referencia a un molino de viento en un *Glosario* de Du Gange, 1105, y a partir de esa fecha se encuentran con frecuencia concesiones para construir molinos. Así, en el *Dictionnaire d'Archéologie Chrétienne et de Liturgie*, Leclerq se refiere a un documento en el que el Conde de Mortain autoriza a la Abadía de Savigny a construir uno en 1105, y según Femand Benoit los derechos de construcción de molinos de viento aparecen regulados en los estatutos de la República de Arlés, promulgados entre 1162 y 1180.

En Inglaterra se conocen una concesión de Enrique II a la Abadía de Saint Mary de Swineshead para construir un molino en 1181, y a la Abadía de Oseney, y otra concesión de Ricardo al priorato de Tanrigge fechada en 1195.

En los Países Bajos existen abundantes pruebas documentales del siglo XII, pero tal vez la más antigua sea un acta de dominio de Beatriz de Brabante de 1251, en que se menciona la existencia de 21 molinos en la región de St. Omer Cassel. Existe también una licencia de construcción concedida por la princesa Margarita en 1254, y un grabado en un *Libro de censos* de Jean Van Pamele de 1270 que se conserva en la Biblioteca Real de Bruselas.

Uno de los primeros molinos de viento europeos pudo ser el que se construyó en Rexpoede, cerca de Dunkerque, a finales del siglo XI. Reynolds cita un molino en Yorkshire construido en 1185 y otro, del que se disponen pruebas documentales, que se construyó en Normandía en 1180. A partir de esas fechas se extienden rápidamente por Bretaña y en el siglo siguiente se pueden encontrar en Artois, Champagne, Poitou, etc. Hacia 1222 se conoce la construcción de otro en la ciudad de Colonia, y en Roma se conserva un decreto del Papa Celestino III que los menciona en 1195. El molino del Monasterio de Koninsgvel den Delf (Holanda) se construyó en 1299.

Las primeras representaciones gráficas se encuentran en los salterios del siglo XIII. Los más antiguos son el *Salterio del Molino de Viento* que debió publicarse en 1270 y el de Lutrelí fechado en 1340. En 1325, Walter de Millinate, sugiere la posibilidad de utilizar molinos de viento para arrojar colmenas de abejas en el interior de una ciudad sitiada y, en 1355, el italiano Guido de Vigerano describe una especie de carro de combate movido por un molino de vela. A principios del siglo siguiente Kyeser inventa un elevador acoplado a un sistema eólico.

La aparición de los molinos en Europa pudiera estar relacionada con las cruzadas, como sostiene Usher en su *Historia de las Invenciones Mecánicas*, y la coincidencia cronológica es el principal argumento en que se apoya esta tesis. La primera cruzada tuvo lugar en 1095, la segunda en 1147 y la tercera a finales de ese mismo siglo.

Caro Baroja señala que los molinos de viento o las referencias a los molinos de viento, acompañan a las Ordenes de Caballería, templarios, hospitalarios, etc., que desde Antioquía se repliegan hacia Occidente a través de Chipre, Rodas, Creta y Malta. En la *Estoire de la Guerra Sainte* se menciona un molino de viento construido por los cruzados en Siria, hacia 1189; a principios del siglo XV existían en Rodas 16 molinos en las murallas de la ciudad, de los que todavía hoy se puede apreciar alguno reconstruido; eran de torre circular y tenían rotores de 6 palas.

Sin embargo, esta coincidencia puede responder al hecho de que tanto las cruzadas como el progreso tecnológico que tuvo lugar en Europa durante esa época, fueron la consecuencia de un proceso renovador, que se manifestó en todo tipo de actividades científicas, técnicas, económicas y sociales. En este sentido se conserva el testimonio de un monje cisterciense de Cíaraval que es un verdadero himno al maquinismo, en el que canta la acción energética del río Aube en el molino de trigo, de cerveza y en el batán, y hace referencia a un molino de viento que presta sus servicios ya se trate de cocer, cerner, voltear, moler, regar, lavar o triturar, etc.

Otro testimonio que hace referencia a este proceso innovador proviene de Villard de Honnecourt, artista vagabundo que recorrió las grandes obras de Chartres, Lyon, Meaux, Reims, Lausana, y hasta de Hungría, y que da testimonio de cómo las aplicaciones de la técnica se habían propagado de un extremo a otro de la cristiandad.

Según Caro Baroja, España a través del Califato de Córdoba fue la vía de difusión del molino mediterráneo hacia Europa, mientras que otros autores como Vowles y Klaus Ferdinand sugieren otra ruta a través de Rusia y los países bálticos. Esta suposición se apoya en el hecho de haberse encontrado en Crimea y en algunos otros lugares de Europa (isla de Bornholm, Dinamarca) molinos de eje vertical que guardaban cierta similitud con los persas.

Indudablemente, el resurgimiento europeo del siglo XII se desarrolló a partir de las técnicas y

herramientas heredadas del pasado, que en buena parte se habían transmitido a través de la cultura islámica. Pero lo que parece incuestionable es que Europa tenía entonces la suficiente capacidad técnica para haber desarrollado el molino de viento a partir de mejoras realizadas en molinos hidráulicos cuyos antecedentes se remontan al final del Imperio Romano. Los primeros molinos parecen haber surgido como una combinación entre el molino mediterráneo de eje horizontal y la rueda de Vitrubio, Fig B.14, de uso corriente en Europa en las etapas finales del Imperio Romano.

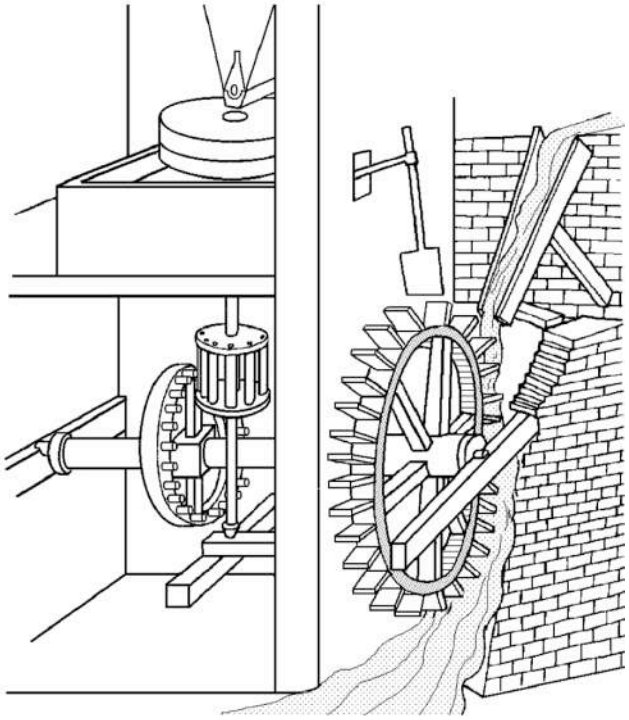


Fig B.14.- Grabado de un molino hidráulico conocido como Rueda de Vitrubio.

Técnicamente los molinos de esta época están condicionados en su potencia y rendimiento, por las limitaciones de los materiales empleados en su construcción. La resistencia de la madera es poco adecuada para fabricar las piezas móviles que tenían que soportar fuertes rozamientos, lo que impidió su desarrollo hasta que en el siglo XVI la industria metalúrgica mejoró sus procesos y pudieron fabricarse en hierro. La gran innovación del siglo XIII fue el engranaje, que permitió cambiar la dirección del eje motriz y adaptarlo a las diferentes necesidades industriales.

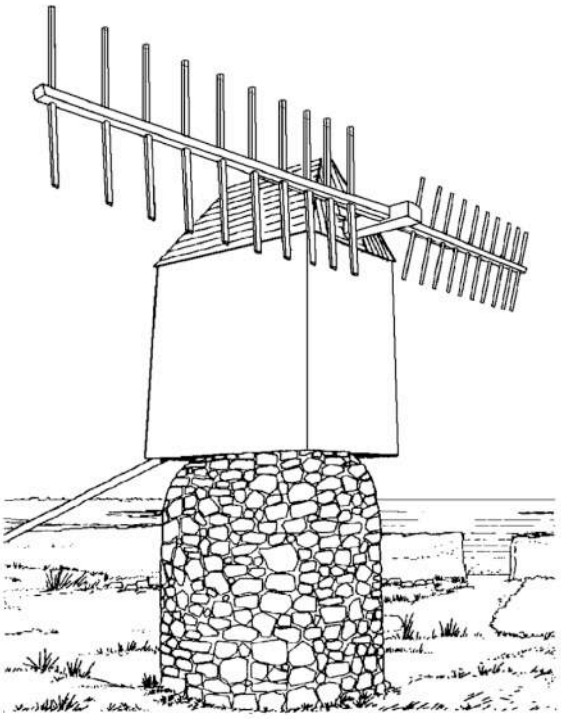


Fig B.15.- Molino de pivote hundido construido en la isla de Ouessant, Francia

Los primeros molinos europeos llevaban un rotor de 4 palas, fabricadas de entramado de madera con un recubrimiento de telas o tablas. Las palas se unían en el eje principal, totalmente horizontal, que transmitía el empuje del viento a las muelas a través de un engranaje que cambiaba la dirección del árbol motor. De esta forma, las muelas y los mecanismos se podían alojar con mayor facilidad en el recinto del molino, que se orientaba en la dirección del viento con la ayuda de una palanca, girando sobre un pivote que, generalmente se hincaba en tierra o se hundía dentro de un apilamiento de piedras o maderos, Fig B.15.

