

Las herramientas de Ingeniería Asistida aplicadas a la Historia de las Máquinas y Mecanismos. Recuperación virtual de un Molino Hidráulico

R. López-García⁽¹⁾, R. Dorado-Vicente⁽¹⁾, J. Vasco-Olmo⁽¹⁾, E. López-Alba⁽¹⁾

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica y Minera. Universidad del Jaén
rlgarcia@ujaen.es

La aplicación de las modernas herramientas de Diseño e Ingeniería Asistida por Ordenador, en el estudio de la Historia de las Máquinas y Mecanismos, para su recuperación y análisis, permite no solo el modelado y reconstrucción gráfica para su simulación y recuperación virtual, sino que puede servir de partida para su análisis tecnológico mediante los módulos de diseño mecánico que incorpora.

De esta manera se puede hacer una aproximación a los parámetros de diseño empleados y a los medios y técnicas de fabricación de que disponían sus artesanos y maestros “ingenieros”.

El presente artículo muestra un recorrido histórico-gráfico por los ingenios hidráulicos desarrollados desde la época romana hasta mediados del siglo XX que transformaban la energía del agua en energía mecánica útil para accionar las piedras de moler de los antiguos molinos harineros de accionamiento hidráulico.

A continuación, se realiza la reconstrucción gráfica y animación por ordenador de un caso concreto, utilizando herramientas de diseño e ingeniería asistida, que ayuden al análisis funcional, hidráulico, resistente y cinemático del ingenio y nos permitan obtener, parámetros de diseño y funcionamiento, tipologías, técnicas empleadas, medios y materiales utilizados y planos de detalle y del conjunto, de un típico molino hidráulico harinero del sur de España que estuvo funcionando hasta mediados del siglo XX, cuando las fábricas de harina multiplicaron la productividad de aquellos y los dejaron obsoletos.

1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento del agua como fuente energía ha exigido diseñar innumerables ingenios, que transformen dicha energía en energía mecánica útil para accionar los diferentes artefactos que posibilitaban un sin fin de tareas cotidianas, como son la molturación del cereal para la obtención de la harina (molino harinero), el encurtido de paños (batán), la forja del hierro (ferrerías), la acuñación de la monedas, la fabricación de la pólvora, del papel, del aceite (almazaras), la molturación de la caña de azúcar (trapiches), o los molinos de pimentón o minerales.

Desde el punto de vista de la alimentación humana, los molinos hidráulicos harineros alcanzaron una gran importancia para el desarrollo socioeconómico de las comarcas donde estaban enclavados, por lo que han tenido gran desarrollo desde la época romana hasta mediados del siglo XX en que fueron abandonados.

El desarrollo de nuevos ingenios hidráulicos sufrió un incremento notable desde la Edad Media, apareciendo numerosos textos con diferentes aportaciones técnicas, y estando en la mayoría de los casos presente la rueda hidráulica. Sin embargo, su estudio tecnológico detallado implica conocer de primera mano, disciplinas como la hidráulica, la mecánica y la cinemática de máquinas.

2. CLASIFICACION DE LOS MOLINOS HARINEROS HIDRÁULICOS

Sobre las diferentes tipologías de molinos harineros hidráulicos existe una clasificación muy bien realizada [1].

2.1. Molinos de rueda vertical

- **Aceñas harineras (rueda vitruviana de paletas).** De rueda vertical de grandes dimensiones situados en la ribera de ríos caudalosos, con azudes (presas) para asegurar siempre un caudal importante de agua que mueva las ruedas vitruvianas de paletas.

Tenían una producción mayor que los molinos de rodezno (rueda horizontal), ya que disponían de piedras de moler de entre 1.40 y 2.00 m. de diámetro, con una capacidad de molienda de hasta 200 Kg/h de cereal. La rueda motriz [2], oscilaba entre 3.36 y 5.04 m. de diámetro y las aspas entre 0.70 y 0.84 m. de anchura y entre 2.80 y 3.36 m. de altura.

