

Azudes, molinos y otros aspectos de “Los Veintiún Libros de los Ingenios y Máquinas”

Javier Goicolea Zala
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Fundación Juanelo Turriano

RESUMEN

Se describen las importantes obras realizadas en el reinado de Felipe II, que denotaban un gran desarrollo tecnológico, p.e., la presa de Tibi y el Artificio de Juanelo. *Los Veintiún Libros de los Ingenios y Máquinas*, manuscrito del s. XVI cuya edición ha sido llevada a cabo por la Fundación Juanelo Turriano y la Editorial Doce Calles, tiene un capítulo en el que se describen muchos tipos de molinos, pero hay que destacar el molino de regolfo, antecedente de las turbinas de presión, que se fabricaron doscientos años después. Es notable el capítulo dedicado a azudes y presas, tanto de madera como de piedra, en el que se dan normas prácticas sobre su construcción. Se describen y se dibujan avanzadas máquinas para la época; dragas, máquinas para hincar pilotes, grúas, etc. Suministra, también, útiles observaciones sobre diques y puertos.

ABSTRACT

The article describes the important works carried out during the reign of Philip II and which reveal great technological advancement such as the Tibi dam and the Juanelo Device. The *Veintiún Libros de los Ingenios y Maquinas* (The Twenty-one Books of Appliances and Machines) a 16th century manuscript which has been edited by the Fundación Juanelo Turriano and the Doce Calles Publishing House, contains a chapter which describes many types of mills, but in which it is necessary to underline the mill dam, the forerunner of the pressure turbines, which were built two hundred years later. The chapter dedicated to weirs and dams of both wood and stone is particularly interesting and gives practical standards for their construction. There are descriptions and drawings of machinery which is advanced for its time; such as dredges, pile driving machines, cranes, etc and there are also useful observations on docks and ports.

La publicación del facsímil y de la transcripción de “*Los Veintiún Libros de los Ingenios y Máquinas*”, en un principio atribuido erróneamente a Juanelo Turriano, llegó a tiempo para sumarse a las celebraciones con motivo de los 400 años de la muerte de Felipe II.

El reinado de Felipe II fue una época de progreso tecnológico y de importantes obras en España y su imperio de Ultramar. “*Los Veintiún Libros*” como los denominaremos en adelante abreviadamente, están plasmados en un manuscrito es-

crito durante el reinado de Felipe II, que se guarda en la Biblioteca Nacional.

La obra de ingeniería probablemente más importante del reinado de Felipe II fue la Presa de Tibi, en la provincia de Alicante, construida entre 1580 y 1594. Sus 42,70 metros de altura la hicieron la más alta del mundo durante casi trescientos años, con la excepción de la Presa de Puentes, de 50,15 metros de altura, construida en 1788 y hundida catorce años después.

Figura 1.

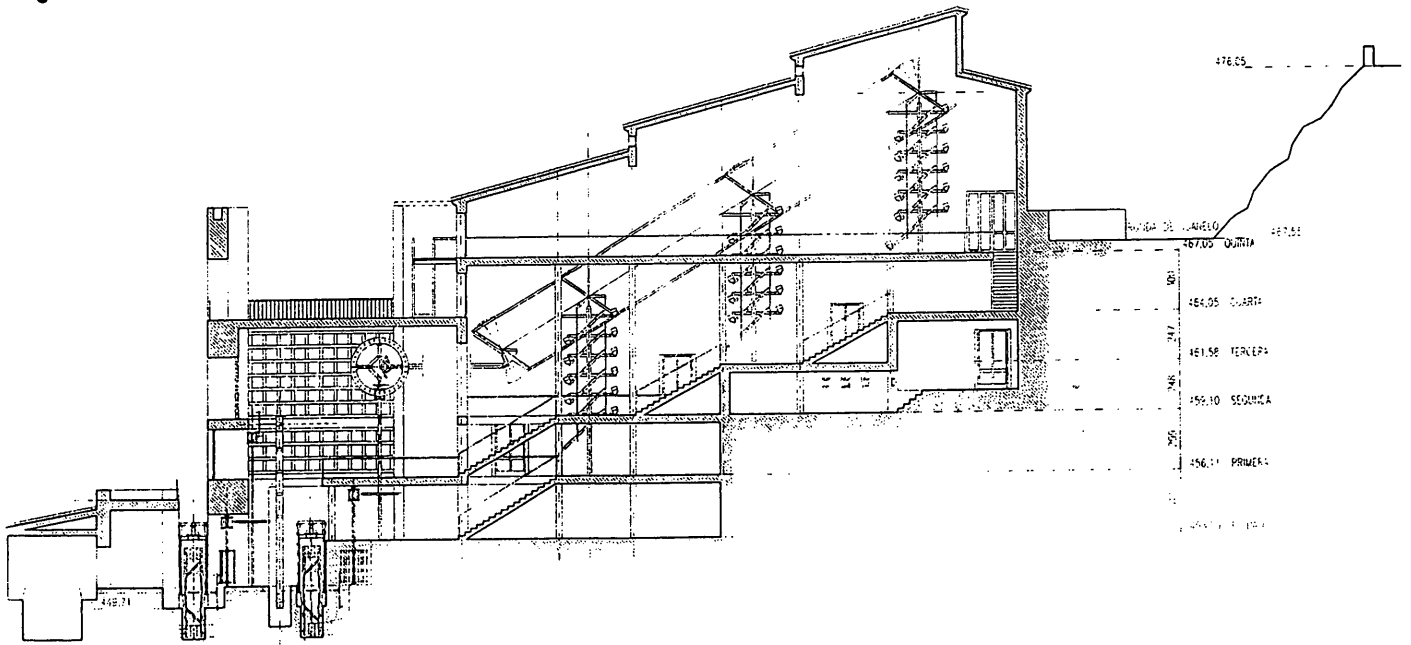
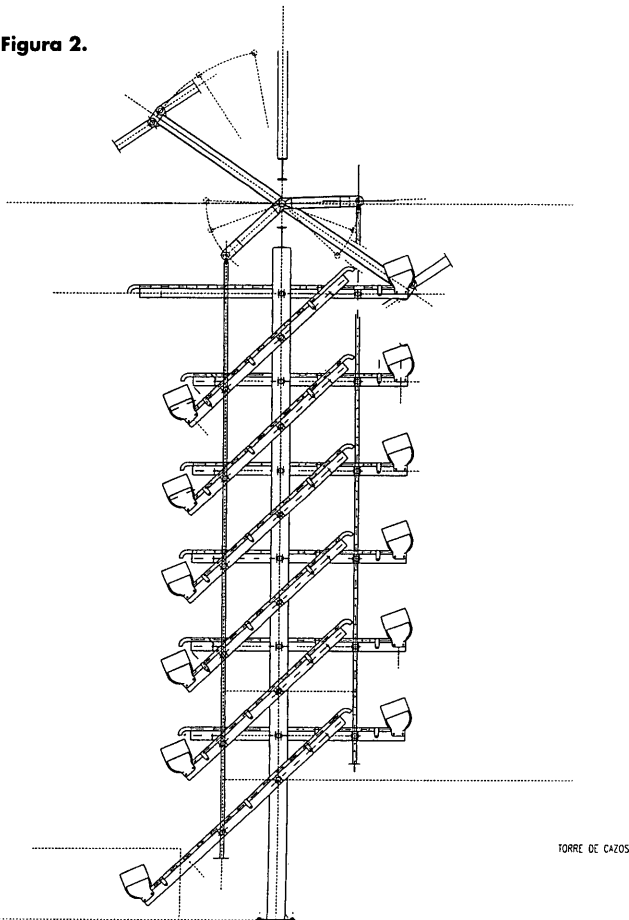


Figura 2.