El sistema de pivote evolucionó hacia un trípode, proporcionando a todo el molino una base

más estable y de construcción más sencilla y eficaz para realizar operaciones de orientación. El molino de pivote se dejó de construir hacia el siglo XV. En cuanto al de trípode, parece que alcanza su apogeo en Flandes, desde donde se difunde por Alemania y Francia, aunque no faltan en Inglaterra y los países nórdicos, Fig B.16.

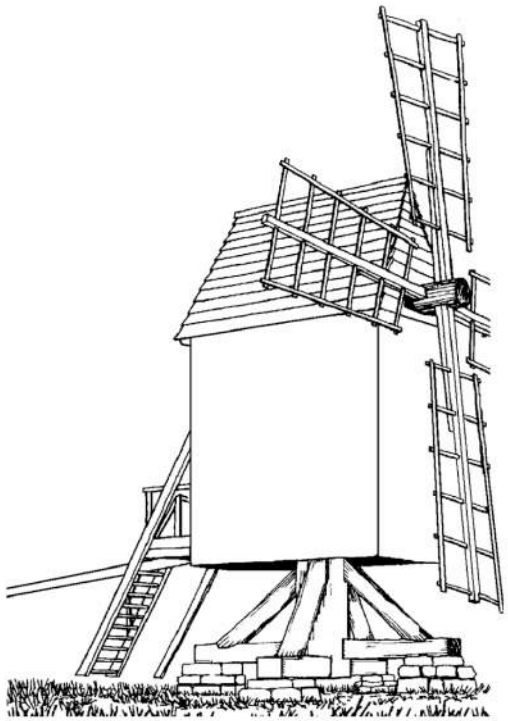


Fig B.16.- Molino de trípode usado en el norte de Europa en el siglo XIV

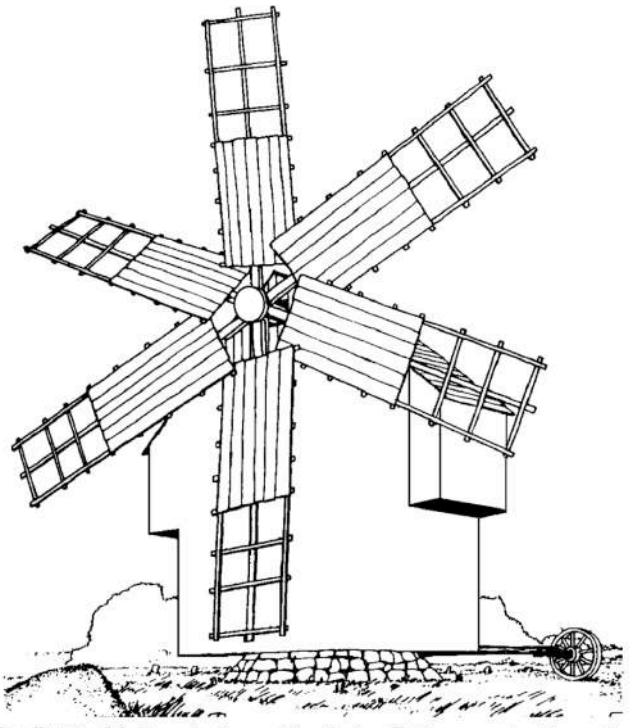


Fig B.17.- Molino de la región de los Balcanes, similar a los del norte de Europa, pero con un rotor de 6 palas

En los países del sudeste europeo los molinos también parecen de uso corriente, aunque no existan demasiadas referencias documentales. En Rumania se utilizaban molinos en las salinas de Besarabia.

En todo caso, la influencia del molino de vela se hace notar a medida que nos acercamos a los países de la ribera del Mediterráneo. Por ejemplo, en los Balcanes, el rotor de los molinos se construye al estilo europeo, pero con 6 palas como los de vela, habiéndose encontrado también en Bulgaria rotores de vela acoplados a molinos típicamente europeos, Fig. B.17 y B.18.

Sin embargo, a pesar de que la utilización de los molinos de viento llegó a ser de uso corriente en toda Europa durante este período, su evolución fue muy lenta desde el punto de vista tecnológico. El resurgir europeo de los siglos XII y XIII, que se manifestó en el crecimiento de la demografía, en la roturación de nuevos campos de cultivo y en la mejora de los rendimientos agrícolas, se interrumpe a principios del XIV, iniciándose un período de recesión que duraría hasta la mitad del siglo XV; estos primeros molinos europeos tenían cierta similitud con los que aparecen en los dibujos de Herón diez siglos antes.

La innovación de las máquinas eólicas, que tan enorme repercusión tuvo sobre la precaria economía feudal, fue un fenómeno de ca-

rácter artesanal, sin base tecnológica, que carecía del impulso suficiente para continuar su desarrollo, y hubo que esperar hasta el siglo XVI para que la introducción del hierro como material constructivo en los molinos de poste hueco y en los de tipo torre, permitiera resolver parte de sus dificultades técnicas.

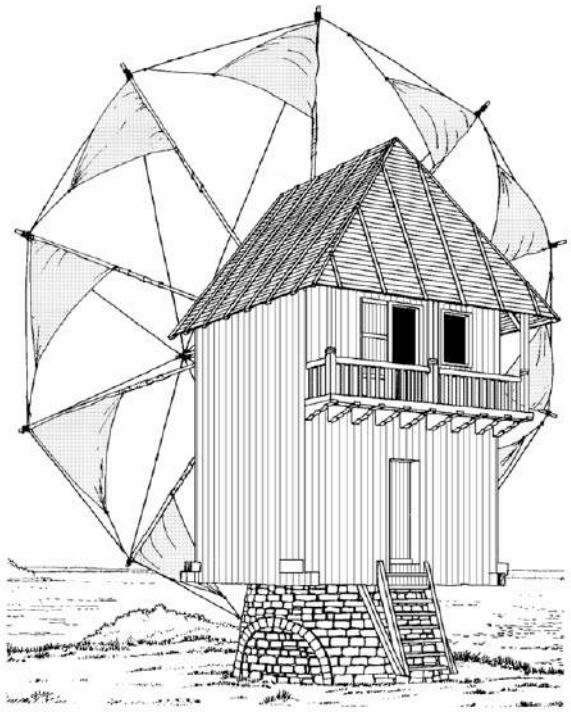


Fig B.18.- Molino utilizado en el sur de los Balcanes, Bulgaria, con un rotor de vela típico de los molinos mediterráneos

Aunque la evolución histórica de los molinos de viento se produce a través de un proceso continuo y acumulativo, la rapidez conque se presentan las innovaciones y aplicaciones de las máquinas eólicas a finales de la Edad Media sugiere una transformación profunda en el espíritu de la época.

Durante el siglo XVI se produce en Europa una nueva etapa innovadora, de carácter más industrial que la que se había producido en el siglo XII y que guarda ciertas similitudes con la que tendría lugar durante el siglo XIX, aunque en este caso, el núcleo central se encuentra en la República de Venecia, desde donde se difunde a lo largo de la cuenca del Po hacia otros centros de desarrollo de la Europa moderna.

El renacimiento industrial del siglo XVI surge como consecuencia del crecimiento demográfico y del incremento de los intercambios comerciales. El proceso innovador afectó principalmente a los métodos de producción que, a gran escala, exigían aportación de capitales y de importantes recursos humanos, justificando la aplicación de técnicas más avanzadas que mejoraran la calidad, el rendimiento y, especialmente, la capacidad de producción.

La ciencia del Renacimiento perdió parte de su aspecto especulativo y adquirió un nuevo carácter mecanicista, más adecuado para su aplicación a fines más prácticos. La relación entre una explicación mecanicista de la naturaleza, como la que se alcanza en el siglo XVII (Descartes, Hobbes) y el uso creciente de las máquinas en esa época, marca de forma explícita el cambio social de la ciencia y la tecnología.

Las técnicas fueron evolucionando a medida que se hacía necesario incrementar la producción, apoyándose en
- *El conocimiento de la mecánica*
- *El hierro como material constructivo de las máquinas tradicionales*
- *La utilización de las nuevas y más potentes fuentes de energía*

Durante las primeras etapas del desarrollo industrial, los molinos hidráulicos constituyeron el

elemento básico que permitió mover las fábricas de harina, de papel, de pólvora, etc, y las bombas para el riego, la desecación de las minas, de las salinas, etc. El impulso regular y constante de los molinos hidráulicos presentaba grandes ventajas en las zonas húmedas donde abundaban los cauces fluviales, y ello posiblemente fue, junto con las facilidades para el transporte, uno de los factores determinantes para la localización de las industrias. Así, las zonas industriales de la Edad Moderna se situaron en las riberas de los ríos, como la del Po, y en las de los innumerables cauces de los Países Bajos.