En cuanto al engranaje de linterna, que transmite el movimiento del eje horizontal de la rueda al eje vertical del molino, tenía una relación de transmisión de 1:3 a 1:4, velocidad suficiente para obtener una molturación fina y homogénea.

- **De rueda gravitatoria (rueda con cangilones).** Estos molinos se encuentran en lugares donde escasea el agua. Leonardo Da Vinci [3] dibujó una de estas ruedas motrices con 8 cangilones (figura 1a), cuando estudiaba el rendimiento de las mismas o anteriormente Mariano Taccola [4] (figura 1b).



Figura 1a. Mejora de rueda hidráulica gravitatoria [3]. Figura 1b. Rueda hidráulica gravitatoria [4]

Sin embargo, su utilización fue escasa, debido a las bajas velocidades de giro, lo que obligaba a multiplicar la relación de transmisión mediante un par de engranajes y conseguir una velocidad de giro en la piedra de moler adecuada.

- **Molinos flotantes.** Son una variedad de las aceñas harineras, pues se trata de molinos sobre barcasas con una anchura mayor y poco sumergidas en el agua (figura 2).

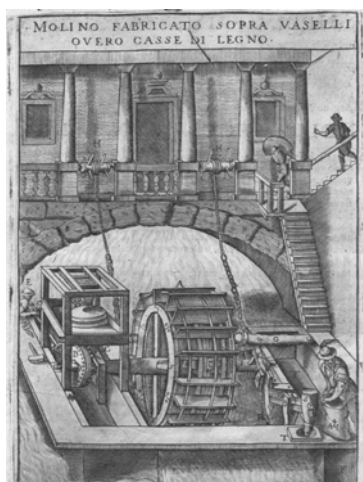


Figura 2. Molino flotante [5].



Figura 3. Molino de rodezno [6]

2.2. Molinos de rueda horizontal (de rodezno)

Son molinos de eje vertical unido a la piedra moledera y que por tanto, no necesitaban en su primer desarrollo ningún engranaje, aunque posteriormente se incorporaron los mismos como mejora en su funcionamiento (figura 3).

- **De canal.** Es el más primitivo. En ellos un canal (caz) se solía ensanchar a modo de embalse y desde su fondo unas tomas incidían en los rodeznos alojados en los cárcavos. En general, el desnivel (salto de agua) de estos molinos era muy pequeño, por lo que consumían mucha agua, con una muela de diámetro menor y por tanto, con menor capacidad de molienda. En el rendimiento de los mismos influyen muchos factores, tales como el caudal y el ángulo de incidencia del agua, o el diseño de los álabes del rodezno. Este factor geométrico es clave, como muestran los dibujos de Ramelli [7] (figura 4).

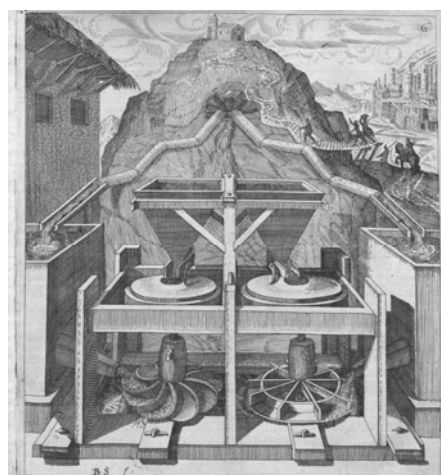
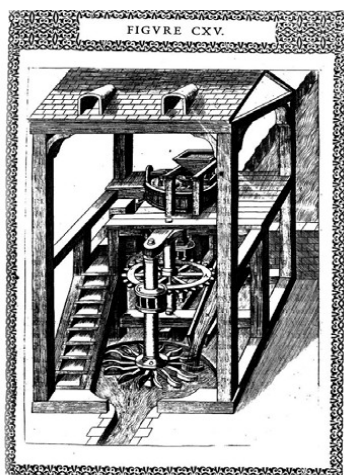


Figura 4. Molino de rodezno de canal [7]. Figura 5. Molino de rodezno de cubo [8]

- **De cubo.** Su particularidad es el cubo de presión (columna de gran altura de agua) que sirve para ganar energía potencial que se transforma en energía cinética en el chorro que incide sobre el rodezno, lo que permite utilizar menores caudales de agua para lograr la misma potencia (figura 5).