En 1569 se inauguró el llamado Artificio o Ingenio de Juanelo Turriano en Toledo, a petición de Felipe II. El Ingenio elevaba 17.000 litros por día desde el río Tajo al Alcázar, situado 90 metros arriba. Posteriormente construyó un segundo artificio, semejante al anterior. El mecanismo motriz consistía en dos grandes ruedas hidráulicas accionadas por la corriente del río Tajo. Una de las ruedas movía una cadena de cangilones que extraía el agua del río y la vertía en un tanque. La segunda rueda accionaba una serie de torres provistas de unos largos caños terminados en un cucharón, que mediante un movimiento alternativo hacia arriba y hacia abajo, elevaban el agua, paso a paso, hasta el extremo superior de cada torre. Nada semejante se había hecho en el mundo anteriormente, puesto que la mayor elevación previamente realizada, era la de Augsburgo que era de 40 metros (Figs. 1 y 2).

Es digno de mención el magnífico Acueducto de Teruel, erigido por Pierre Bedel, que se corresponde con la figura de "Los Veintiún Libros", con diferencia de que sus arquerías superiores tienen el doble de la luz (Fig. 3).

Juan de Herrera, el principal arquitecto del Monasterio de El Escorial, después de la muerte de Juan Bautista de Toledo (probablemente asistido en su trabajo por Juanelo Turriano) creó, de acuerdo con los deseos de Felipe II, la Real Academia de Matemáticas. La institución tuvo un importante papel en el desarrollo de las matemáticas y de los estudios tecnológicos, como demuestra el ambicioso plan de estudios formulado por el mismo Juan de Herrera.

Es evidente que estaban ocurriendo cambios importantes en el campo de la tecnología, tanto en España como en Ultra-

mar, en tiempos de Felipe II, por eso no es sorprendente que en este ambiente se escribiera una obra tal como "*Los Veintiún Libros*". El código es un tratado completo sobre lo que en su tiempo se denominaba arquitectura hidráulica y en nuestros tiempos ingeniería hidráulica, aunque cubre casi por completo el campo de la ingeniería civil. Es el primer tratado conocido hasta la fecha sobre hidráulica, y se puede considerar como el primero de una larga lista de obras esenciales para el desarrollo de la ciencia y de la técnica, tales como la *Le diverse et artificiose machine* por Agostino Ramelli (Paris, 1588), *Reccueil d'Ouvrages Curieux* por Grollier de Servière (Paris, 1751), *A Century of the Names and Scantlings of such Inventions* by the marquis of Worcester (London, 1663), y la *Architecture Hydraulique* por Belidor (Paris, 1737).

La publicación de "*Los Veintiún Libros de los Ingenios y Máquinas*", atribuido en un principio a Juanelo Turriano, fue el proyecto más querido por José Antonio García-Diego, creador de la Fundación Juanelo Turriano, ya que estaba fascinado por este brillante relojero, ingeniero y humanista, y por otra parte, las obras hidráulicas fueron la pasión de su vida. García-Diego pensaba que para el conocimiento mundial de "*Los Veintiún Libros*" era necesaria su traducción al inglés, lo que ha realizado, recientemente, la Fundación Juanelo Turriano.

La autoría de la obra ha hecho correr mucha tinta. Académicos y estudiosos tales como el mismo García-Diego, Luis Cervera Vera, Ángel del Campo Francés, José Antonio Fernández Ordóñez y muchos otros, abandonaron la atribución de la obra a Juanelo Turriano. Ladislao Reti, el famoso investigador de la Historia de la Técnica que, siguiendo las indicaciones de Alexander G. Keller, descubrió el manuscrito en la Biblioteca Nacional, manifestó poco antes de morir que era de la misma opinión que los anteriormente citados. El estudio de la autoría y la fecha del manuscrito fue objeto de varios trabajos ordenados por García-Diego. Los usos lingüísticos y el profundo conocimiento de la región parecen apuntar a que el autor era originario de Aragón. Un estudio sobre los constructores aragoneses del período ha sido realizado por Severino Pallaruelos y Carlos Blázquez.

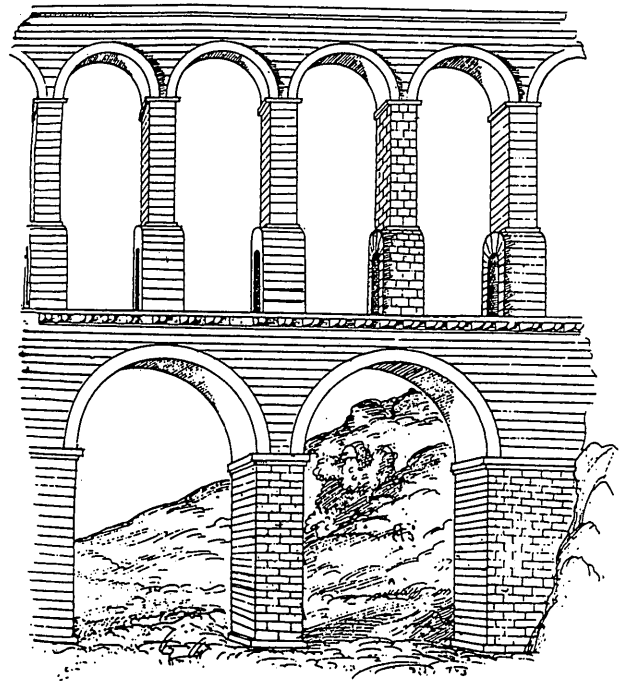
Por otra parte, Carmen Bernis ha estudiado los vestidos que aparecen en las ilustraciones, con objeto de determinar aproximadamente el período en que se escribió. Se ha realizado un estudio paleográfico por Isabel Ostolaza y otro morfológico, sintáctico y filológico por Juan Antonio Frago. Las marcas del papel del manuscrito han sido igualmente estudiadas por Carmen Hidalgo.

El libro IX está dedicado a azudes y presas, y es uno de los más importantes del código. García-Diego escribió un artículo haciendo comentarios sobre este libro que fue publicado por la revista *Technology and Culture* en 1976, del que reproduzco algunos de sus párrafos.

Respecto al proyecto de construcción de azudes, hay que saltar desde el código de "*Los Veintiún Libros*" hasta el siglo XIX.

Figura 3.

AGVADVCTO RVSTICO.