Los molinos de viento como fuente de energía alternativa desempeñaron un papel importante, aunque la irregularidad de los vientos hacía de ellos unas máquinas más complejas y costosas; el viento soplaba con más o menos intensidad en casi todas partes, y era el único recurso para obtener fuerza motriz en las zonas de secano o en lugares alejados de las corrientes de agua.

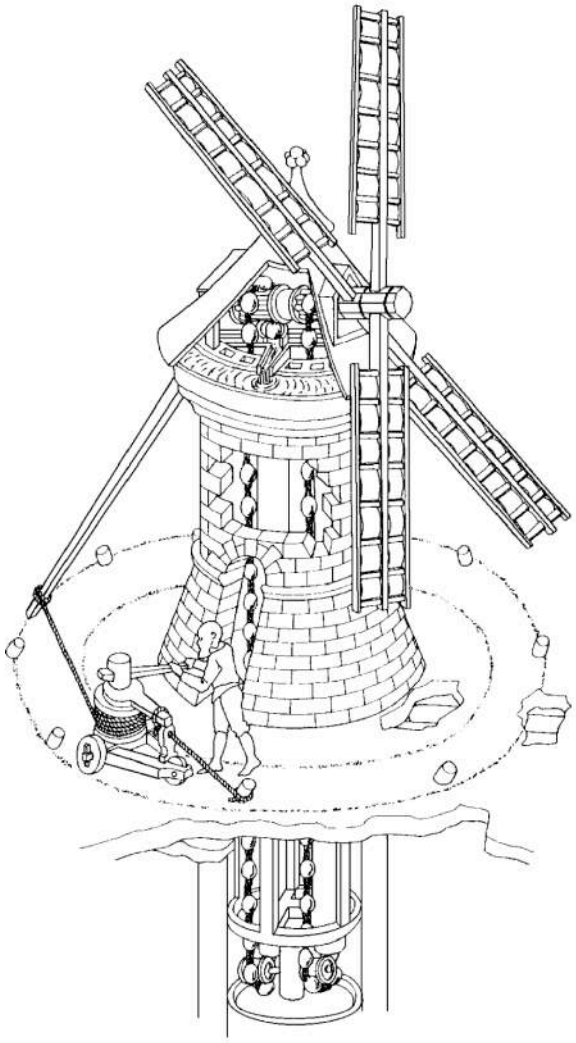


Fig B.19.- Molino de viento adaptado para bombeo, descrito en el libro de Agostino Ramelli, "Le diverse et artificiose machine", publicado en 1588

Los molinos de viento fueron insustituibles para moler la harina en la España seca y para desaguar los polders en Holanda, aunque posiblemente sus desventajas técnicas en relación con los hidráulicos dificultaron que tanto España como Holanda pudieran desarrollar una economía industrial.

Tanto los molinos hidráulicos como los de viento fueron objeto de mejoras considerables. La introducción de ele-mentos metálicos en la fabricación de los engranajes y piezas móviles permitió incrementar sustancialmente las potencias y rendimientos. El uso de ejes, transmisiones, cojinetes y coronas de hierro en sustitución de las antiguas piezas de madera representaría un importante avance que hizo posible la aplicación de estas fuentes de energía a las industrias más diversas.

A lo largo del siglo XVI son innumerables los diseños y proyectos relacionados con máquinas eólicas, aunque la mayoría de ellos nunca se llegaron a construir, pero los dibujos y grabados que se conservan demuestran unos conocimientos técnicos que nada tienen que ver con los de épocas anteriores.

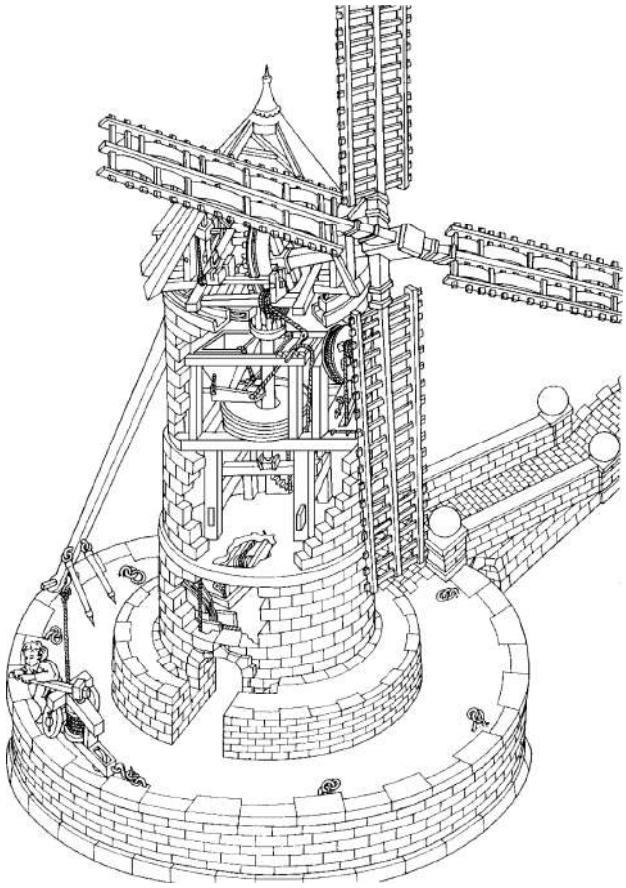


Fig B.20.- Molino de grano, descrito en el libro de Agostino Ramelli, "Le diverse et artificiose machine", publicado en 1588

Destacan los trabajos sobre ingenios mecánicos publicados por Leonardo da Vinci, en los que ya aparece un molino tipo torre, los de Jerónimo Cardan en su obra *De Rerum Varietate*, en la que desarrolla una de las primeras teorías sobre el funcionamiento del molino de viento, y donde aparece un molino de eje horizontal con una inclinación de 8 a 10º, y sobre todo, los de Agostino Ramelli, que publicó en 1558 un compendio de máquinas eólicas en su obra *Le Diverse et Artificiose Machine*, Figs 19 y 20. Otras importantes aportaciones a la mecánica se encuentran recogidas en el libro *Omnium lliberalium Mechanicarum ant Sedentariarum Artium Genera Continens* de Jost Amman, editado en Francfort, 1568; en el *Novo Teatro di Machine et Edifici* de Vitorio Zonca, editado en Padua, 1607, y en el *Théatre des lnstruments Mathématiques et Mécaniques*, de Jacques Bessons, 1578.

Aunque los trabajos más importantes sobre molinos fueron el *Theatrum Machinorum Novum* de Georgium Andream Blöckler, 1662, *Diseños de toda clase de Molinos de viento* de Octave de Strada, 1617, y el *Machinoe Novae* de Fausto Verancio, Obispo de Czanard, Polonia, 1590, el más amplio estudio sobre este tipo de máquinas que se hubiera realizado hasta entonces y en el que se recogen gran parte de los conocimientos de la época sobre el tema, demuestran el interés existente por las aplicaciones de la mecánica a los ingenios eólicos.

A finales del siglo XVI los molinos de viento se utilizan para aplicaciones muy diversas como moler grano, bombear agua, mover serrerías, fabricar pasta de papel o pólvora, batanes, prensas de aceite, etc; en Francia e Inglaterra se empleaban en la obtención de la sal. El primer molino de aceite del que se tiene noticia se construyó en Holanda en 1582 y cuatro años más tarde se levantó el primero dedicado a moler pasta de papel. En 1592, Cornelio Cornelisz construyó en Holanda una serrería impulsada por energía eólica, Fig B.21; en Inglaterra, el primer molino de drenaje se construyó en 1588, siendo muy comunes desde entonces.

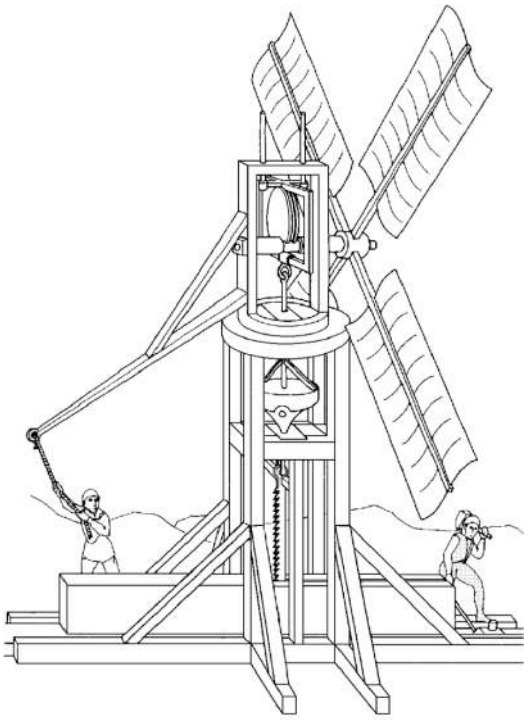


Fig B.21.- Grabado de una sierra mecánica impulsada por un molino de viento

A partir del siglo XVII en Holanda se emplean a gran escala para bombear agua. Entre 1608 y 1620 los holandeses desecaron el polder Beemster mediante 26 molinos de 20-25 kW cada uno. Años más tarde, Leeghwater deseca el polder de Schermer con 44 molinos en dos etapas. A finales del siglo XVII había, solamente en el distrito de Zaan, más de 700 molinos de este tipo y más de 900 a finales del siglo siguiente.