- **De regolfo.** Se trata de molinos, en los que el rodezno trabaja a presión dentro de una cámara, aprovechando la energía cinética y de presión del agua.

- **De mareas.** Son molinos que aprovechan el flujo y reflujo de las aguas del mar.

Ya a finales del siglo XIX, existía en España una tipología bien definida de las instalaciones molineras tradicionales, de las que se pasó a las fábricas de harina de producción industrial, como ya se indicaba en tratados de la época [9].

3. MOLINOS HIDRAULICOS DE CUBO

En el Sureste de la Península Ibérica, con una orografía montañosa nacen muchos arroyos con caudales escasos e irregulares, junto a cuyos cauces, se ha desarrollando a lo largo de los tiempos una industria hidráulica generalmente de tipo familiar dedicada a la molienda de trigo para la obtención de harina. La mayoría de ellos de rueda horizontal y cubo de presión, cuyas características específicas se analizan y estudian a continuación.

3.1. Arquitectura de la Construcción

Normalmente una típica instalación molinera presenta cuatro alturas por la fachada principal: la planta semienterrada con los cárcavos que albergan los rodeznos, la planta baja con las piedras de moler y tolvas de trigo, la planta primera con la lavadora de trigo y tolvas, y la planta segunda con la limpia, el torno y equipos auxiliares. Así, se aprovecha el desnivel para llegar con el agua hasta el cubo a la altura de la primera planta, lo que le permite tener el cubo dentro de la propia edificación (figura 6).

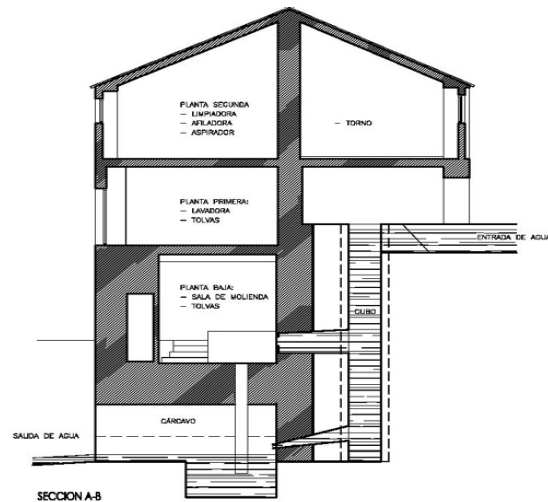


Figura 6. Molino de cubo. Caz en Fachada posterior y Sección constructiva [10]

3.2. Infraestructura hidráulica

El agua se desvía desde el río a través de una acequia o caz, que se ensancha formando una alberca y de la que sale el agua que tras pasar al cubo de presión, incide en los álabes del rodezno transmitiéndole su energía, saliendo por los cárcavos y volviendo al río. Normalmente, existían dos piedras de moler, accionadas por el mismo cubo.

Desde el cubo mediante una tobera o saetillo, se dejaba incidir sobre los álabes del rodezno para girar el ingenio molinero y con él, las piedras de moler. Debido al pequeño rendimiento, los rodeznos se fueron sustituyendo por turbinas radiales, con un mayor rendimiento.

3.3. Proceso de molienda

El flujo de material se observa en la figura 7. El trigo es descargado en la tolva de recepción de trigo. Desde allí, un elevador de cangilones de trigo lo traslada a la máquina limpia, donde se eliminan las impurezas como las piedras, ramas, hojas y broza.

Una vez limpio, el trigo se conduce a la lavadora, donde se remoja en un tornillo sin fin, cayendo a la tolva de trigo limpio, reposando allí durante unas horas para que el grano de trigo adquiera humedad adecuadamente. Posteriormente el trigo se eleva mediante otro elevador de cangilones a la tolva de espera para la molienda.