Se recomienda que la presa sea oblicua y no normal al curso del río. Ésta es una característica constante de los azudes rectos españoles, basándose en que al reducir la altura del caudal fluyente por encima de la presa, reducen las tensiones. El autor describe azudes diseñados primero para elevar el agua y luego derivarla (Fig.4). Estudia los azudes de madera y los de piedra y madera. En ambos casos, recomienda que su altura sea entre $1/6$ y $1/9$ de la anchura de la base. Los azudes se anclan al terreno mediante tablones de madera dotados de puntas metálicas afiladas.

Figura 4.

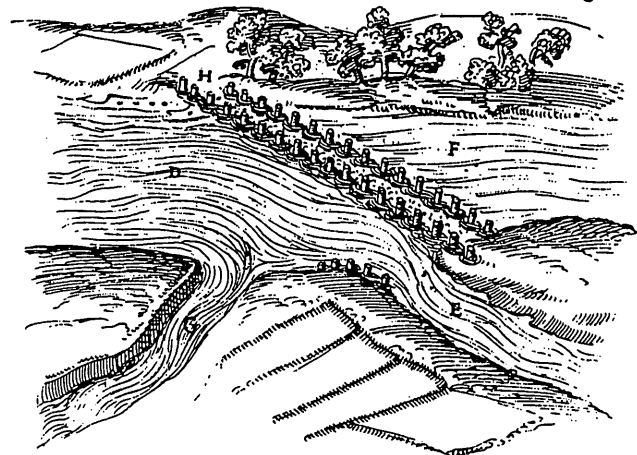


Figura 5.

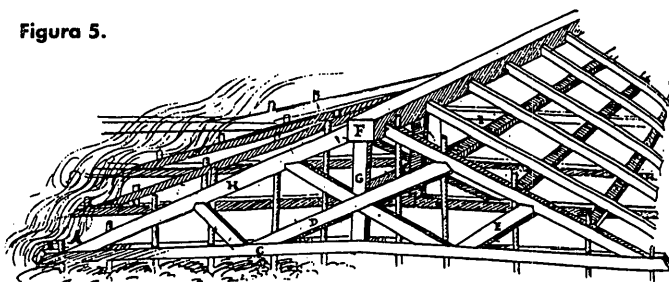
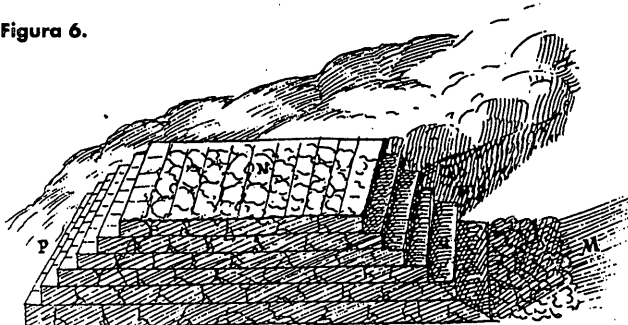


Figura 6.



El ejemplo más complejo de azudes de madera es el de la (Fig. 5). El azud se hace impermeable cubriendo ambas caras con paneles de madera.

Después describe azudes de piedra, comenzando con los tipos más sencillos; azudes con piedras colocadas en seco,

Figura 8.

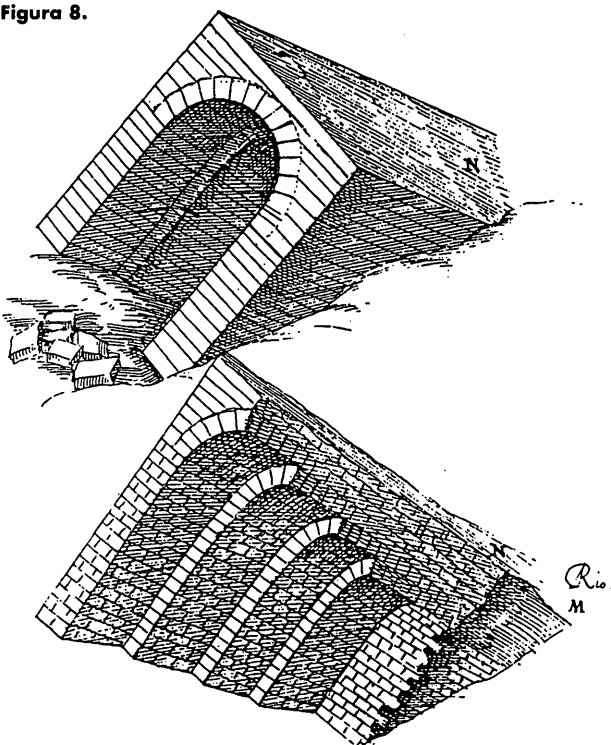
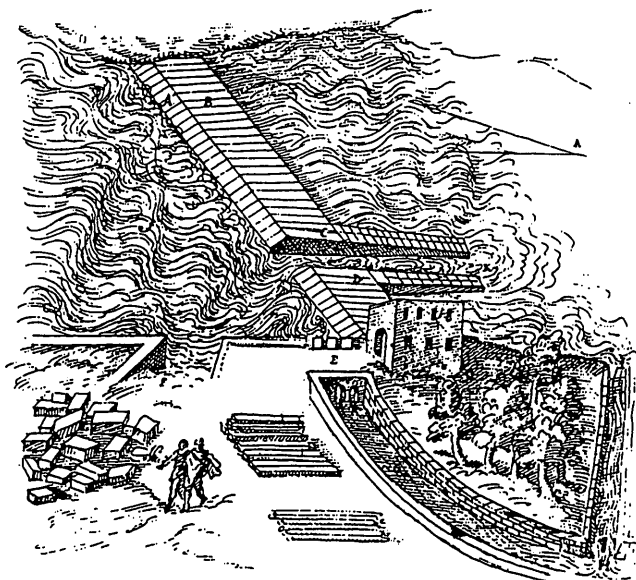


Figura 7.



que no utilizan un ligante para mantener juntas las piedras, lo cual fue común desde antiguo, como lo demuestra el acueducto de Segovia (Fig. 6).

En la (Fig. 7) se puede ver una pequeña presa de gravedad que reúne todas las características para el regadío o la producción de energía y un aliviadero, posiblemente para permitir el transporte de troncos.

El autor examina después azudes que forman un conjunto monolítico y les llama azudes de piedra o presas, siendo la primera vez que usa esta palabra. El autor no pretende haber inventado ninguno de estos tipos estructurales, sin embargo nos da la primera descripción de una presa de arcos múltiples y lo hace con un comprensible orgullo (Fig. 8).

Creemos haber demostrado que el código contiene saberes técnicos fundados, muy superiores no sólo a los de su contemporáneos, sino también a los de muchos que le sucedieron. Es obvio que el autor era un constructor, aunque se permitió de vez en cuando algún vuelo intelectual, pero en cada ejemplo se puede ver que vivió y que trabajó en los emplazamientos de las construcciones y que tuvo que resolver problemas prácticos.