La utilización de molinos de viento para el bombeo adquirió una gran importancia en las explotaciones mineras. Agrícola, ingeniero en la corte del emperador Carlos V y uno de los más conocidos especialistas en ingeniería minera de la época, en su obra *De Re Metallica*, 1556, describe diversos sistemas para airear minas impulsados por molinos de viento. También Leibniz estuvo interesado en las aplicaciones de los molinos de viento para el bombeo de agua de las minas, diseñando una máquina eólica para las minas de Harz propiedad del príncipe Juan Federico de Hannover (1680).

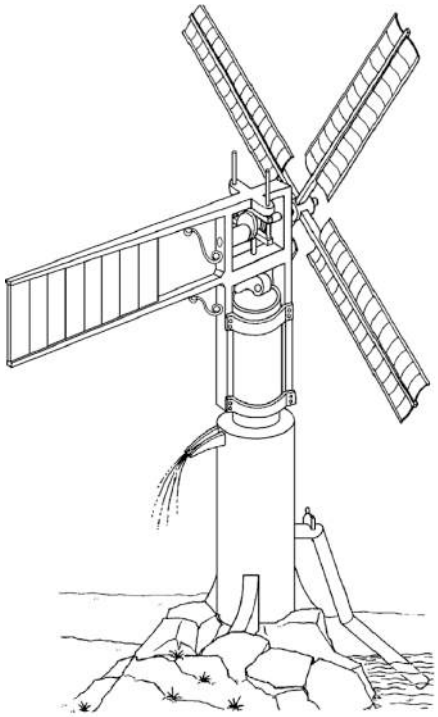


Fig B.22.- Molino de eje horizontal que impulsa una bomba de pistón

La importancia económica y social de los molinos, tanto de agua como de viento, se refleja en la enorme cantidad de privilegios y ordenanzas reguladoras otorgados por los monarcas y en los numerosos pleitos surgidos entre villas y nobles sobre sus derechos y monopolios. En las *Crónicas* de Jocelyn de Brakelong, 1591, se mencionan varios pleitos que tuvieron como causa los derechos banales.

En toda Europa los molinos se constituyen en verdaderos monopolios para la fabricación de harinas y, en general, de todos los procesos de fabricación industrial. Dichos monopolios, conocidos por *derecho banal*, estaban asociados a los privilegios señoriales, y eran detentados habitualmente por la nobleza, monasterios, abadías y órdenes religiosas, para los que constituían una fuente importante de recursos económicos. Sólo en algunas partes de Europa, en el Imperio, en Flandes o en el Artois, los derechos del agua y del viento pertenecían exclusivamente al soberano, aunque los cedían a los nobles mediante concesiones y licencias.

En Inglaterra, entre los siglos XI y XIV, se concedía a los burgueses el privilegio de usar molinos de brazo o de caballo, como una exención al derecho banal. La impopularidad de estos derechos provocó en ocasiones revueltas de campesinos, como la que ocurrió en 1381 y que dió lugar a un largo y sangriento enfrentamiento entre los campesinos y la abadía de Saint Albany, que poseía los derechos de monopolio. Estos derechos fueron desapareciendo en Inglaterra, a lo largo del siglo XVII, pero en Francia todavía existían en tiempos de la Revolución y fueron abolidos por decreto en 1789 y por ley en 1790. El uso generalizado de los molinos de viento dió lugar a una floreciente industria artesanal, cuyos gremios llegaron a ser muy importantes en Francia, Países Bajos e Inglaterra; los rígidos esquemas de funcionamiento de estas asociaciones profesionales supusieron otro impedimento a la innovación tecnológica de los molinos de viento.

A partir del siglo XV los molinos europeos responden a dos conceptos bien diferenciados, que se van a desarrollar hasta mediados del siglo XIX; así se tienen los molinos de eje:

- Horizontal, los más extendidos, que se diferencian de los de trípode y de torre

- Vertical que, aunque no muy frecuentes, nunca llegan a desaparecer, debido a sus ventajas estructurales y de orientación

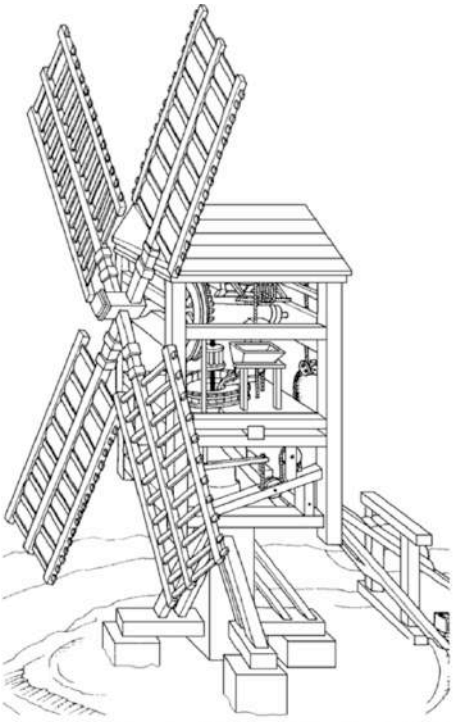
Los molinos de trípode habían sustituido a los de pivote consiguiendo una sustancial mejora en el sistema de apoyo, lo que hizo posible la construcción de máquinas de mayor tamaño.

Los molinos de bombeo utilizados en Holanda desde 1430 en la desecación de los polders respondían a un esquema preciso. La base se construía en ladrillo o piedra, y sobre ella se asentaba la torre de estructura de madera. Las aspas podían alcanzar hasta 30 m de diámetro y desarrollaban una potencia de 10 kW. En la cúpula se alojaban el eje principal y el engranaje que transmitía el movimiento a la base. El eje motor descendía verticalmente a través de un poste hueco hasta la base del molino donde se acoplaba al mecanismo de bombeo.

Los sistemas de bombeo más corrientes eran
- *la rueda hidráulica*
- *el tornillo de Arquímedes*
- *las norias de rosario o de cangilones, Fig B.24*

No tardaron en utilizar el mismo sistema en los molinos de grano, disponiendo las muelas en

un recinto inferior fijo a la base, de forma que al disminuir el peso de la parte giratoria se facilitaran las operaciones de orientación. El artificio del poste hueco permitió a los molinos de trípode continuar su desarrollo paralelamente a los de tipo torre, adaptándose a las necesidades crecientes de la época.



Reproducción del libro de Böckler "Theatrum Machinarum Novum", publicado en 1662
Fig B.23.- Vista de un molino de trípode.

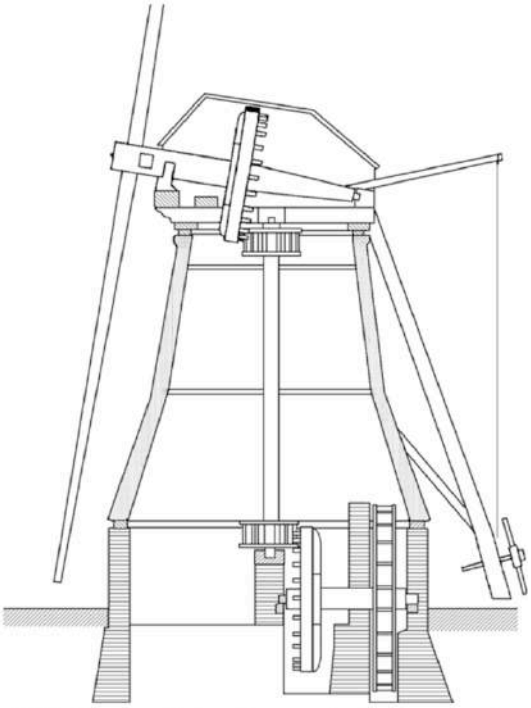


Fig B.24.- Molino de bombeo acoplado a una noria, según el esquema típico utilizado en Holanda para desecar los polders

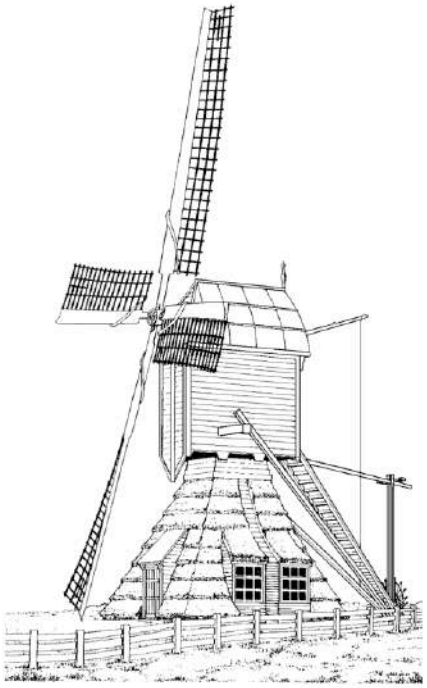


Fig B.25.- Molino de poste hueco con base de trípode cubierto, utilizado en Holanda para molienda y bombeo a partir del siglo XVI

