



RECUPERACIÓN GRÁFICA DE LA MÁQUINA EÓLICA PARA DESAGUAR TERRENOS PANTANOSOS DE AGUSTÍN DE BETANCOURT Y MOLINA: MODELADO TRIDIMENSIONAL Y DOCUMENTACIÓN GEOMÉTRICA CON SOLID EDGE

GRAPHICAL RECOVERY OF THE AGUSTIN DE BETANCOURT'S WIND MACHINE TO DRAIN MARSHY GROUNDS: 3D MODELING AND GEOMETRIC DOCUMENTATION WITH SOLID EDGE

José Ignacio Rojas-Sola^{a,*}, Laura García-Ruesgas^b, José Porrás-Galán^c

^a Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos, Universidad de Jaén, Campus de las Lagunillas s/n, 23071 Jaén, España.
jirojas@ujaen.es

^b Departamento de Ingeniería Gráfica, Universidad de Sevilla, Isla de la Cartuja, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla, España. lauragr@us.es

^c Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Comillas, Alberto Aguilera 23, 28015 Madrid, España.
jporras@icai.comillas.edu

Abstract:

Agustín de Betancourt and Molina was one of the most distinguished engineers of the eighteenth and nineteenth century with numerous contributions to various fields of engineering, including civil engineering. This research shows the process followed in the documentation of the cultural heritage of that canary engineer, especially in the geometric documentation of the wind machine to drain marshy grounds designed in 1789. The baseline information has been recovered from the Canary Orotava Foundation of History of Science who has spent years collecting information about the Project Betancourt, in particular, planimetric information as well as a small report on its operation and description of parts of machine. From this information, we have obtained its 3D reconstruction using CAD techniques with the cooperation of Solid Edge ST7 parametric software, which has enabled to obtain the 3D model as well as different detail plans and exploded views.

Key words: cultural heritage, geometric documentation, 3D reconstruction, Agustín de Betancourt y Molina, wind machine to drain marshy grounds

Resumen:

Agustín de Betancourt y Molina fue uno de los más ilustres ingenieros del siglo XVIII y XIX, siendo muy numerosas sus aportaciones a diferentes ámbitos de la ingeniería, en particular a la ingeniería civil. La presente investigación muestra el proceso seguido en la documentación del patrimonio cultural del citado ingeniero canario, en particular, en la documentación geométrica de la máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos que diseñó en 1789. La información de partida se ha podido rescatar de la Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia que lleva años recopilando información sobre el Proyecto Betancourt, en concreto, se ha dispuesto de información planimétrica así como de una pequeña memoria sobre su funcionamiento y descripción de las partes del ingenio. A partir de dicha información, se ha obtenido su reconstrucción 3D, mediante técnicas CAD gracias al uso del software paramétrico Solid Edge ST7, lo que ha posibilitado la obtención del modelo 3D así diferentes planos de detalle y perspectivas estalladas.

Palabras clave: patrimonio cultural, documentación geométrica, reconstrucción 3D, Agustín de Betancourt y Molina, máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos

* Corresponding Author: José Ignacio Rojas-Sola, jirojas@ujaen.es

1. Introducción

1.1. Breve reseña biográfica

Muchas son las publicaciones relacionadas con Agustín de Betancourt y Molina que presentan una visión global de su biografía y obra (AA.VV 1996, 2009; Bogoliúbov 1969, 1973; Cioranescu 1965; Martín 2006; Muñoz 2008; Padrón 1958), permitiendo realizar una breve reseña biográfica.

Agustín de Betancourt y Molina fué un celebre ingeniero canario nacido en la población tinerfeña del Puerto de la Cruz en 1758 y fallecido en la ciudad rusa de San Petersburgo en 1824. Sus aportaciones a diferentes ámbitos de la ingeniería han sido muy numerosas, destacando aquellas que tienen que ver con la ingeniería civil.

Su comienzo como inventor se produce en 1778 con el diseño de una máquina epicilíndrica para entorchar seda, presentada en la Sociedad Económica de la Laguna. En ese año, parte a Madrid para estudiar en los Reales Estudios de San Isidro. Ya en 1783 recibe diversos encargos para la Corona, como la inspección del Canal Imperial de Aragón o el estudio de las Minas de Almadén.

En 1784 marcha a la Escuela de Puentes y Caminos de París para realizar estudios de hidráulica y mecánica y a diseñar máquinas para el Real Gabinete de Máquinas cuya creación se produjo en Madrid en 1792. Mientras tanto, en 1788 viaja a Inglaterra para observar la máquina de vapor de doble efecto, y a su vuelta a París en 1789 escribe la memoria sobre una máquina de vapor de doble efecto mejorada, comenzando su época más productiva. Así pues, desarrolla un telar mecánico, la máquina para desaguar terrenos pantanosos, y escribe la memoria sobre la fuerza expansiva del vapor de agua, el estudio sobre la manera de fundir y barrenar cañones de hierro o la memoria sobre una draga mecánica.