El autor aparece preocupado con la seguridad de las presas que describe y aunque tiene en cuenta el coste del proyecto, lo que prevalece es la seguridad.

LOS LIBROS SOBRE MOLINOS

Se consideran como algunos de los más importantes de "Los Veintiún Libros". Después del famoso episodio de la lu-

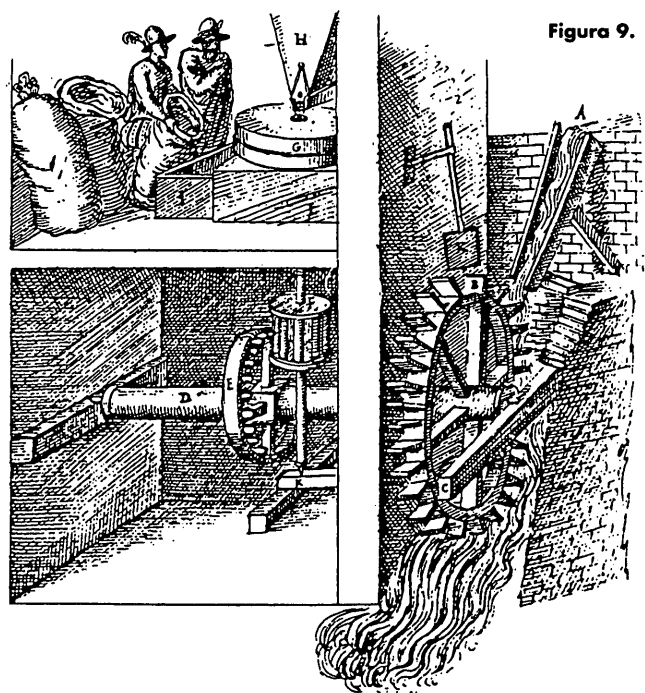


Figura 9.

Figura 11.

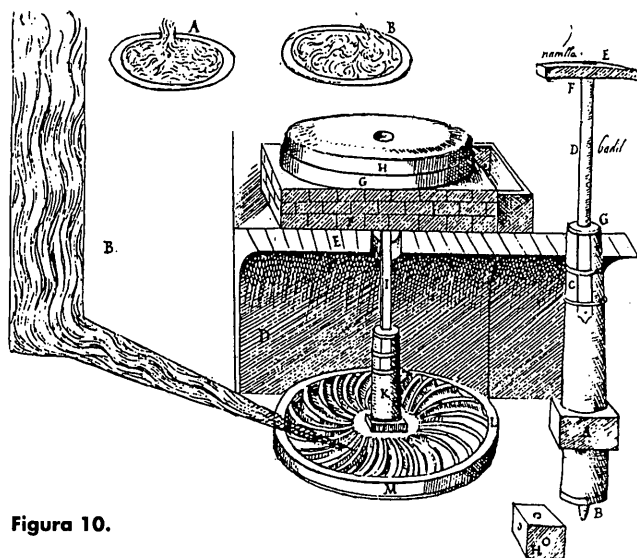
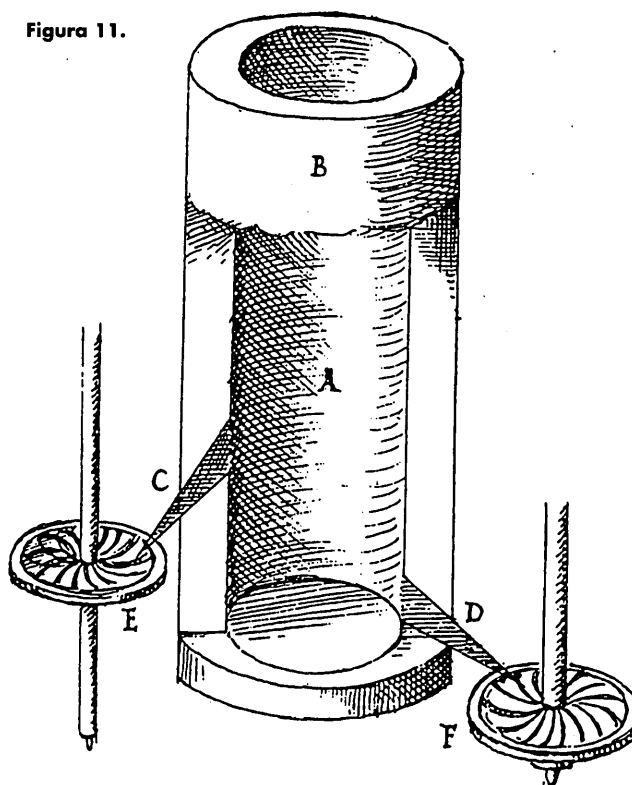


Figura 10.

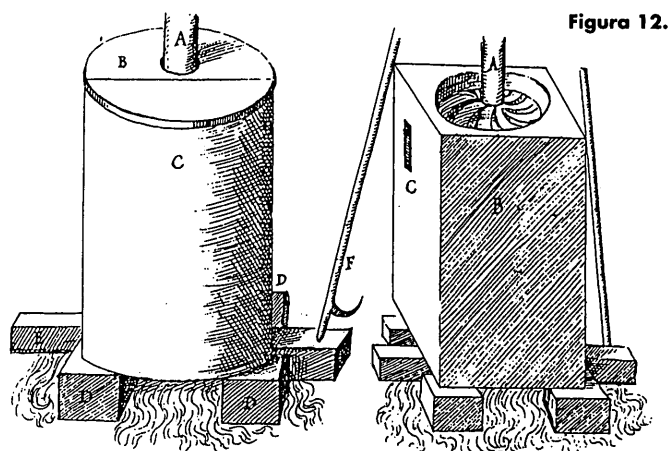


Figura 12.