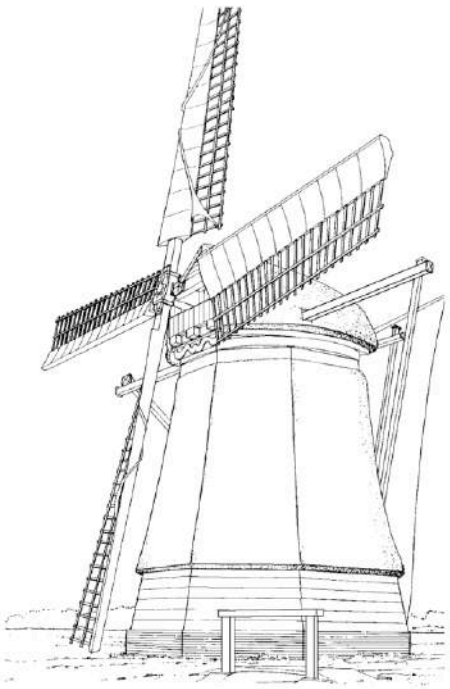


Fig B.26.- Molino de drenaje,utilizado en Holanda a partir del siglo XVII para desecar los polders

Con el tiempo, el trípode acabaría recubriéndose para utilizarlo como almacén o como vivienda del molinero, Fig B.25. Los molinos de torre surgen en el ámbito mediterráneo, y tal vez en la península ibérica, pero arraigan principalmente en Europa, según se deduce de la abundancia de grabados en que aparece este tipo de molino; el primero pudo haberse construido en $\begin{cases} \textit{Holanda, según L. White, en Alkman, 1573} \\ \textit{Flandes, según Norman Lee, 1550} \end{cases}$; otros autores mencionan un dibujo de Leonardo anterior a 1519, que parece ser un molino de torre.

Las torres de ladrillo o piedra, de 5 o 6 m de altura, con una sección circular u octogonal, tenían unos 4 m de diámetro. La referencia gráfica más antigua que se conoce sobre un molino de este tipo pertenece a un salterio francés de 1420, siendo mencionados en el siglo siguiente por Leonardo y Agrícola; el recubrimiento de madera resultaba más barato, por lo que Jaime I de Inglaterra invitó en 1621 a un ingeniero holandés, Cornelius Vermuyden, a construir uno de estos molinos más económicos introduciendo una variante que caracterizará a los molinos ingleses desde entonces.

A pesar de las innovaciones técnicas incorporadas a los molinos de trípode y de tipo torre, la orientación de estas máquinas, que cada vez eran de mayor tamaño, constituía un problema de difícil solución.

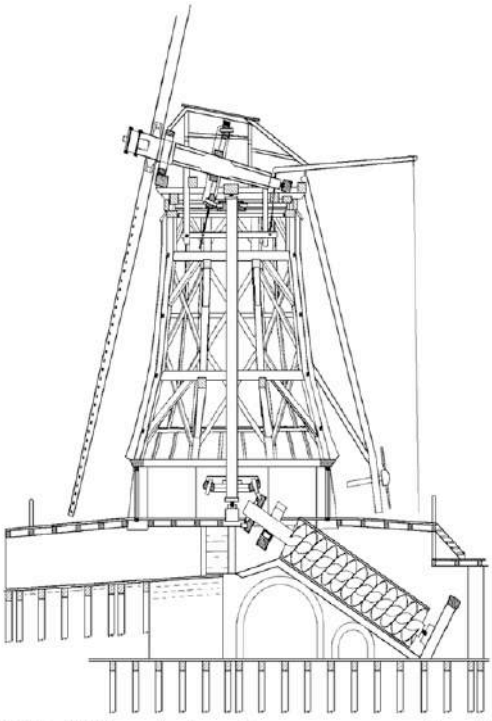


Fig B.27.- Molino de drenaje que mueve un tornillo de Arquímedes,utilizado en Holanda a partir del siglo XVII

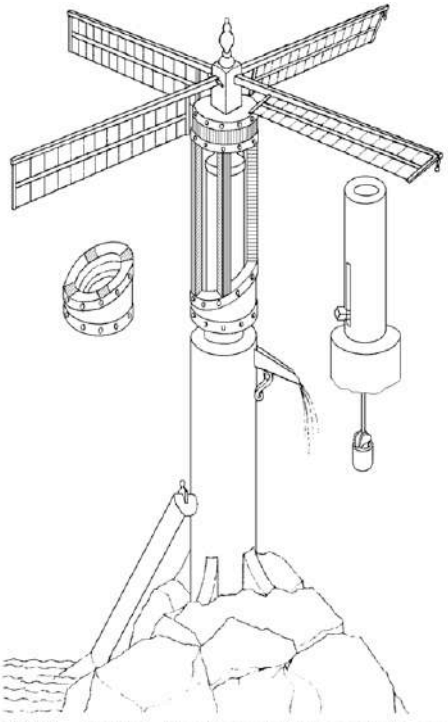


Fig B.28.- Molino de eje vertical acoplado a una bomba de pistón

Tal vez por esta razón, los sistemas de eje vertical se siguieron desarrollando a pesar de ser aerodinámicamente menos eficaces. Existen referencias de molinos de este tipo en Creta en el año

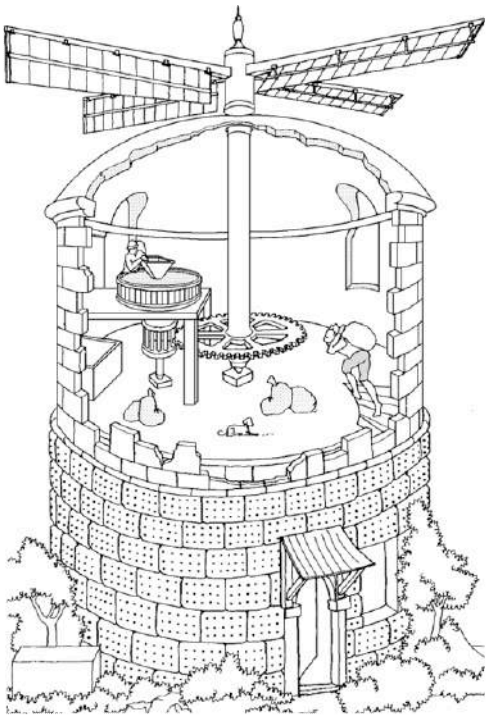


Fig B.29.- Molino de grano impulsado por un rotor de eje vertical

1486, y en Crimea a finales del siglo XVII, que podían ser descendientes directos de los molinos persas.

En el siglo XVI Agrícola había diseñado máquinas de este tipo, recogiendo las ideas desarrolladas por Mariano di Jacobo en su libro *De Machinis*, 1436. Pero, sin duda, las mayores aportaciones en el campo de los molinos de eje vertical se deben al obispo Verancio. Jacques Bessons describe un sistema de rotor de eje vertical, cuyo diseño es muy parecido al que en 1924 diseñaría el ingeniero finlandés Sigurd Savonius. El obispo Verancio, en *Machine Novae*, describe con detalle diferentes tipos de aeroturbinas de eje vertical, algunas de ellas diseñadas por el propio obispo, y con las que esperaba conseguir potencias superiores a las obtenidas hasta el momento con los molinos convencionales de eje horizontal.

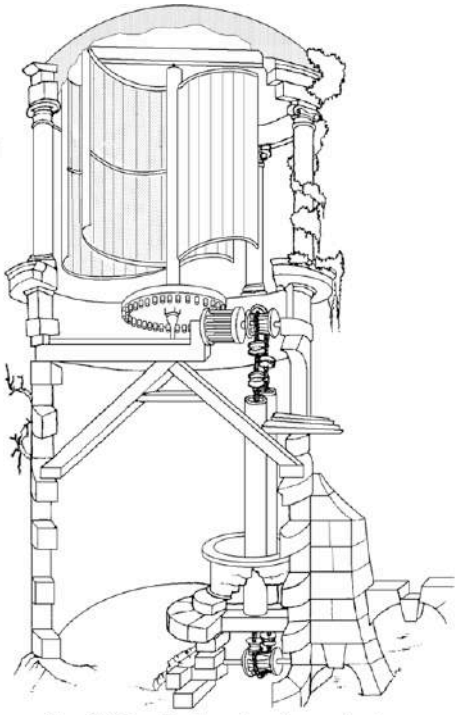


Fig B.30.- Molino de eje vertical diseñado por Jacques Bessons, 1578

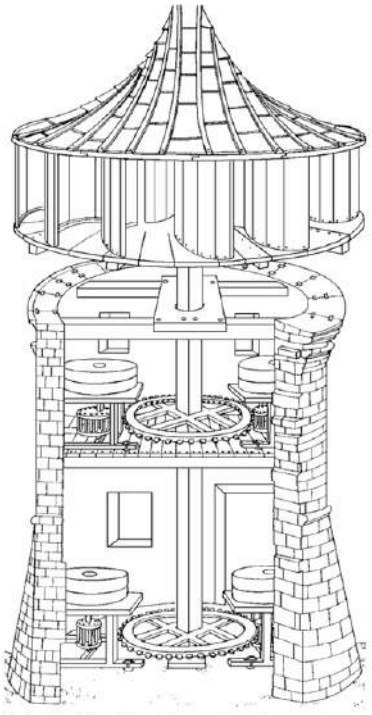


Fig B.31.- Turbina de eje vertical diseñada por el obispo Verancio, 1590

El siglo XVIII es un siglo de grandes avances científicos y tecnológicos, pero los principios teóricos de los molinos de viento son todavía apenas conocidos, como sostiene Agustín de Betancourt en su *Ensayo sobre la Composición de las Máquinas*, 1808, en colaboración con José María

de Lanz. A pesar de ello, los molinos mejoran substancialmente como consecuencia de los constantes experimentos realizados por sus constructores, y no faltan intentos de los más célebres científicos de la época por demostrar analíticamente las conclusiones de dichos experimentos.