En 1792 se inaugura el Real Gabinete de Máquinas del que es nombrado Director, publicando el primer catálogo de modelos, planos y manuscritos que contiene 270 máquinas, 358 planos y más de 100 memorias con 92 gráficos, diseñados todos ellos en su estancia en París. Posteriormente, en 1795 presenta en Inglaterra el diseño de la máquina para cortar la hierba de los canales navegables, en 1796 el prototipo y los planos de un telégrafo óptico junto a Breguet, y en 1797 patenta una prensa hidráulica para uso industrial junto a Perier.

De regreso a España, es nombrado Director General de Puertos y Caminos, y en 1802 se crea la primera Escuela de Ingenieros de la que fue su primer Director. En 1803 escribe junto a José María Lanz el ensayo sobre la composición de las máquinas, viajando posteriormente a París para presentar en la Academia de Ciencias la memoria sobre un nuevo sistema de navegación interior que incluía el diseño de una nueva esclusa de émbolo buzo, así como el diseño de un termómetro metálico junto a Breguet.

Ya en 1807 viaja a San Petersburgo por invitación del Zar Alejandro I siendo nombrado Mariscal quedando adscrito al Consejo Asesor del Departamento de Vías de Comunicación, y posteriormente es nombrado Inspector del Instituto del Cuerpo de Ingenieros, y en 1819,

Director del Departamento de Vías de Comunicación. En esta última etapa de su vida, desarrolla una intensa labor como ingeniero de caminos con obras como el puente sobre el río Nevka, la fábrica de armas de Tula, la fábrica de cañones de Kazan, la draga mecánica del puerto de Kronstadt, la columna de Alejandro I, el canal Betancourt de San Petersburgo, la fábrica de papel moneda, la navegación a vapor en el Volga, o diferentes sistemas de abastecimiento de aguas o ferrocarriles, entre obras públicas.

1.2. Objetivos

La investigación presentada en esta comunicación es el principio de una más completa en el que se abordarán otros aspectos relacionados como la realización de una recreación virtual y el análisis estático realizado sobre el modelo 3D con herramientas de ingeniería asistida por ordenador, mostrando en estudios previos la estructura a seguir (Villar-Ribera *et al.* 2011).

Por ello, el objetivo principal de esta comunicación es la restitución digital de un modelo 3D preciso así como la documentación geométrica del ingenio desarrollado, obteniendo diversas perspectivas de cada uno de los subsistemas considerados, sobre los que poder obtener resultados fidedignos de los aspectos antes mencionados.

2. Material y métodos

El material de partida ha sido únicamente la información disponible en el Proyecto digital Agustín de Betancourt de la Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia promovido por el Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo (CEHOPU), el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), el Ministerio de Fomento y la Fundación Juanelo Turriano (Proyecto Digital Betancourt 2016).

El objetivo del mismo es la recuperación, digitalización y puesta en Internet de su obra, tales como memorias, informes, publicaciones, dibujos, planos, cartas personales o reproducciones de maquetas de máquinas o edificios de su autoría.

En particular, la presente investigación se ha realizado apoyándose en el material que aparece en dicho sitio web (Expediente de la máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos 2016)

En dicha web, se muestra la información relacionada con dicho expediente titulado 'Sur le nouveau moulin à vent', datado de 1789 y con el número de manuscrito 1487.

Toda la información de dicho expediente fue cedida para su digitalización por la Escuela Nacional de Puentes y Caminos de la Universidad ParisTech.

En realidad, dicho manuscrito es una carpeta que contiene documentos de Gaspard Riche de Prony, aunque examinando la misma, se encuentran dos dibujos y un texto titulado '*Troisième note sur les moulins à vent*' de Monsieur Menault del que se desconoce su relación con la obra de Betancourt.

Sin embargo, en la lámina 5 del '*Essai sur la composition des machines*', la figura M 7' coincide con la vista frontal de dicha máquina que corresponde con el

segundo dibujo de este manuscrito. Por otro lado, en el Catálogo del Real Gabinete de Máquinas, el modelo 153 dice lo siguiente "...de una maquina movida por el viento (cuyas aspas son verticales) para sacar agua de un pozo por medio de dos cántaros que suben y bajan alternativamente. Inventada por Don Agustín de Betancourt".

Esto demostraría que efectivamente el autor de este invento fue el ingeniero canario.

La Figura 1 muestra una serie de vistas principales de dicha máquina (alzado, perfil y perspectiva caballera) junto a otros detalles que son mostrados más claramente en la Figura 2, concretamente una vista superior del sistema de rotación vertical y una perspectiva caballera del regulador de llenado de las artesas.

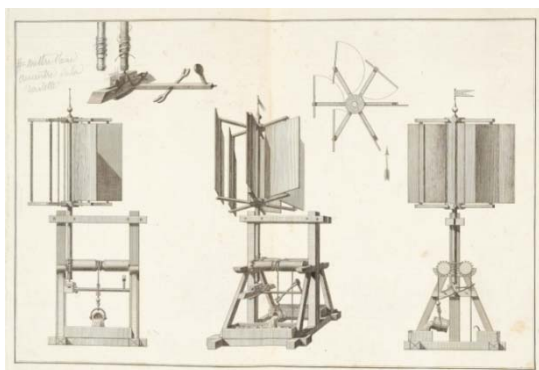


Figura 1: Vistas de alzado, perfil y perspectiva de la máquina. Imagen de la "Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia".