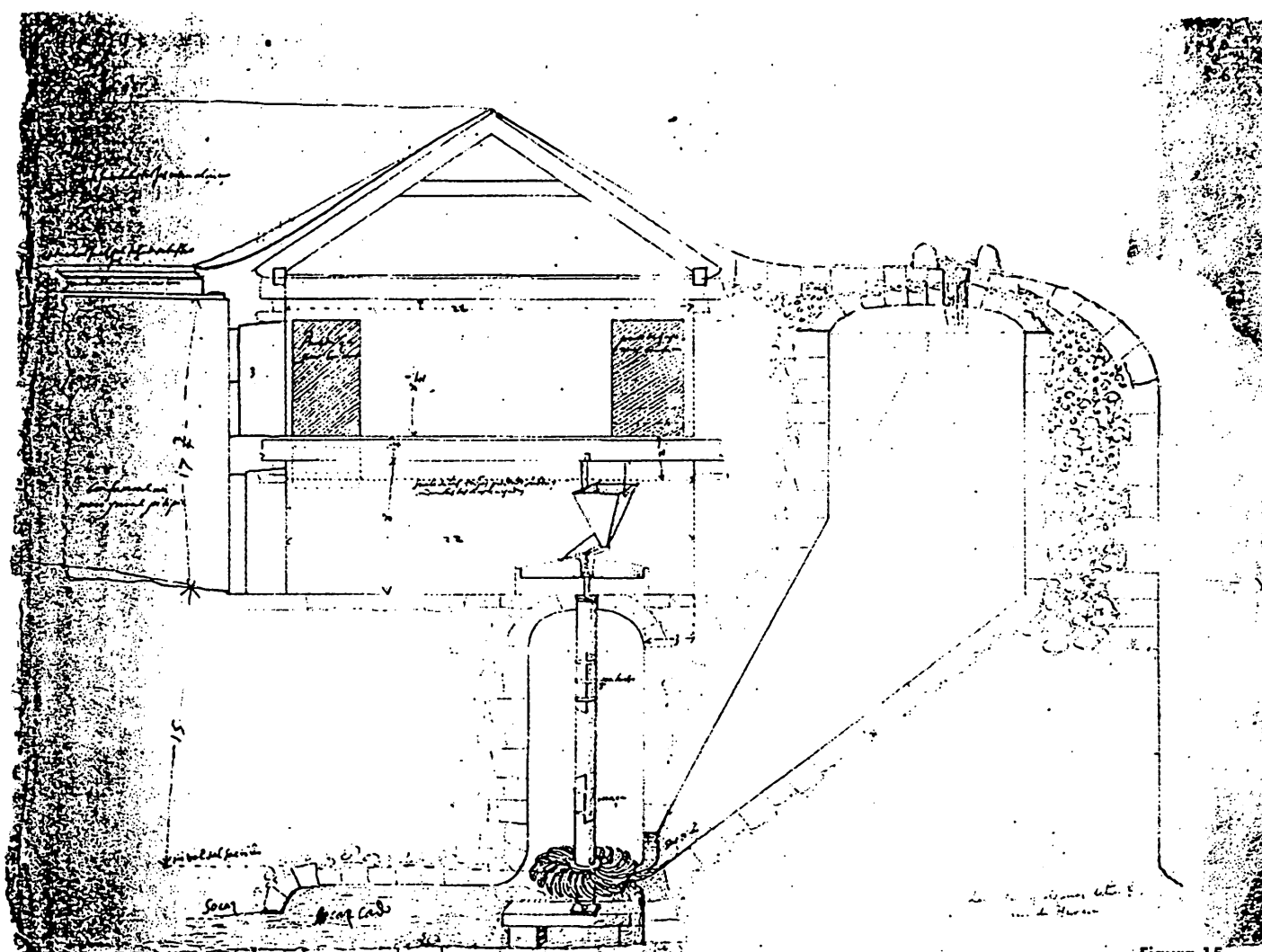
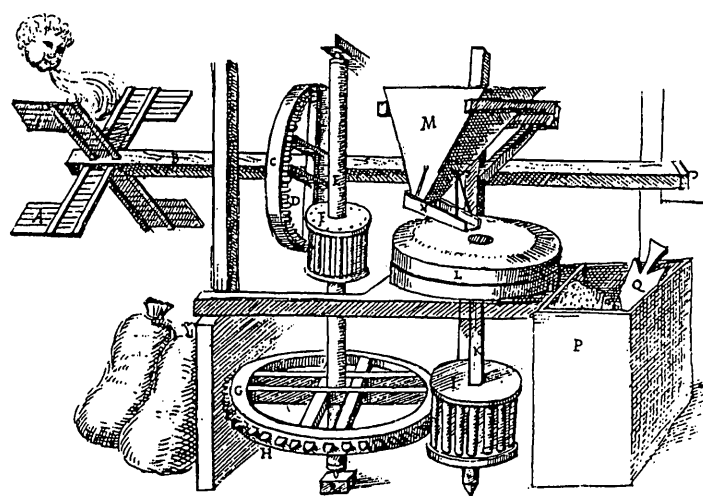
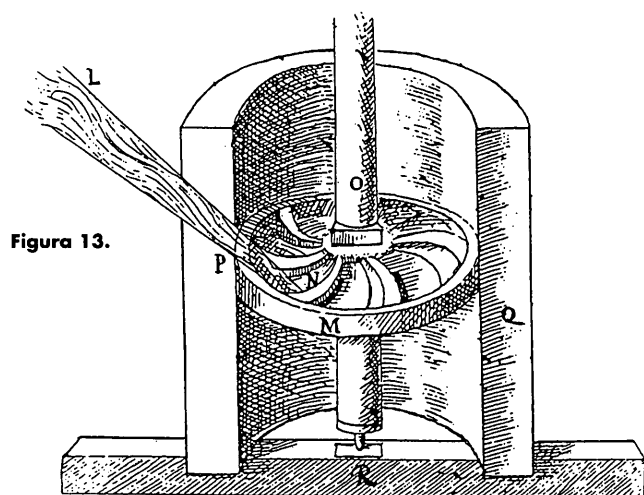
cha de Don Quijote contra los molinos de viento de La Mancha, se ha visto a España como una tierra de molinos.

"Los Veintiún Libros" demuestran la veracidad de este juicio. Los capítulos sobre molinos, según el profesor Alexander G. Keller, proporcionan la mejor descripción del diseño y construcción de molinos que ha llegado a nosotros antes del siglo XVIII.

De acuerdo con las palabras de Alexander G. Keller, los libros XI y XII son probablemente los más famosos, porque explican el diseño y construcción de molinos dando consejos prácticos y mostrando que no era un hombre solamente teórico, sino que era una persona que tenía una amplia experiencia.

Los molinos de agua se extendieron por Europa principalmente en el siglo XIV. El autor del código describe dos tipos básicos de molinos, los de rueda vertical y los de rueda horizontal.

Los molinos de rueda vertical (Fig. 9) son más adecuados para corrientes abundantes y pequeñas alturas de salto, lo que no es el caso de la mayoría de las regiones españolas, donde el agua es escasa. Voy a fijarme en dos tipos diseñados para conseguir el máximo rendimiento. El primero es el molino de cubo. El cubo es una estructura cónica terminando en una tobera de sección progresivamente decreciente.



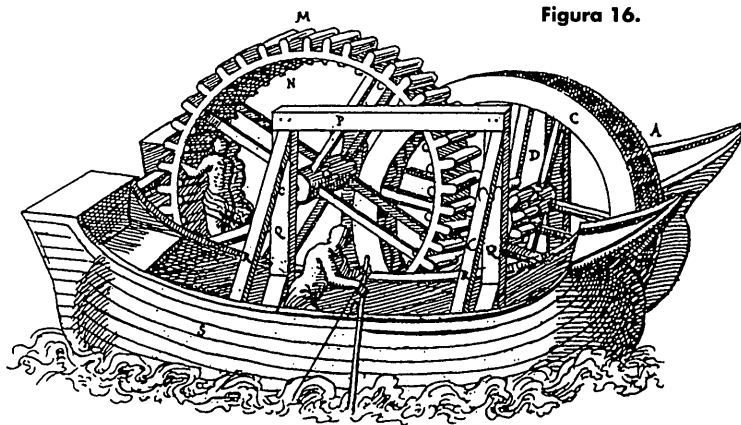


Figura 16.