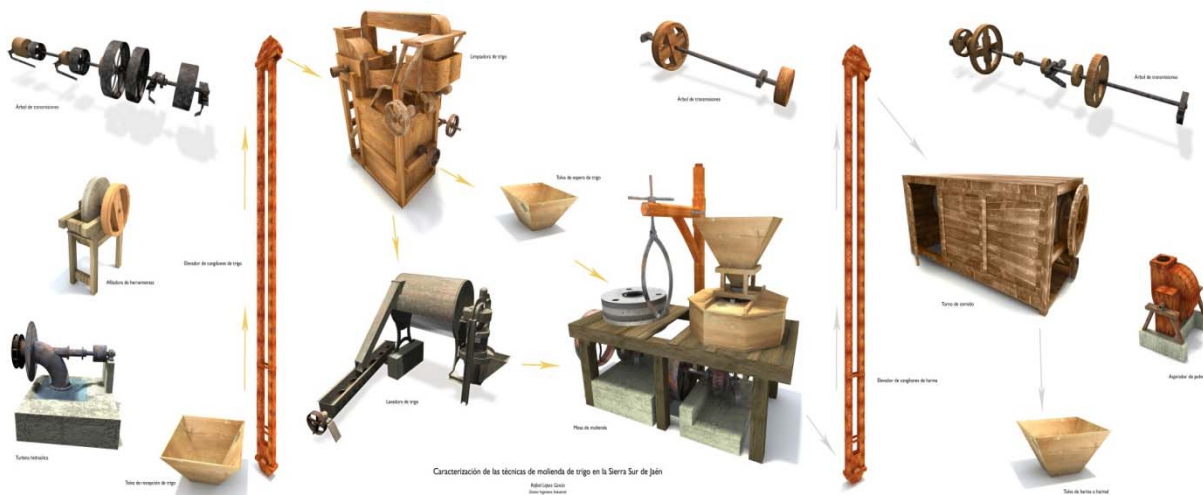


Figura. 7. Esquema de flujo de material [10].

Para la molienda, el trigo se deja caer por el hueco de la piedra móvil ó volandera, produciéndose su molienda por el movimiento relativo de dicha piedra volandera contra la piedra fija ó solera. Ya en forma de harina, se eleva mediante un elevador de cangilones hasta el torno para cernerla. Allí se separa la flor de harina, del salvado y posteriormente, se deja caer a un recipiente de madera ó harinal, desde donde se recoge en sacos.

En el proceso de la molienda la distancia de separación entre las piedras condicionaba la finura de la molienda, así como el picado de las piedras. Sobre las piedras de moler se ha dado información [11], que relaciona diámetro y peso, con velocidad de giro y cantidad de trigo molido. Los diámetros oscilaban entre 1 y 2.3 m, con pesos entre 668 y 3521 Kg, velocidad de giro entre 114 y 40 rpm, y una capacidad de molienda entre 78 y 416 Kg/h.

El análisis de las transmisiones mecánicas entre ejes de transmisión y máquinas mediante la cinemática de máquinas, será necesario para conocer los datos de velocidades y poder realizar una animación por ordenador, que sea fiel reflejo de la realidad.

4. RECONSTRUCCIÓN GRÁFICA

La importancia de la reconstrucción gráfica de antiguos ingenios hidráulicos, se ha puesto de manifiesto por diferentes autores [12]. Dicha reconstrucción comienza con el modelado 3D de cada uno de los elementos de la instalación molinera. En este artículo, se presenta detallado como ejemplo el proceso de modelado de la turbina. Posteriormente a dicho modelo, se le aplicarán texturas, iluminación, sombras y finalmente movimiento a sus partes móviles, obteniendo una animación que facilita una visita virtual al ingenio.

4.1. Modelado 3D

El modelado de las máquinas se realiza generalmente a partir de elementos simples y mediante herramientas del software SolidWorks empleado, se convierten en modelados sólidos. Estos elementos simples, son los obtenidos por medición en la toma de datos del trabajo de campo ayudados por el reportaje fotográfico (figura 8),



Figura 8. Vista exterior de la turbina, y eje y tubo de aspiración desde el interior.