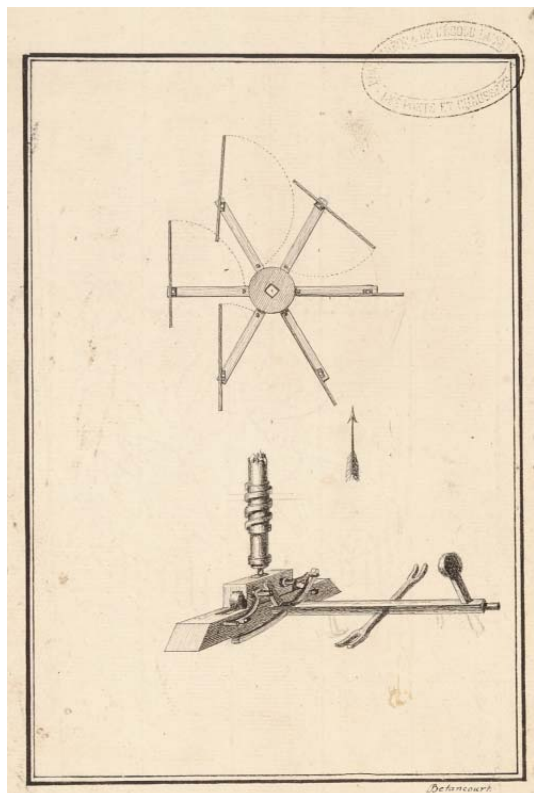


Figura 2: Vista superior del sistema de rotación vertical y perspectiva del regulador de llenado de las artesas. Imagen de la "Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia".

Sin embargo, el texto de dicho expediente corresponde a otra invención diferente que la objeto de estudio en esta comunicación, por lo que sólo se dispone de las dos láminas sin escala mostradas en la misma (Figs. 1 y 2).

Esta situación hará necesario el establecimiento de diversas suposiciones tanto de geometría como de funcionamiento de los diversos elementos que componen dicha máquina eólica, que se explicarán detalladamente en el siguiente apartado.

La metodología empleada ha sido la restitución digital del modelo 3D utilizando como herramienta Solid Edge ST7, software paramétrico de diseño asistido por ordenador desarrollado por Siemens AG, y cuya última versión estable data de julio de 2014 (Tickoo 2015).

Su kernel de modelado geométrico era inicialmente ACIS, pero fue cambiado a Parasolid desarrollado por Siemens PLM Software, y es utilizado como motor geométrico de otras muchas herramientas de CAD (del inglés, *Computer-Aided Design*).

A continuación, se describe con detalle el proceso de modelado de cada una de las piezas de la máquina, así como el proceso de ensamblado de las mismas para formar el conjunto, con explicación de las restricciones aplicadas, y las ventajas, inconvenientes y dificultades obtenidas en dicho proceso.

3. Resultados y discusión

3.1. Consideraciones generales

Para llevar a cabo el modelado tridimensional del mecanismo en estudio se han tenido en cuenta una serie de consideraciones generales que se especifican en los siguientes párrafos.

Dado que la información inicial de la que se ha partido no cumple los estándares modernos, no resulta factible considerar los documentos disponibles como planos de fabricación actuales, tal y como se interpretan hoy en día. Hay que tener en cuenta además, que en aquella época no existía normativa alguna. Cada ingeniero representaba sus invenciones como consideraba más adecuado, intentando plasmar el concepto de diseño fundamentalmente, quedando sin resolver por completo los problemas de fabricación y funcionamiento. Por esta razón, las dimensiones de algunos elementos presentan pequeñas incongruencias en algunas de las representaciones.

Por este motivo, al representar la geometría de este mecanismo ha resultado necesario efectuar alguna hipótesis dimensional basada en cómo se podría fabricar y cómo podría funcionar en aquella época. Queda abierta la posibilidad de efectuar un estudio en mayor profundidad sobre la relación existente entre las técnicas de fabricación de entonces y el diseño detallado de las piezas.

El modelado de este mecanismo se ha dividido en tres partes: la estructura soporte del mecanismo, el sistema de rotación vertical, y el mecanismo regulador de llenado de las artesas.

En el estudio de las uniones entre piezas se han considerado básicamente las uniones fijas (ajuste con

aprieto) y móviles (ajuste móvil) que permiten el giro. Las dimensiones de éstas se han calculado a partir de los valores tomados directamente de las láminas, buscando minimizar la variedad de los mismos en todo el conjunto. No se han modelado las roscas de estas uniones puesto que en aquella época no había ni tornillos ni tuercas iguales, ya que eran fabricados de forma artesanal y variaban tanto en tamaño como en diámetro de la rosca, así como en la separación de la misma.

Tampoco se han considerado las tolerancias de montaje entre cada una de las distintas piezas porque la fabricación artesanal de este mecanismo obliga a que sea el propio artesano quien realice los ajustes necesarios durante el proceso de fabricación.