Figura 17.

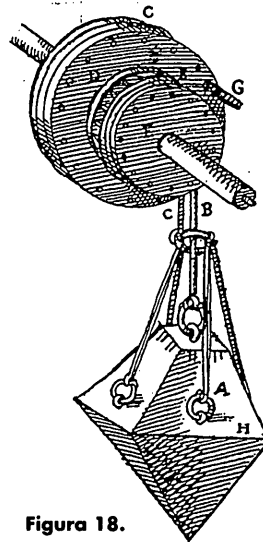
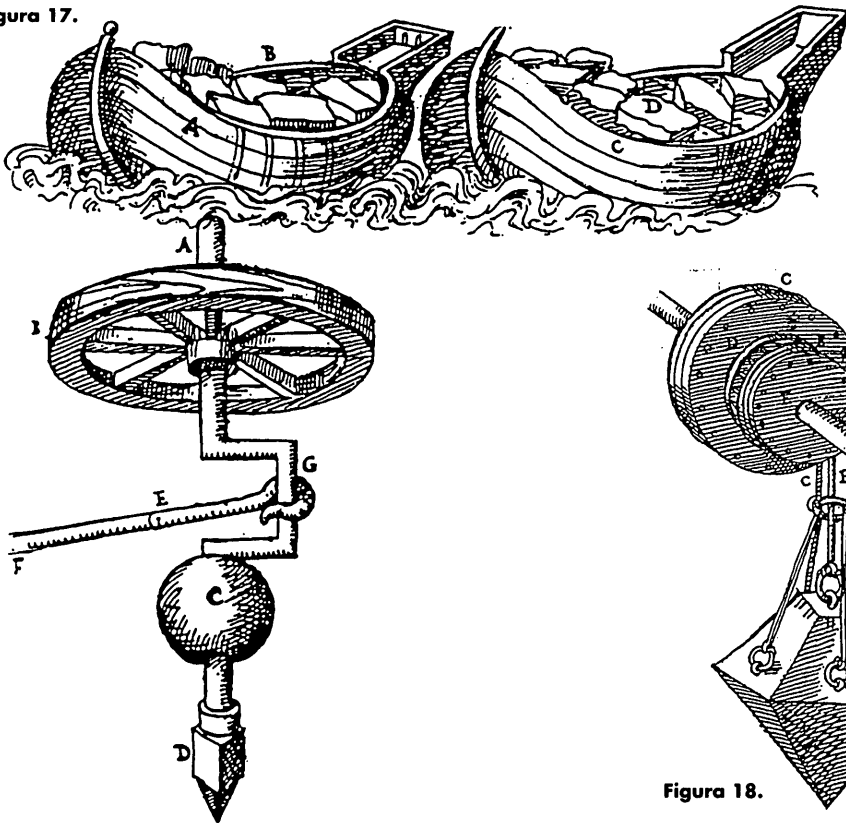


Figura 18.

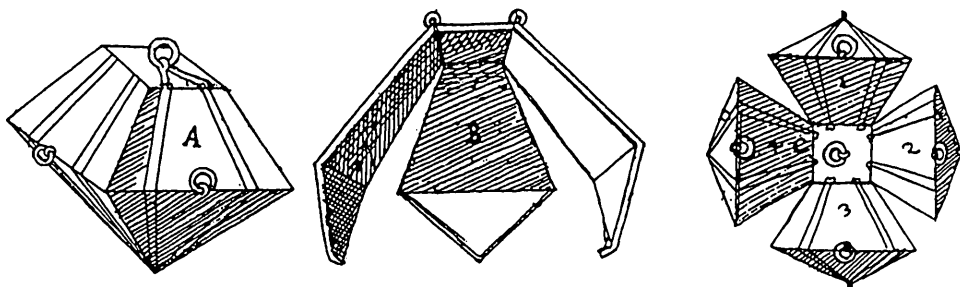


Figura 19.

Este molino economiza el agua mejor que los molinos horizontales del resto de Europa (Figs. 10 y 11).

Los molinos, usando una balsa y un cubo, muelen más que los accionados por una corriente inferior de agua circulante. El avance tecnológico más importante es el molino de regolfo, caracterizado porque la rueda está colocada dentro del cubo, de manera que el impulso no se debe solamente a la velocidad del chorro, tal como ocurre en los molinos de cubo, sino principalmente a la presión, como sucede en las turbinas del siglo XIX, de las cuales puede considerarse un claro antecesor (Figs. 12 y 13).

El capítulo contiene también reglas para el diseño de las ruedas, verticales u horizontales, la curvatura de los ejes, el ángulo de incidencia, cómo evitar el salpicamiento, la distancia del chorro, etc.

En la segunda sección hay una lista de 15 tipos diferentes de molinos, algunos de ellos no movidos por el agua, sino por el viento (Fig. 14), por animales de tiro o por hombres. En la misma fecha se construyó en El Escorial un molino de cubo para moler el grano, que accionaba dos piedras y cuyos planos se conservan (Fig. 15).

Existen otros manuscritos del siglo XVI que tratan de molinos. El principal de ellos es el de Francisco Lobato, que fue editado no hace muchos años por José Antonio García-Diego y Nicolás García Tapia. Este manuscrito contiene el dibujo de un molino de regolfo que se estaba construyendo en el río Adaja y cita otros en Valladolid y pueblos próximos.

En Aragón, los molinos de regolfo aparecieron durante el

Figura 20.

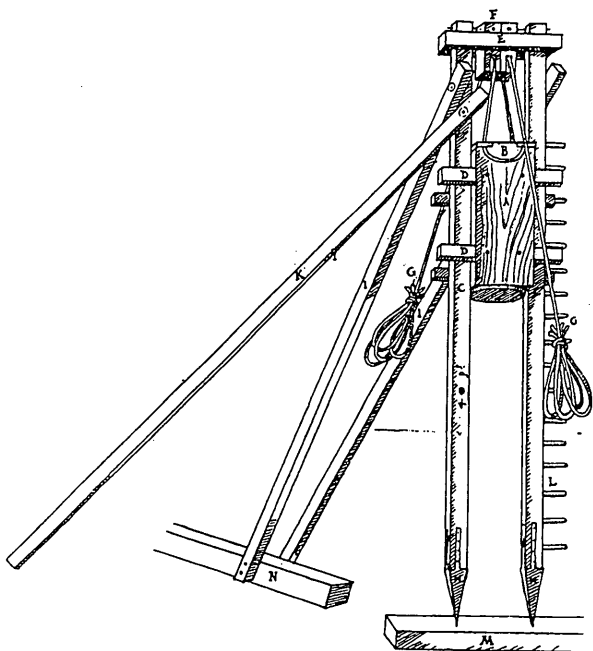


Figura 21.