El modelo de la pieza, puede usarse para distintos fines como, el análisis por Elementos Finitos, el prototipado rápido o la obtención de imágenes fotorrealísticas y animaciones.

El modelado del conjunto de la turbina se realizó tras el croquis realizado en la fase de trabajo de campo, procediendo a modelar cada uno de sus elementos (figura 9).

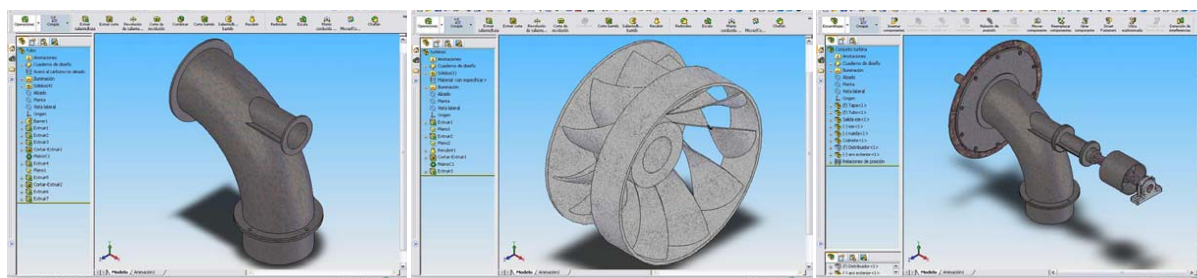


Figura 9a. Tubo de salida del agua.

Figura 9b. Álabes.

Figura 9c. Elementos exteriores

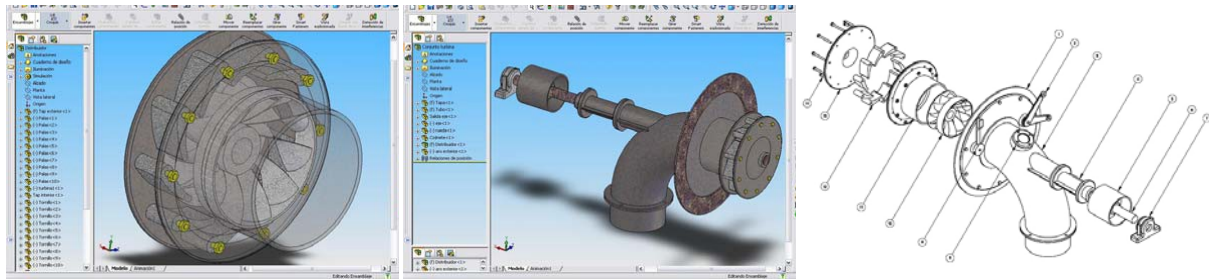


Figura 9d. Elementos interiores. Figura 9e. Conjunto de la turbina. Figura 9f. Perspectiva estallada

Finalmente, se realiza el montaje de todos los elementos de la turbina, estableciendo las relaciones de posición entre elementos. El plano final se obtiene a partir del modelo, y muestra una perspectiva explosionada del conjunto turbina.

4.2. Ensamblaje del conjunto molinero

Todas las máquinas y sus elementos de transmisión están relacionados entre sí, y a su vez este conjunto ingenieril se relaciona con el conjunto arquitectónico mediante relaciones de posición. Se inicia el ensamblaje a partir del modelo de la construcción, introduciéndose las máquinas y sus transmisiones (figura 10), y tomando para ello las medidas de su posición respecto a paredes, esquinas o cualquier referencia y especialmente las referencias fijas para las tres plantas como son los elevadores de cangilones de trigo y harina.