3.2. Modelado de la estructura soporte del mecanismo

La estructura soporte de toda la maquinaria se muestra en la Figura 3. Esta estructura, fabricada completamente con madera y modelada como una pieza única, consta de una base aproximadamente rectangular sobre la que se asientan dos pilares verticales más cuatro pilares inclinados que permiten reforzar el conjunto. Sobre los pilares verticales, se sitúan dos vástagos horizontales cuya función es hacer de guía al eje del sistema de rotación vertical.



Figura 3: Vista general de la estructura soporte de la máquina.

Asimismo, se han añadido a esta estructura algunos elementos, que por su simplicidad y porque no son determinantes en el funcionamiento de la máquina, se consideran parte de la misma. Estos son: dos artesas que permiten almacenar el agua recogida y dos elementos con forma de gancho que facilitan que el movimiento de traslación de los cántaros se transforme en un giro, permitiendo así verter el agua dentro de las artesas.

Además esta estructura contiene dos elementos con forma de bañera (Fig. 4) que sirven de soporte para los dos tambores cilíndricos, fundamentales en el funcionamiento de esta invención. Por último, se ha considerado también como parte de esta estructura, un elemento con forma trapezoidal (Fig. 4), dispuesto horizontalmente que sirve de base de uno de los elementos imprescindibles del regulador de llenado de las artesas. Toda la estructura de este mecanismo es de madera.



Figura 4: Detalle de base de leva y soporte de tambor cilíndrico.

3.3. Modelado del sistema de rotación vertical

Las piezas que componen este sistema (Fig. 5) comprenden un eje vertical con un tornillo solidario en su parte inferior en el que encajan dos estructuras cilíndricas rodeadas de seis vástagos cada una de ellas a modo de aspa y que se han modelado como una única pieza. En el interior de cada uno de los vástagos con agujeros en los dos extremos, se acoplan seis varillas cilíndricas también en sus extremos y seis paneles (a semejanza de las aspas de un molino) respectivamente.

Los paneles se han modelado como elementos rectangulares que presentan un saliente con forma prismática de sección también rectangular y con un cilindro en cada extremo (Fig. 6).

El conjunto se completa con un detalle decorativo constituido por superficies cilíndricas, cónicas y esféricas, además de un elemento con forma de embudo y una bandera. Todos los elementos de este sistema son de madera, excepto el tornillo de la parte inferior del eje que debe ser de un material más resistente al desgaste, por ejemplo de hierro fundido, ya que engrana con una corona mientras funciona la máquina eólica.

Por otro lado, el eje debe ser flexible, es decir, debe permitir un cierto pandeo, por lo que es imprescindible que se fabrique con una madera flexible. Asimismo, la función de las varillas es impedir un giro libre de los paneles, de forma que estos se accionan con la energía eólica obtenida del viento y comienzan a girar hasta que se encuentran con la varilla como obstáculo, haciendo girar de esta manera al eje vertical. Por otra parte, la estructura cilíndrica superior es solidaria al eje, girando ambos al mismo tiempo, ya que encajan a través de un agujero con forma cuadrada, siendo lógicamente el ajuste entre ambos, un ajuste con aprieto.

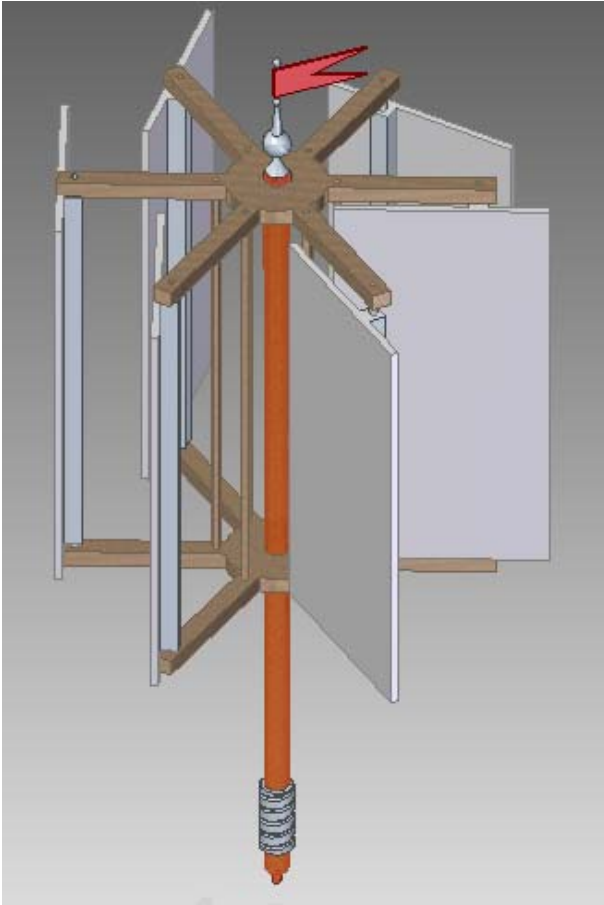


Figura 5: Sistema de rotación vertical de la máquina eólica.