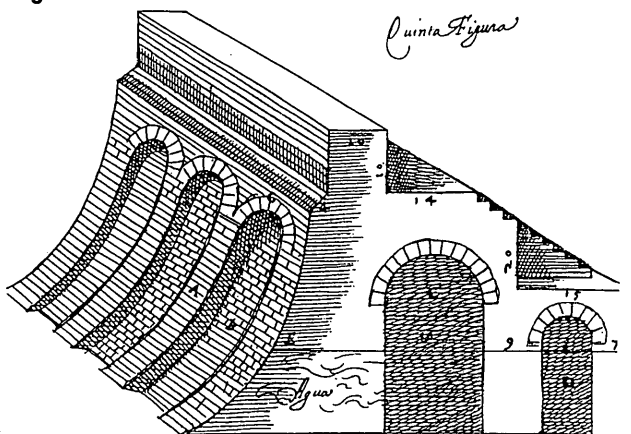
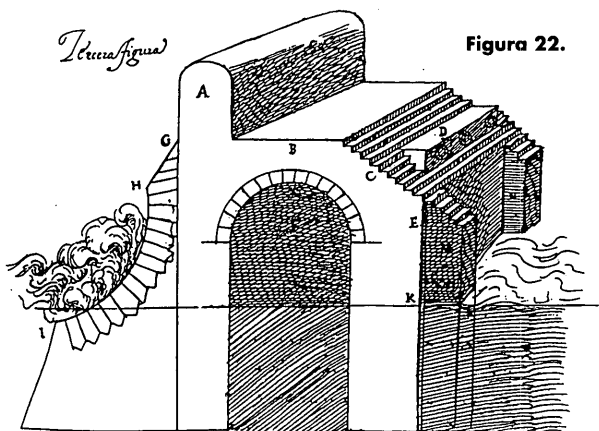
**Figura 22.**

Figura 23.

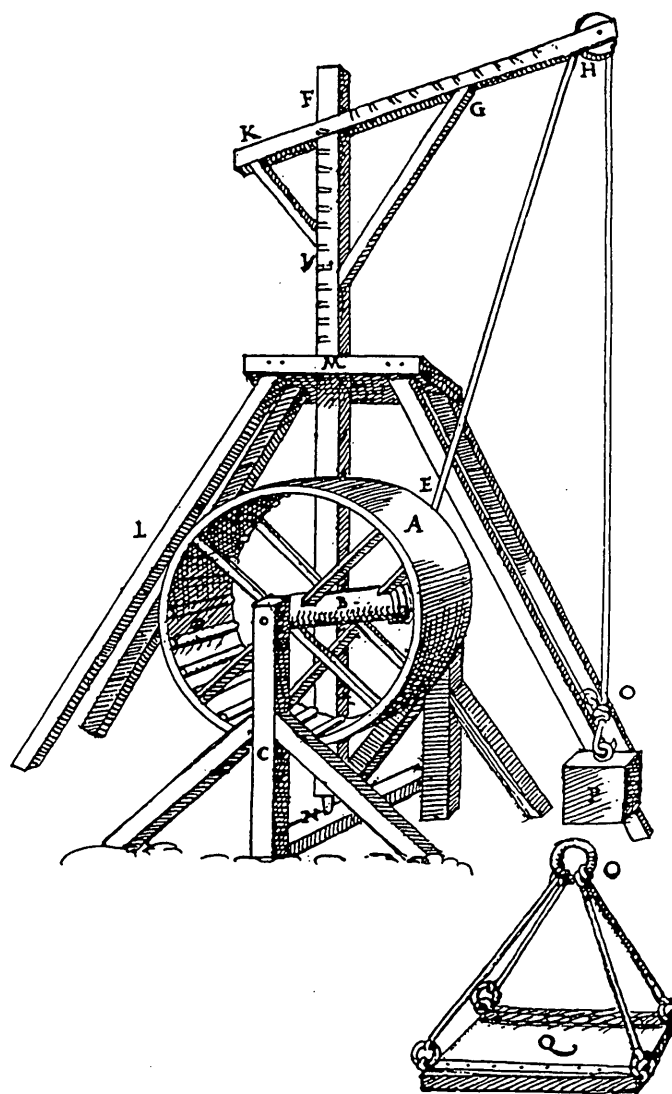
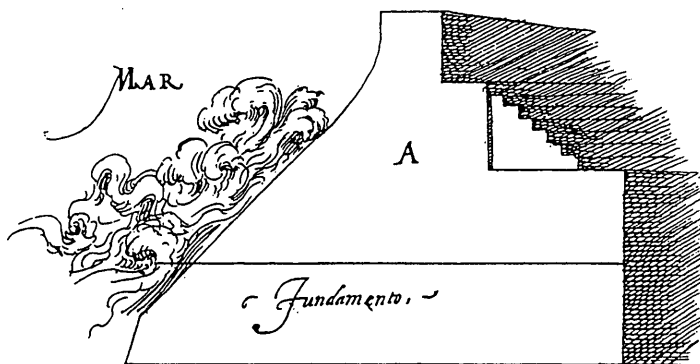


Figura 24.

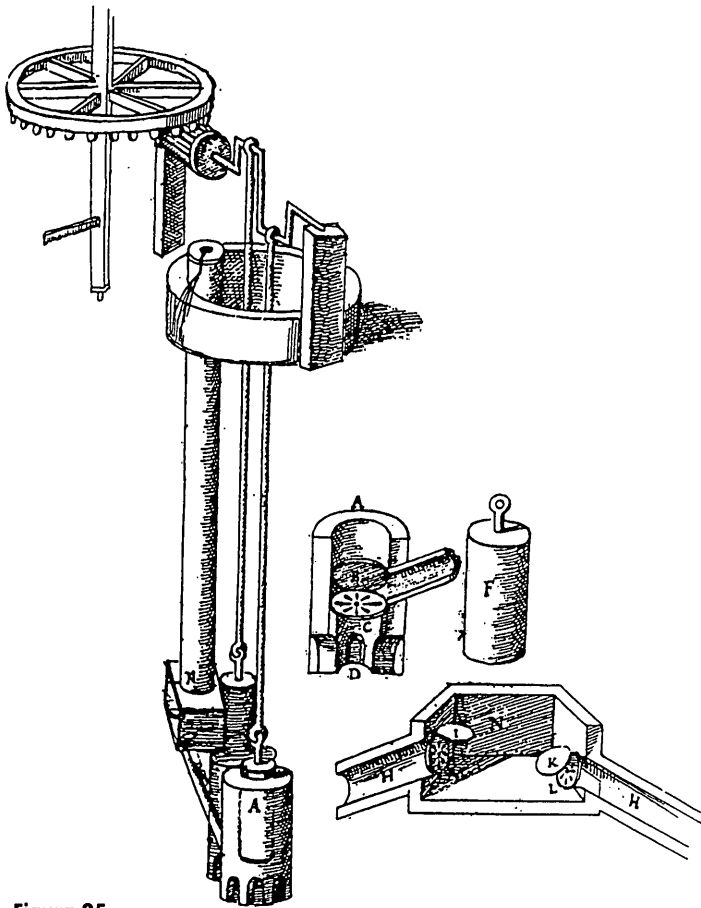


Figura 25.