Durante este siglo se publicaron innumerables tratados teóricos sobre molinos de viento, que no eran simples descripciones sobre diferentes tipos de máquinas, sino estudios que pretendían profundizar en las condiciones que optimizaban el rendimiento de los rotores sobre los sistemas de regulación automática, orientación, etc.

Daniel Bernoulli desarrolla en su *Traité de l'Equilibre et du Mouvement des Fluides*, París 1744, un minucioso análisis sobre la composición de velocidades que interaccionan con las palas, observando que en condiciones de operación óptimas, la velocidad en el extremo de la pala debida a la rotación es parecida a la velocidad del viento, por lo que la posición de la misma debe ser de 45º.

Bernoulli ya había observado que para que el impulso aerodinámico fuese óptimo, los ángulos de:

- *Ataque debían ser pequeños*
- *Cada segmento de pala debían ir creciendo paulatinamente desde el eje hasta el extremo, a medida que crecía la velocidad debida a la rotación*

En las *Memorias de Berlín,* Euler 1756, se encuentra un ensayo sobre la teoría de los molinos de viento, donde se indican los valores que debe tener el ángulo de torsión de las palas; así, el ángulo formado por la pala en las inmediaciones del eje debía ser de 54º y debería ir creciendo paulatinamente hasta alcanzar los 80º en la punta de la misma. Coulomb da torsiones parecidas, de 60º en el eje y 78º a 84º en el extremo de la pala, y en las *Memorias de la Academia de las Ciencias de París*, 1781, Coulomb calcula que la potencia que se puede obtener con un molino de bombeo holandés es equivalente al trabajo de 61 hombres.

Algunas de las obras que llegaron a convertirse en clásicos de la literatura eólica fueron:

- *Theatrum Machinarum Hydraulicorum, de Leopold Jacobs, Leipzig 1724*
- *Architectura Mechanica of Moole-Boek, de P. Linperch, 1729*
- *Theatrum Machinorum Universale de Johannis Van Zyl, Amsterdam 1761, donde se describen todos los tipos de molinos conocidos en la época*
- *Tratado de Tilerman Van Der Horst, Amsterdam 1757*
- *Architecture Hydraulíque, de Belidor, 1782*
- *Essai sur la maniére la plus avantageuse de construire les Moulins a Bled, 1783, del francés Jean Antoine*

Las dimensiones de las palas, su forma, los sistemas de orientación y regulación, y los detalles constructivos, son los problemas técnicos que preocupan en esa época, y se tratan en las obras de Beyer *Théátre de Moulins* de Schapp, 1766, y *Descripción del Arte de Construir Molinos*, 1788.

Agustín de Betancourt, en su obra *Ensayo sobre la Composición de las Máquinas*, 1808, analiza las ventajas e inconvenientes de los molinos de eje vertical y los de eje horizontal.

A mediados del XVIII los técnicos holandeses discutían sobre:

- *La ventaja de inclinar el eje de los molinos para obtener mejor rendimiento aerodinámico*
- *Las desventajas mecánicas de dicha inclinación*

El interés por resolver el problema llevó a la Inspección de Molinos de la ciudad de Gouda a realizar unas pruebas cuyos resultados se publicaron en 1779, quedando establecida la inclinación óptima de los rotores entre 13º y 15º.

La obra teórica más importante del siglo XVIII y casi del XIX la desarrolló el inglés Smeaton, con sus trabajos:

- *On the Construction and Effects of the Windmills Sails*
- *An Experimental Enquiry Concerning the Natural Powers of Wind and Water*

En el primero de ellos se lleva a cabo un exhaustivo estudio sobre el comportamiento y actuación de las palas de los molinos de viento, demostrando por primera vez que los rotores con un elevado número de palas no proporcionan mayor potencia que los que disponen de 3 o 4 palas con iguales características; la conclusión de que el empuje del viento no depende de la superficie de las palas, sino del área barrida, es el primer paso hacia una verdadera comprensión del funcionamiento del rotor eólico.

Las innovaciones no alteraron el formato exterior de los molinos, que se mantuvo sin apenas modificaciones, pero en cambio mejoraron los detalles de diseño y construcción, apareciendo los sistemas mecánicos de orientación y regulación. En toda Europa se había impuesto el molino tipo torre de eje horizontal, y sólo en Polonia, a la sombra de las aportaciones del obispo Verancio, se siguieron desarrollando las aeroturbinas de eje vertical, en las que se llevaron a cabo ciertos intentos de adaptar sistemas de regulación automática, aunque sin demasiado éxito.

Dos autores franceses del siglo XVII y XVIII, Couplet y Du Cuet, señalan la existencia en Polonia, 1696, de pequeños molinos de eje vertical que identifican como *portugueses*, utilizados para moler el trigo. En Dinamarca, en la isla de Bomholm, se usaban todavía en los siglos XVIII y XIX, y en Yugoslavia existían molinos de eje vertical antes de la Segunda Guerra Mundial.

Las turbinas de eje vertical se siguieron construyendo en Polonia cuando ya se habían aban-

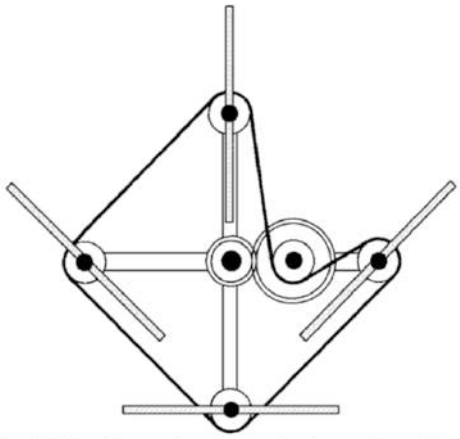


Fig B.32.- Rotor de eje vertical provisto de un dispositivo de palas móviles, Jackson

donado en el resto de Europa, en donde, superadas las dificultades de la orientación, se había llegado a la conclusión de que los sistemas de eje horizontal proporcionaban mejores rendimientos y resultaban más fáciles de regular. A pesar de ello, Jackson, 1800, diseñó un sistema para mejorar el rendimiento de estas turbinas, cuyo mecanismo consistía en una polea solidaria a las palas que hacía variar su posición a lo largo de la rotación; cuando las palas giraban a favor del viento su posición era frontal a él, mientras que en el lado de contraviento se situaban en bandera, Fig B.32.

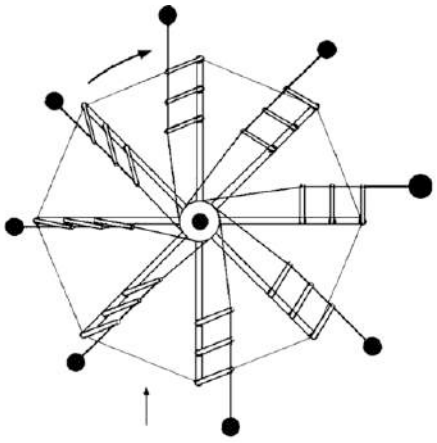


Fig B.33.- Rotor de eje vertical provisto de un sistema de persiana para regular la velocidad de giro, Rychlowsky

Rychlowsky, 1800, intentó acoplar un sistema de regulación tipo persiana para conseguir el mismo efecto; la persiana se cerraba a favor del viento y se abría cuando las palas se encontraban en posición contraria, Fig B.33. Sin embargo, estos ingeniosos mecanismos, eran demasiado complicados para que pudieran tener resultado práctico. En 1840 se construyó en Polonia la que posiblemente fuese la última turbina de eje vertical, Fig B.34.