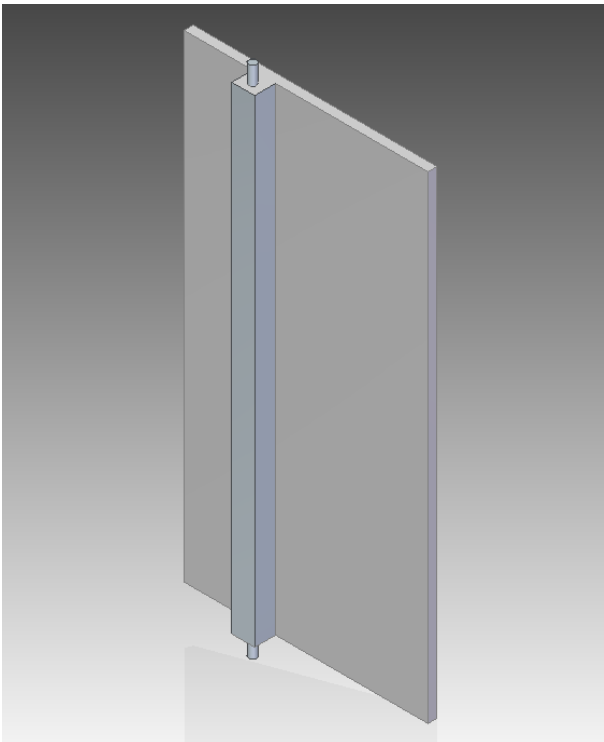


Figura 6: Panel del sistema de rotación vertical.

En la Figura 7 se muestra una representación en planta de este sistema observándose la posición que ocupan los paneles a medida que van girando.

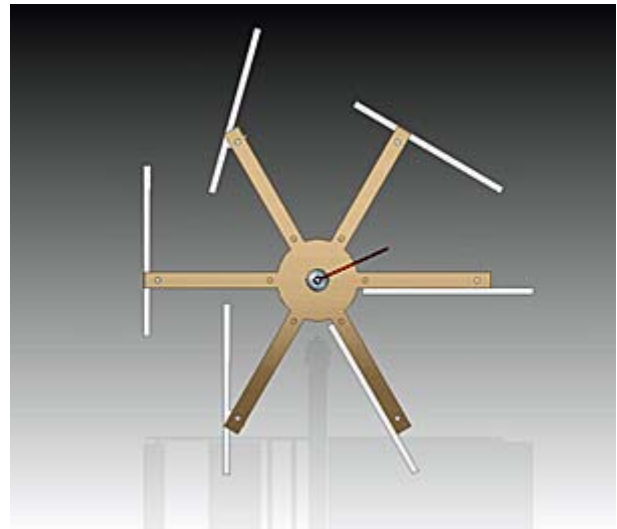


Figura 7: Representación en planta del sistema de rotación vertical.

3.4. Modelado del mecanismo regulador de llenado de las artesas

La Figura 8 muestra una perspectiva axonométrica dimétrica del mecanismo regulador de llenado de las artesas, y en la Figura 9 se muestra una vista de alzado del mismo. Dicho mecanismo está compuesto principalmente por dos tambores cilíndricos que poseen una rueda dentada solidaria en uno de sus extremos (corona), engranando los mismos con el tornillo vertical mencionado en el apartado 3.3, y realizando las funciones propias del mecanismo de un tornillo sinfín y corona (Fig. 10).

Al igual que ocurre con el tornillo, la corona también sería de hierro fundido para evitar un desgaste excesivo. Por otro lado, el dentado se ha modelado de forma aproximada, ya que por el momento no se ha planteado realizar una simulación exacta del comportamiento de los dientes al carecer de información geométrica detallada de los mismos.

Estos elementos se utilizan para transmitir movimiento entre dos ejes perpendiculares, de forma que cuando el tornillo gira, también lo hace la rueda que engrana con él. En este caso, por cada vuelta que da la rueda, el tornillo da dieciséis vueltas, tantas como dientes tiene la rueda, siendo este mecanismo irreversible porque sólo el tornillo puede mover a la rueda. Por tanto, la rotación de la rueda provoca el desplazamiento vertical de los cántaros unidos a una cuerda enrollada alrededor de los tambores, de forma que cuando un cántaro sube, el otro baja.

Debajo de los tambores, y solidario a la estructura, se ubica un eje de sección cuadrada y extremos cilíndricos (Fig. 11) que presenta tres cavidades, también de sección cuadrada, en las que se alojan dos elementos con forma de tenedor, y uno a modo de péndulo. En el extremo opuesto al péndulo, se sitúa un elemento con forma muy similar a la de una chaveta que ejerce las funciones de tope y dos piezas con forma de arco.