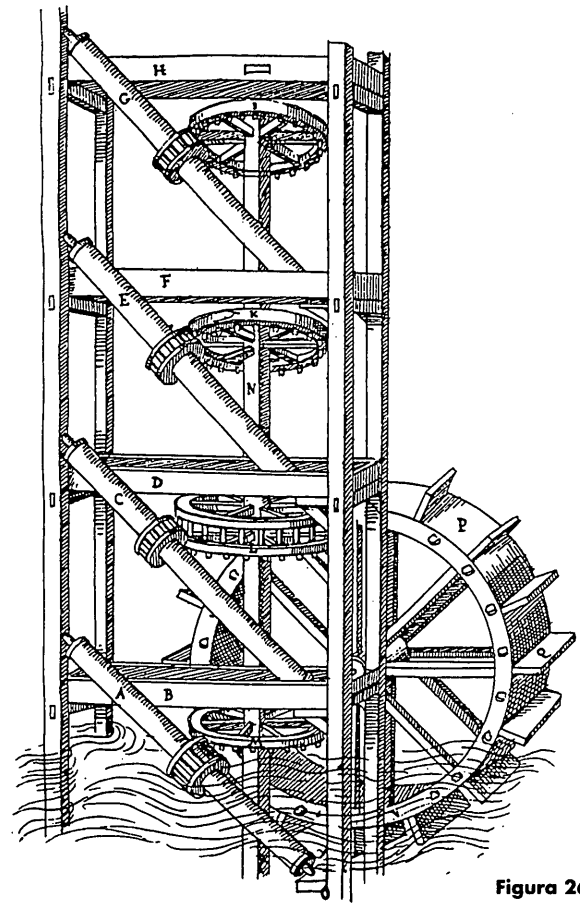


Figura 26.

Renacimiento, en Zaragoza, Daroca, Tauste, Huerto y Calatayud, pero han desaparecido.

A comienzos del siglo XVII los molinos de regolfo se extendieron a Murcia.

Los molinos del Puente de Córdoba se pueden fechar en el siglo XIV. También en Granada hubo molinos de regolfo.

En el río Ega (Álava) cerca del pueblo de Ancín, existió un molino de regolfo funcionando en 1988, llamado el molino de Albaigar. Hubo otros en Tolosa, Orio y San Sebastián, con ruedas de piedra.

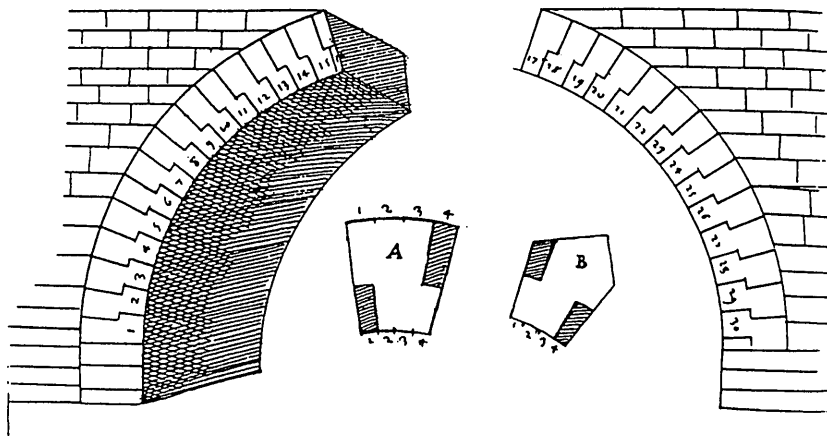


Figura 27.

DRAGAS, MÁQUINAS Y PUERTOS

Las agudas observaciones de "Los Veintiún Libros" sobre dragas, le hacen un adelantado de su tiempo. Describe tipos que no fueron desarrollados hasta dos siglos después, tales como la draga con descarga por el fondo, la cuchara bicable de almeja, la draga de barrido de fondo y el martillo pilón (Figs. 16, 17, 18, 19 y 20).

Sin embargo, aunque suministra útiles observaciones a partir del estudio del impacto de las olas sobre las construcciones, tales como la for-

ma más conveniente de los diques, parece desconocer las mareas. Teniendo en cuenta las considerables diferencias del nivel del mar entre la marea baja y la alta, la única explicación racional era que el autor era un hombre de Italia o del Mediterráneo Oriental (Figs. 21, 22 y 23).

El enigma permanecía y la polémica prosiguió llegando a nuevas hipótesis sobre la autoría. García-Diego creía que el autor era uno solo, aunque no compartía la opinión que atribuía la obra al famoso arquitecto-ingeniero Lastanosa. Sin embargo, la diferencia en el estilo de un libro a otro abre la posibilidad de varios autores.

También son interesantes las grúas descritas en el manuscrito (Fig. 24) similares a las utilizadas por Juan de Herrera en el Monasterio de El Escorial, y dos sistemas para elevar agua, uno basado en bomba de pistón (bomba de Ctsebius) y otro en el tornillo de Arquímedes (Figs. 25 y 26).

Algunas de sus ideas son evidentemente absurdas, como el puente abierto en clave para permitir el paso de los buques (Fig. 27).

Hasta la fecha el análisis del manuscrito revela que es copia de otro anterior, que podía haber sido escrito entre 1564 y 1575. La copia de que disponemos puede fecharse entre 1585 y 1605; por eso puede afirmarse que *"Los Veintiún Libros"* fueron escritos en tiempos de Felipe II, lo cual hace su publicación reciente, tan relevante.

Me hace muy feliz ver los deseos de José Antonio García-Diego materializados.

OTROS TRATADOS

Además de *"Los Veintiún Libros"* y del manuscrito de Francisco Lobato, existen otros, como el de Arquitectura y Máquinas de Juan de Herrera que se guarda en el Archivo General de Simancas. Su título no corresponde a su contenido, porque está casi limitado a describir los principios de las grúas utilizadas tan ampliamente en la construcción de El Escorial. Según García Tapia puede estar fechado entre 1567 y 1577.

En la biblioteca de Juan de Herrera existían otros manuscritos importantes como el de Geronymo Giraba, pero, desgraciadamente, ha desaparecido como tantas otras obras. Fernán Pérez de la Oliva es el autor de dos libros editados por Ambrosio de Morales, *"Diálogo de la dignidad del Hombre"* y *"Razonamiento sobre la navegación del río Guadalquivir"*, proponiendo, este último, soluciones ingenieriles para hacer posible la navegación del Guadalquivir hasta Córdoba.

José Antonio García-Diego y Alexander G. Keller han publicado un código de Francisco Sitoni, un ingeniero italiano que trabajó para Felipe II, cuyo título es: *"Trattato delle virtù et proprietà dell'acqua"*. Sitoni proyectó un canal de riego en Colmenar, cerca de Aranjuez y colaboró en el Canal Imperial de Aragón.

Se podría citar otros muchos, entre ellos el libro de instrumentos nuevos de Andrés García Céspedes principalmente sobre hidráulica y los muy importantes libros sobre artillería y fortalezas, el principal de los cuales es el de Cristóbal de Rojas: *"Teoría y práctica de fortificación"*. ■