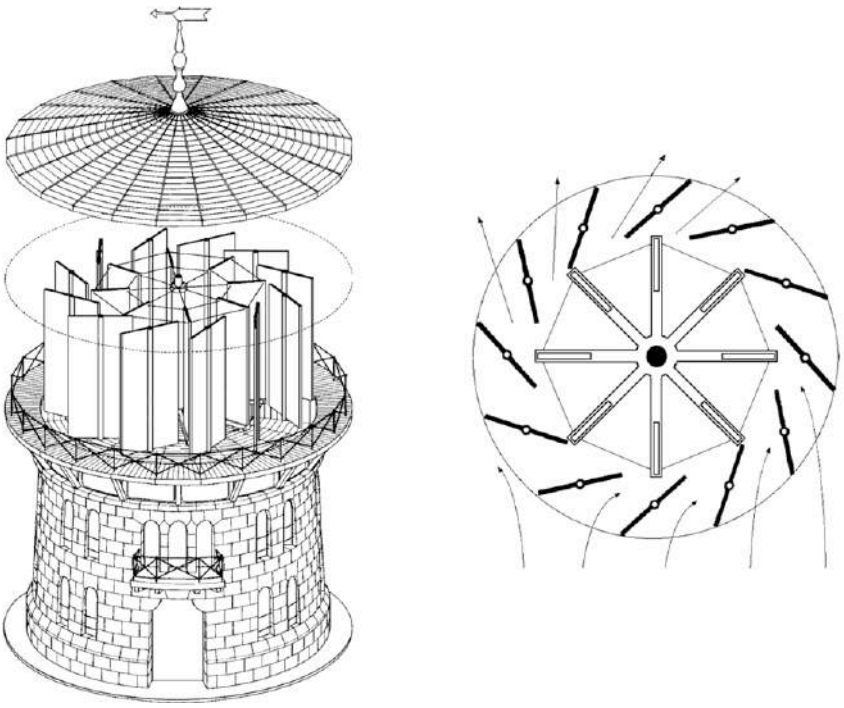


Fig B.34.- Molino de eje vertical provisto de álabes deflectores para regular la velocidad de giro, construido en Polonia en 1840

Los sistemas de eje horizontal, por el contrario, siguieron evolucionando con éxito. Se los utiliza para una gran variedad de actividades, y la introducción de métodos industriales de fabricación, junto con la sustitución de piezas de madera por elementos metálicos, permitió obtener de los molinos de viento actuaciones cada vez más eficaces. La orientación del rotor y del recinto de los mecanismos había sido, desde siempre, el problema más grave de las grandes máquinas de eje horizontal. Desde la sencilla solución de la cuerda atada al eje principal de los molinos mediterráneos, y de la palanca en los primeros molinos europeos, se había intentado todo tipo de artilugios para ayudar a realizar las operaciones de orientación con mayor facilidad y poder incrementar el tamaño de los rotores.

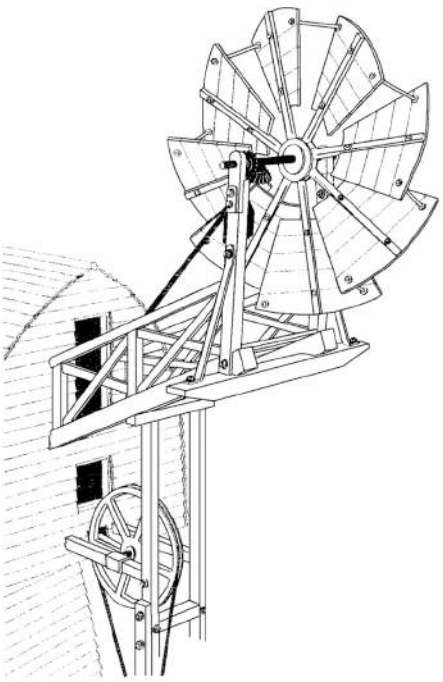


Fig B.35.- Rotor auxiliar utilizado como sistema automático de orientación

A lo largo de los siglos se utilizaron ruedas, poleas y manubrios, pero la verdadera solución al problema la aportaron las mejoras de diseño que estaban dirigidas a reducir el volumen y el peso de la parte del molino que se debía orientar; los rodamientos y las piezas deslizantes facilitaron las cosas de forma apreciable.

El primer sistema de orientación mecánica lo introdujo el inglés Edmund Lee, 1745, Fig B.35. El mecanismo consistía en un rotor auxiliar, en posición perpendicular al principal, que iba montado sobre la escalera de acceso al molino y acoplado a una rueda que apoyaba sobre el suelo. Cuando el molino no estaba debidamente orientado, el viento incidía sobre el rotor auxiliar, y éste actuaba sobre la rueda moviendo toda la máquina.

Estos sistemas automáticos de orientación se utilizaron en Inglaterra durante el siglo XVIII, y en el siglo siguiente se extendieron por Holanda y los Países Bajos.

El diseño y fabricación de las palas fueron también objeto de constantes mejoras. Las palas de los molinos anteriores al siglo XVI se construían con un entramado de varillas a ambos lados de un mástil principal, cubriéndose posteriormente con una tela.

Más tarde, el mástil se colocó en el borde de ataque de la pala, de forma que soportara mejor la entrada del aire; este sistema era el más adecuado para dar cierta torsión a la pala a lo largo de su envergadura, con el fin de mejorar su rendimiento aerodinámico.

Las palas con torsión se desarrollaron en el siglo XVII y la incorporación de los sistemas de regulación se llevó a cabo en el siglo siguiente, Fig B.36.

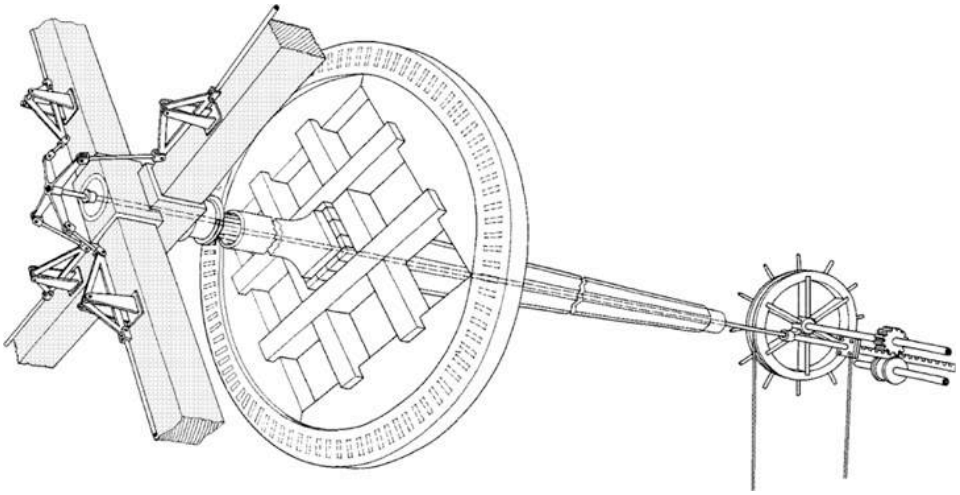


Fig B.36.- Mecanismo de regulación provisto de un dispositivo exterior que a través de un eje actúa sobre el sistema de frenado

En el siglo XVII, la resistencia estructural de las palas les permitía alcanzar una longitud de 12 a 15 m, y el entramado transversal estaba formado por una treintena de largueros de algo menos de 2 m de largo, de los cuales 0,4 m formaban el borde de ataque de la pala que se recubría con tablas fijas.

La pala con freno aerodinámico incorporado, fue inventada por Andrew Meikle, 1772; las palas llevaban un flap en el extremo, que actuaba mediante un resorte cuando el viento era demasiado fuerte.

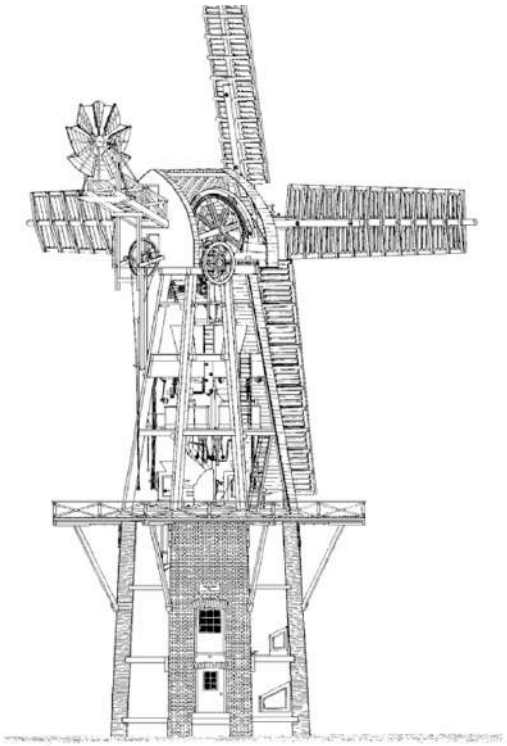
Stephen Hooper, 1789, completó el mecanismo introduciendo un sistema de control remoto, de modo que pudiera ser accionado desde el interior del molino.

La regulación automática de la molienda fue posible por Sir William Cubitt, 1807, que incorporó un sistema de masas centrífugas, inventado por Thomas Mead, 1787, para regular la separación entre las muelas; el mecanismo disponía de dos masas centrífugas y actuaba en función de la velocidad de giro; cuando el molino aumentaba su velocidad, la holgura de las muelas aumentaba.

La primera etapa de la revolución industrial afectó exclusivamente a la maquinaria y al utillaje textil. Sólo la industria textil disponía de un mercado consolidado y en continua expansión, capaz de concentrar sus medios de producción y aprovechar las ventajas del vapor como fuente de energía. Es también la única que disponía de capitales suficientes para invertir en las nuevas tecnologías. En cambio, la dispersión de las actividades tradicionales asociadas al mundo rural, limitó en un principio las ventajas del vapor, permitiendo que los molinos siguieran utilizándose.

Por otra parte, y a pesar de que la máquina de vapor presentaba grandes ventajas técnicas, las potencias que se consiguieron en un principio no eran superiores a las de los molinos.

Los molinos de viento siguieron progresando técnicamente hasta mediados del siglo XIX, introduciendo continuas mejoras a partir de elementos mecánicos. La obra de John Smeaton permitió a los molinos de viento competir con las máquinas de vapor durante más de medio siglo.