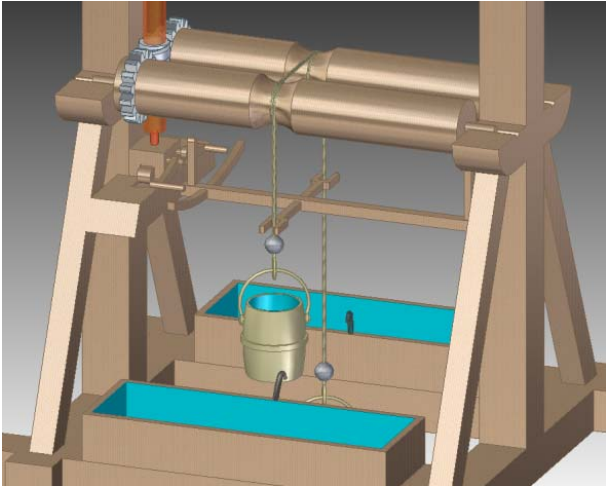


Figura 8: Perspectiva axonométrica dimétrica del regulador.

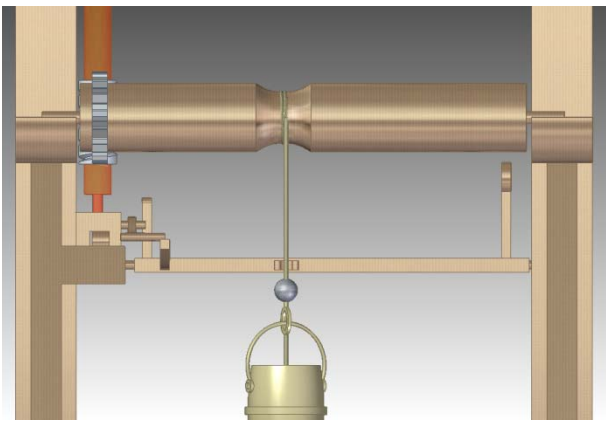


Figura 9: Vista de alzado del regulador.

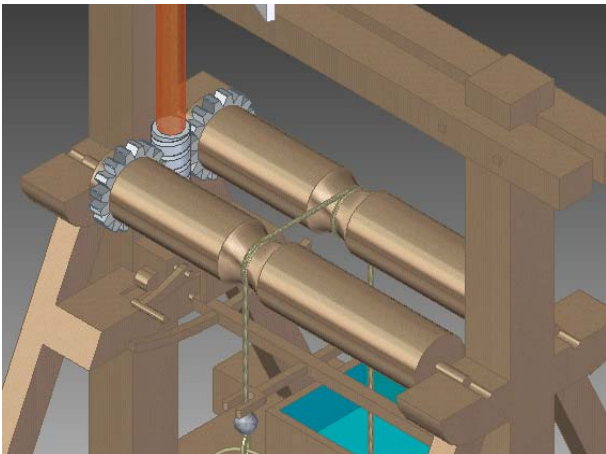


Figura 10: Vista del tornillo sinfín, corona y tambores.

El extremo cilíndrico permite unir el eje a la estructura por medio de un ajuste móvil. Los elementos con forma de tenedor actúan como tope del movimiento lineal de la bola solidaria con el cántaro, de modo que cuando la bola contacta con el elemento con forma de tenedor, éste hace girar al eje, y por tanto, a las dos piezas con forma de arco solidarias al mismo. Cuando una de estas dos últimas piezas contacta con la leva, ésta gira y a su vez fuerza el desplazamiento del cajón superior hasta que se encuentra con el tope, momento en el que el

tornillo sinfín engrana con la corona opuesta invirtiéndose así el sentido de rotación (Fig. 12). Esto hará que los cántaros se muevan en direcciones opuestas, consiguiendo así que un movimiento de giro se transforme en un movimiento de rotación, semejante al funcionamiento de una leva.

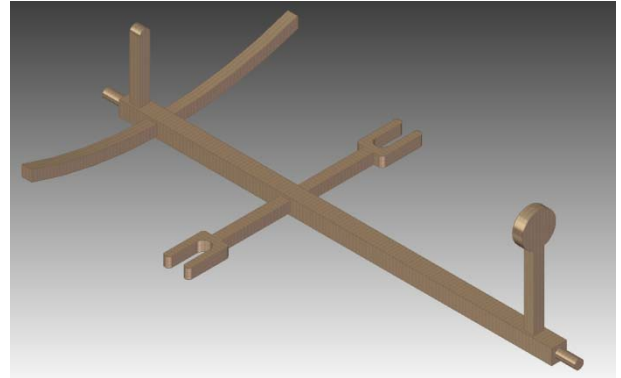


Figura 11: Vista del eje del regulador.

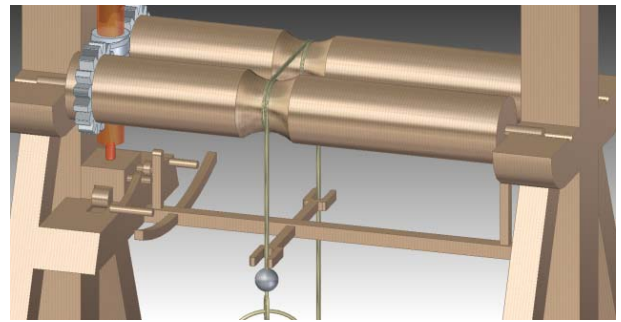


Figura 12: Detalle del mecanismo de leva.