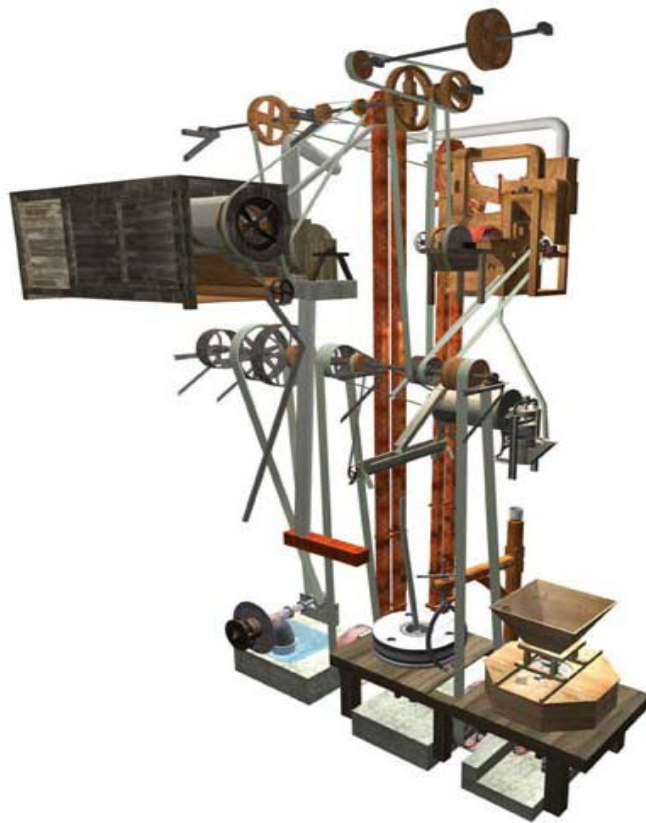


Figura 10. Ensamblaje del conjunto molinero

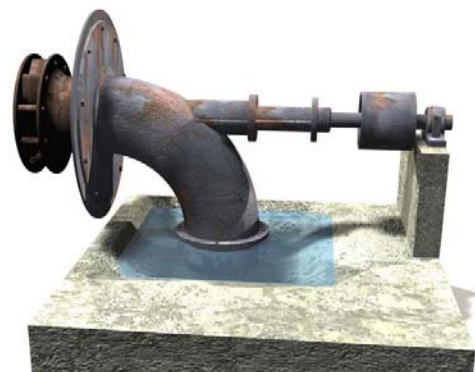


Figura 11. Imagen de síntesis de la turbina.

4.3. Animación por ordenador

Para obtener la animación se utilizó el software Autodesk 3ds Max y para la correcta importación del ensamblaje se exportaron las piezas en formato de estereolitografía (*.stl), conservando todas las relaciones de posición.

- **Aplicación de texturas**

Las texturas aplicadas al modelo provienen directamente del reportaje fotográfico y son tratadas para adaptar las características ópticas a las necesidades del modelo, ajustando parámetros como el brillo, la intensidad y la iluminación.

- **Iluminación y sombras**

Con la iluminación y las sombras, se consigue un aspecto real de las máquinas (figura 11). La iluminación natural exterior se consigue mediante la colocación de un foco de luz solar. Para la iluminación interior, se han colocado puntos de luz a modo de lámparas colgadas del techo que generan las sombras que dan el grado de realismo de la imagen de síntesis.

- **Animación y video**

Previo a la animación, con el análisis cinemático de los ejes y poleas se calcularon las velocidades de giro de ellos y las transmitidas a las máquinas mediante correas.

Finalmente, se pueden realizar diferentes videos: en uno se recrea un acercamiento exterior al molino, y a continuación un paseo virtual por las dependencias interiores del molino recreando las escenas en pleno funcionamiento, y otro con las máquinas y transmisiones pero aisladas de la arquitectura para visualizar claramente el funcionamiento del ingenio.



Figura 12. Modelo infográfico de la construcción.



Figura 13. Escena de la planta baja.

Del resultado del trabajo de texturizado, ensamblaje del conjunto e iluminación, se adjuntan escenas virtuales interiores de cada una de las plantas del molino (figuras 12-15).



Figura 14. Escena de la planta primera. Figura 15. Escena de la planta segunda

5. CONCLUSIONES

Desde la rueda hidráulica vitruviana, muchas han sido las mejoras introducidas para aumentar el rendimiento de los ingenios hidráulicos, que repercutía directamente en la cantidad de cereal molido. En los siglos XVI y XVII se introdujeron mejoras en la geometría de los álabes del rodezno, para minimizar la pérdida de energía por el choque del agua.