Dispositivos de autoorientación, regulación de velocidad y regulación de holgura de muelas
Fig B.37.- Molino inglés del siglo XIX totalmente automatizado

Entre la segunda mitad del siglo XVIII y la segunda mitad del siglo XIX, los molinos de viento europeos alcanzan su más alto nivel de perfeccionamiento. Los rotores de orientación y los sistemas de regulación de potencia se ven completados por mecanismos internos, que ayudan en las operaciones de transporte y manipulación de las materias primas y de la molienda en sí, convirtiendo los molinos de viento en factorías mecanizadas con un alto grado de automatización, Fig B.37.

El español José Mariano Vallejo, que viajó por Europa a principios del XIX con objeto de estudiar estos ingenios, dejó constancia en su *Tratado sobre el Movimiento y Aplicaciones de las Aguas*, Madrid 1833, de la gran cantidad de molinos de viento que encontró en las ciudades de París, Lille, Bruselas, Rotterdam, Amsterdam, Amberes, Leyden, etc, aplicados a todo tipo de industria, molienda de grano y tabaco, serrerías de madera y mármol, fabricación de aceite, etc.

Al final de este período, la imagen de los molinos de viento se encuentra por todos los rincones de Europa, y no resultan raros en los Estados Unidos, Canadá, Australia, Latinoamérica y, en general, en aquellos países del Nuevo Mundo en que los emigrantes europeos se habían establecido.

Aunque los molinos de viento habían llegado a convertirse en máquinas relativamente eficaces, su constitución era demasiado sólida y su estructura demasiado compleja para competir con los nuevos sistemas energéticos. La irregularidad de su funcionamiento y su limitada potencia, que no superaba los 25 kW, les impidió adaptarse a las exigencias de los nuevos sistemas de producción surgidos a la sombra de la revolución industrial.

En la segunda mitad del siglo XIX comienza a aparecer la nueva generación de aeroturbinas eólicas, con un concepto de diseño diferente, adaptadas a los nuevos conocimientos científicos,

nuevas necesidades y nuevos métodos de producción. Son máquinas sencillas, susceptibles de fabricarse en talleres con los nuevos sistemas de producción en cadena. Su ámbito de aplicación se reduce a zonas rurales más o menos aisladas, donde las ventajas de la industrialización todavía no se han hecho notar, y en general se utilizan exclusivamente para bombear agua de los pozos.

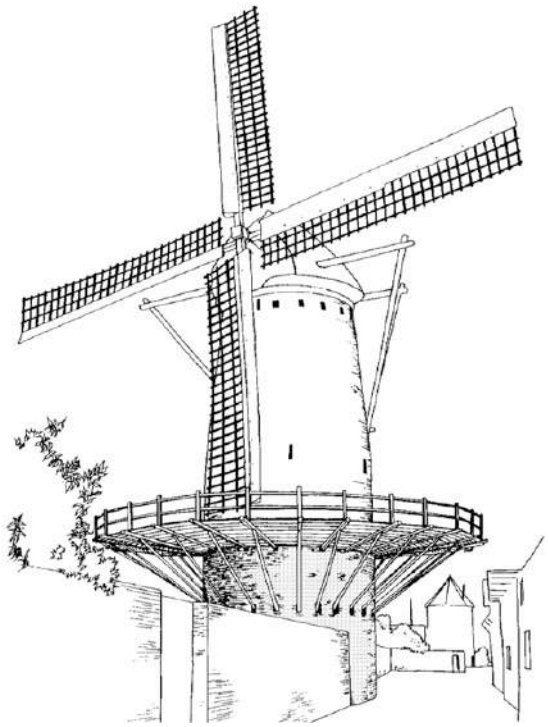


Fig B.38.- Molino de Xanten, Alemania, siglo XIX

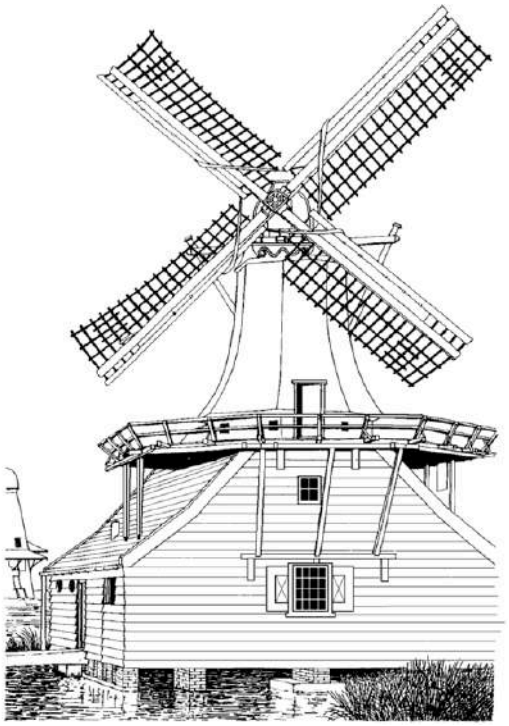


Fig B.39.- Molino holandés del siglo XIX

Las primeras bombas eólicas aparecieron en USA desarrolladas por Daniel Halladay, 1854; son, en principio, rotores múltiples acoplados a una bomba de pistón. Años más tarde, Steward Perry, 1883, fabricaría sobre esta idea otro modelo con álabes metálicos, que llegaría a convertirse en el molino de viento más extendido de cuantos hayan existido. El multipala era un molino mucho más ligero que sus antecesores, pero bastante lento, lo que le iba a diferenciar de sus sucesores; tenía un rotor de 3 m de diámetro, montado sobre un eje horizontal, en la parte superior de una torre metálica. Alcanzaba potencias de 125 W con velocidades de viento de 25 km/h y tenía capacidad para elevar 150 litros/min a 8 m de altura mediante una bomba de pistón.

Este molino se utilizó principalmente para bombear agua en zonas apartadas y desempeñó un importante papel en la colonización del oeste americano. Se exportó a todos los países del mundo, llegándose a fabricar más de 6.000.000 de unidades, de las que unas 150.000 podrían estar todavía en funcionamiento. La imagen del multipala era tan corriente en América, Australia o Africa como en el Levante español, en el Mediterráneo oriental o en las islas Canarias.

Un molino parecido al multipala americano se ha venido utilizando en la isla de Mallorca has-

ta épocas muy recientes; el rotor tiene mayor diámetro que el americano y va montado sobre una torre metálica que, a su vez, se apoya en otra de mampostería o sillería, construida sobre la boca del pozo.

Las turbinas multipala habían iniciado el camino hacia un nuevo concepto de máquina eólica, pero sus aplicaciones restringidas casi con exclusividad al hidrobombeo limitaban sus posibilidades de desarrollo. En los paises europeos que tradicionalmente habían considerado el viento como una importante fuente de energía, las bombas eólicas no ofrecían demasiado interés, por lo que la única posibilidad de seguir utilizándolas era reconvertir los viejos molinos, de forma que pudieran generar electricidad.

En 1890, el gobierno danés inició un programa de desarrollo eólico en este sentido, encargando de la dirección de los trabajos al profesor Laceur, que diseñó en 1892 una planta experimental aplicando los principios establecidos por Smeaton un siglo antes, y más tarde construyó otra de mayor potencia, que se convirtió en un centro de experimentación hasta que en 1929 un incendio la destruyó. Después de numerosos ensayos, Laceur acabó diseñando el primer prototipo de aerogenerador eléctrico; la máquina utilizaba rotores cuatripala de 25 m de diámetro, capaces de desarrollar entre 5 y 25 kW mediante un generador situado en la base de una torre metálica de 24 m de altura. Este modelo se empezó a fabricar en los primeros años del siglo XX, llegándose a instalar más de 70 unidades hacia 1908, y unas 120 antes de la Primera Guerra Mundial.



Molino St Antonius Abad de Borkel, Holanda.- Visita realizada en 2013 por Pedro Fernández y su esposa Maribel
El molino fue construido en 1865 en nombre de Theodorus van Driel y tuvo un gran número de molineros y propietarios.
Desde principios de 1999 está bajo la dirección de la Fundación Molino de San Antonio Abad, Borkel

En los primeros aerogeneradores eléctricos el almacenamiento de la energía resultó un problema de difícil solución. Cuando todavía las redes eléctricas no estaban muy desarrolladas no quedaba más solución que utilizar directamente la energía eléctrica producida; no siendo todavía muy corrientes las baterías, el problema del almacenamiento se resolvía mediante un sistema de bombeo de agua a un embalse, para su posterior utilización hidroeléctrica a través de una turbina convencional.

Los trabajos de Laceur constituyeron los primeros pasos en el campo de los aerogeneradores modernos, pero la teoría aerodinámica no estaba todavía suficientemente desarrollada y sus plantas eólicas, a pesar de ser las más avanzadas de la época, seguían utilizando los rotores clásicos de bajo rendimiento, con sistemas de regulación de persiana.

Un avance importante se produjo por esta época, cuando E. L. Burne en Inglaterra, y K. Bilau en Alemania desarrollaron un sistema de regulación de paso variable, que permitía un mejor control de la potencia de las aeroturbinas. Esta nueva mejora en la tecnología de los rotores contribuyó considerablemente a su adaptación como generadores eléctricos.