Como se acaba de exponer, cuando el cántaro que sube alcanza la posición en la que la bola toca al elemento con forma de tenedor, se produce la conmutación del movimiento, es decir, el movimiento ascendente del cántaro sumergido y el descendente del cántaro vacío. Asimismo, el gancho solidario a cada una de las artesas provoca el giro del cántaro al chocar el primero contra la parte superior del último, consiguiendo de esta forma recoger en la artesa el agua contenida en el mismo.

Cuando el eje vertical de rotación se encuentra entre los dos tambores (posición intermedia) no acciona ninguno de ellos, y por tanto, la máquina no funciona. En este caso, es la propia inercia del péndulo, que actúa como contrapeso, la que fuerza a que el eje vuelva a accionar uno de los dos tambores.

3.5. Ensamblaje del conjunto

La Figura 13 muestra una imagen fotorrealista del conjunto ensamblado, realizado gracias al uso del software Keyshot 5.

Para realizar el ensamblaje del sistema de rotación vertical, se partió del eje vertical con tornillo solidario como pieza inicial. Sobre éste se insertaron las dos estructuras cilíndricas con forma de aspa, asegurando la alineación de ejes entre piezas y garantizando que las aspas mantengan su posición utilizando para ello, la relación de coincidencia de caras entre las caras planas

del vaciado cuadrado del aspa superior y las caras, también cuadradas, del eje en su parte superior (Fig. 5).

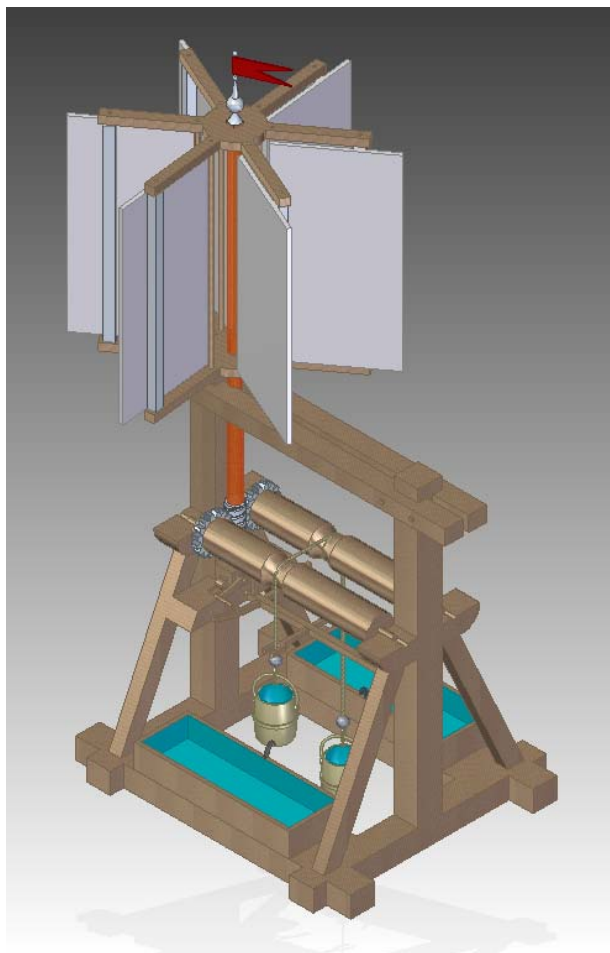


Figura 13: Imagen fotorrealista del modelo de la máquina.

Los paneles y varillas se unen a las aspas a través de uniones con ajustes con aprieto y móviles, garantizando la alineación de sus ejes con los ejes de los agujeros de las aspas. Las varillas permanecen fijas por lo que se restringen todos sus grados de libertad, mientras que los paneles conservan el grado de libertad del giro alrededor de su eje vertical (Fig. 6).

El ensamblado del mecanismo regulador de llenado de las artesas se ha realizado de la siguiente manera: el tornillo sinfín se aloja dentro del cajón superior de la leva siendo su único movimiento posible el giro alrededor de su eje vertical, garantizándose la alineación de los ejes del tornillo y el agujero de la parte superior del cajón (Fig. 8).

En cuanto al eje de sección cuadrada, éste se une a la estructura soporte de forma que su único grado de libertad es el giro alrededor de su eje. Los elementos con forma de tenedor, el péndulo, y demás elementos solidarios con este eje, presentan restringidos todos sus grados de libertad (Fig. 11).

El cajón superior de la leva y la guía que hay en su interior, tienen como único grado de libertad la traslación en dirección perpendicular al eje. Asimismo, se ha asegurado que el plano inferior del cajón superior y el plano superior de la base de la leva mantengan contacto a través de una alineación plana. Se trata de un

elemento que además de girar alrededor del eje de su agujero puede desplazarse en dirección perpendicular al eje de sección cuadrada, presentando por tanto, dos grados de libertad, un giro y una traslación. Además, se han alineado el eje del agujero de la leva con el eje del extremo cilíndrico del cajón superior de leva. En lo que respecta a los tambores cilíndricos, el único movimiento que presentan es el giro alrededor de su eje, quedando restringidos todos los grados de libertad restantes (Fig. 12).