Al aumentar las necesidades humanas de consumo de harina, se produjeron cambios en las instalaciones molineras a partir del siglo XVIII; por ejemplo, se instalaron más de una piedra de moler, se sustituyó el canal por el cubo de presión para disminuir el consumo de agua y por otro lado, se incorporaron los ejes de transmisión que accionaban mediante correas de distribución las nuevas máquinas incorporadas, de transporte (elevadores de cangilones y tornillos sin fin), de cernido (limpia, torno) y auxiliares (amoladora, ventilador).

Posteriormente en el siglo XIX se produjo la sustitución de las ruedas hidráulicas tanto verticales como de rodezno, por las turbinas hidráulicas de reacción y posteriormente en el siglo XX por el motor eléctrico, para competir frente a las fábricas de harina.

Ha sido necesario un estudio hidráulico detallado de la conducción de agua por el caz hasta el cubo de presión y de la turbina hidráulica así como un estudio cinemático de las diferentes transmisiones, para conocer los parámetros de funcionamiento del ingenio.

Por otro lado, el trabajo de recuperación gráfica se ha convertido en clave para conocer el funcionamiento de estas instalaciones y que ha necesitado previamente de un estudio exhaustivo de la cinemática de las transmisiones, para poder analizar las velocidades de los ejes de transmisión y sus poleas, y por tanto, de las velocidades de las máquinas, sin cuyo estudio la animación por ordenador no tendría la velocidad real de funcionamiento.

A esta reconstrucción, modelado y animación virtual del molino hidráulico, se unirá la documentación que la respalda, resultado de la investigación de los elementos arquitectónicos, industriales, históricos, etnográficos, etc., que sin duda será un estudio de gran valor histórico y tecnológico, que permitirá además la recuperación real en algunos casos y su puesta en valor como patrimonio industrial.

6. REFERENCIAS

- [1] I. González Tascón. Fábricas hidráulicas españolas. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid, 1992.
- [2] F. Vidal Cabasés. Conversaciones instructivas en que se trata de fomentar la agricultura por medio del riego de las tierras. Antonio de Sancha. Madrid, 1778.
- [3] L. Da Vinci. Codex Madrid I. Transcripción de L. Reti y traducción de F. Chueca y A. Madinaveitia. Taurus. Madrid, 1974.
- [4] M. Taccola. De Ingeneis, V. II, Notas editoriales sobre tecnología en la Italia del Renacimiento. G. Scaglia, F. Prager y U. Montag. Reichert. Wiesbaden, 1984.
- [5] V. Zonca. Novo teatro di machine et edificii per uarie et sicure operationi. F. Bertelli. Appresso. Padoua, 1656.
- [6] G. Branca. Le Machine. A instancia de I. Martuci por I. Mascardi. Roma, 1629.
- [7] A. Ramelli. Le diverse et artificiose machine. Reproducción facsímil de la edición de 1588 de G. Scaglia, A. Carugo e E.S. Ferguson. Il Polifilo. Milano, 1991.
- [8] J. Strada. Kunstliche Abrisz allerhand W. Wind Rosz und H. Muhlen. Paulum Iacobi. Franckfort, 1617.
- [9] O. Evans. The Young Mill-wright & Miller's Guide. Carey, Lea & Blanchard. Philadelphia, 1834.
- [10] R. López-García. El Diseño y la Ingeniería Asistidos por Ordenador como apoyo de la Arqueología Industrial en la recuperación del patrimonio. Aplicación a la caracterización de las técnicas de molienda de trigo en la Sierra Sur de Jaén. Tesis Doctoral. Universidad de Jaén, 2006
- [11] J.M. Vallejo. Tratado sobre el movimiento y aplicación de las aguas (3 vol). Imprenta de D. Miguel de Burgos. Madrid, 1833.
- [12] M.G. Río, J. Martínez y L. González. El ingenio mecánico de Torriani para el abastecimiento de agua a Toledo. Ingeniería hidráulica en México. Vol. XXIII, núm. 2, abril-junio de 2008, pp. 33-44.