La gran ventaja de este mecanismo es que la mayor parte de sus elementos son simples, y por tanto, relativamente sencillos de modelar y fabricar.

Por el contrario, el gran inconveniente que presenta es que es un mecanismo de grandes dimensiones, no apto para ubicarlo en cualquier lugar, y fundamentalmente que su velocidad de trabajo es lenta, no resultando útil en circunstancias en las que se requiera rapidez.

4. Conclusiones

Se ha obtenido el modelado tridimensional y la documentación geométrica de la máquina eólica para desaguar terrenos pantanosos de Agustín de Betancourt y Molina mediante el uso del software paramétrico Solid Edge ST7.

Asimismo, en el proceso de modelado, ha sido necesario introducir algunas hipótesis dimensionales, pues dicha información no aparece reflejada en las láminas del expediente que ha sido la única información disponible, tratándose siempre de obtener elementos que respetaran la proporcionalidad o fueran homotéticos con los representados. A partir de la documentación geométrica 3D de dicha máquina, se podrá realizar una recreación virtual de su funcionamiento, y estudiar con herramientas CAE (del inglés, Computer-Aided Engineering), su comportamiento funcional realizando un análisis estático de la misma, analizando tensiones de von Mises, desplazamientos y coeficiente de seguridad, así como en su caso, utilizar la ingeniería clásica a modo de comprobación.

A modo de conclusión, se podría decir que esta invención puede considerarse innovadora y muy útil en aquella época puesto que, pese a su baja velocidad de funcionamiento, resuelve el problema de desaguar un terreno inundado con una máquina cuyo mecanismo es simple pero muy eficaz, sobretodo con escasez de mano de obra ya que el funcionamiento simultáneo de varios de estos mecanismos sólo requeriría de una persona encargada de su mantenimiento en caso de avería, aunque evidentemente, hoy en día no tendría ninguna aplicación, puesto que usar una bomba resulta entre otras cosas, mucho más práctico y eficaz.

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el seno del proyecto de investigación titulado: "El patrimonio histórico de Agustín de Betancourt: estudio integral de las aportaciones a la ingeniería civil desde la ingeniería gráfica para su puesta en valor y difusión" (HAR2015-63503-P), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad, dentro del Programa Estatal de Fomento de la Investigación Científica y Técnica de Excelencia, Subprograma Estatal de Generación del

Conocimiento, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016, y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Asimismo, los autores agradecen muy sinceramente a la Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia, su

disponibilidad y autorización a utilizar el material de su web, en la persona del que fue su Director, Sergio Toledo Prats, así como en la persona de María Rodríguez Hernández que ha sido la persona que ha gestionado toda la información necesaria.

Referencias

- AA.VV., 1996. *Betancourt: Los inicios de la ingeniería moderna en Europa*. Catálogo de la Exposición del Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo (CEHOPU). Dirección a cargo de Ignacio González Tascón. Madrid: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente. 373 páginas.
- AA.VV., 2009. *Agustín de Betancourt y Molina (1754-1824)*. Barcelona: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. 448 páginas.
- BOGOLIÚBOV, A.N., 1969. *Agustín de Betancourt*. Moscú: Ciencia. 152 páginas.
- BOGOLIÚBOV, A.N., 1973. *Agustín de Betancourt: un héroe español del progreso*. Madrid: Seminarios y Ediciones. 188 páginas.
- CIORANESCU, A., 1965. *Agustín de Betancourt: su obra técnica y científica*. La Laguna de Tenerife: Instituto de Estudios Canarios. 199 páginas.
- EXPEDIENTE DE LA MÁQUINA EÓLICA PARA DESAGUAR TERRENOS PANTANOSOS, 2016. Disponible en: http://fundacionorotava.es/pynakes/lise/betan_mouli_fr_01_18XX [07/02, 2016].
- MARTÍN, A., 2006. *Agustín de Betancourt y Molina*. Madrid: Dykinson. 189 páginas.
- MUÑOZ, J., 2008. *Biografía cronológica de Don Agustín de Betancourt y Molina en el 250 aniversario de su nacimiento*. Murcia: Acciona Infraestructuras. 323 páginas.
- PADRÓN, S., 1958. *El ingeniero Agustín de Béthencourt y Molina*. La Laguna de Tenerife: Instituto de Estudios Canarios. 50 páginas.
- PROYECTO DIGITAL BETANCOURT, 2016. Disponible en: <http://fundacionorotava.es/betancourt> [07/02, 2016].
- VILLAR-RIBERA, R., HERNÁNDEZ-ABAD, F., ROJAS-SOLA, J.I. y HERNÁNDEZ-DÍAZ, D., 2011. Agustín de Betancourt's telegraph: Study and virtual reconstruction. *Mechanism and Machine Theory*, **46**(6), pp. 820-830. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2011.01.008.
- TICKOO, S. 2015. *Solid Edge ST7 for designers*. Lafayette (Indiana, EE.UU): Purdue University Calumet. 752 páginas.