

# RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL DEL ARTIFICIO DE JUANELO TURRIANO PARA ELEVAR AGUA DEL RÍO TAJO A TOLEDO

BERMEJO HERRERO, Miguel (1); GONZALEZ CONDE, Lucas (2);  
DEL RIO CIDONCHA, María Gloria (3); MARTINEZ PALACIOS, Juan(4)

<sup>(1) (2) (3) (4)</sup>Universidad de Sevilla, España

Escuela Superior de Ingenieros, Departamento de Ingeniería Gráfica

Correo electrónico: mbermejo@esi.us.es, lgconde10@yahoo.es, cidoncha@esi.us.es, juanmp@esi.us.es

## RESUMEN

Toledo se encuentra situada sobre un escarpado peñón rodeado casi en su totalidad por el río Tajo que traza un peculiar meandro en torno a la ciudad. En la primera mitad del siglo XVI, coincidiendo con el reinado de Carlos I de España y V de Alemania, se convierte en capital del Imperio Español, favoreciendo una etapa de esplendor y de expansión demográfica. Por estas fechas destruidos el acueducto romano y la gran rueda de agua construida en los tiempos de dominación islámica, el suministro se realiza por medio de asnos que la suben a lomos desde el cauce a los depósitos de distribución, superando un desnivel de unos cien metros.

Diversos intentos, basados en la tecnologías más avanzadas de la época, fracasaron. En 1565, y por recomendación de Felipe II, la ciudad encargó la construcción de una máquina para este menester al italiano Giovanni Torriani ( Juanelo Turriano), relojero, matemático y fabricante de artificios; que vino a España de la mano del emperador, al que acompañó hasta su muerte en Yuste.

El ingenio mecánico capaz de subir el agua a presión atmosférica, estuvo funcionando sin interrupción, y de forma satisfactoria hasta mediados del siglo XVII, donde la falta de mantenimiento y el robo de piezas, obligó a volver al primitivo procedimiento de utilizar cántaros a lomos de borricos.

En este artículo se resumen las investigaciones realizadas para la documentación y reconstrucción virtual del "Artificio de Juanelo" sintetizando las diversas teorías que todavía conviven; venciendo las incongruencias e indefiniciones, que quedan de manifiesto cuando se trata de animar o simular el funcionamiento del mecanismo, que previamente se ha diseñado de forma virtual. Para el modelado y la animación se ha utilizado la potencia que proporciona la aplicación CATIA V5.

**Palabras clave:** investigación histórica, simulación, animación, modelado, CATIA, divulgación.

**Grupo temático:** Realidad virtual

## ABSTRACT

Toledo is located on a steep surrounded rock in their totality by the Tajo river almost. First half of century XVI, agreeing with the reign of Carlos I, a stage of splendor and demographic expansion becomes capital of the Empire, favoring. Now, destroyed the Roman aqueduct, the water provision is made by means of asses that raise it backs from the channel, surpassing an unevenness of about one hundred meters.

Diverse attempts to elevate the water, based on the technologies more outposts of the time, failed. In 1565, and by recommendation of Felipe II, the city ordered the construction of a machine to the Italian Giovanni Torriani (Juanelo Turriano): watchmaker of the Court, mathematician and manufacturer of artifices. The mechanical talent able to raise the water atmospheric pressure, was working without interruption, and of satisfactory form, until half-full of century XVII, where the lack of maintenance and the robbery of pieces, forced to return to the primitive procedure to use pitchers to backs of asses. In this article, the investigations made for the documentation and virtual reconstruction of the "Artifice of Juanelo" are transformed; synthesizing the diverse theories that still coexist, overcoming the incongruities and vagueness, that are of manifest when it is to animate or to simulate the operation of the mechanism, that previously has been designed of virtual form. For modeled and the animation the power has been used that provides application CATIA V5.

**Key words:** historical research, virtual reality, animation , modeling, CATIA, spreading

**Topic Group:** virtual reality

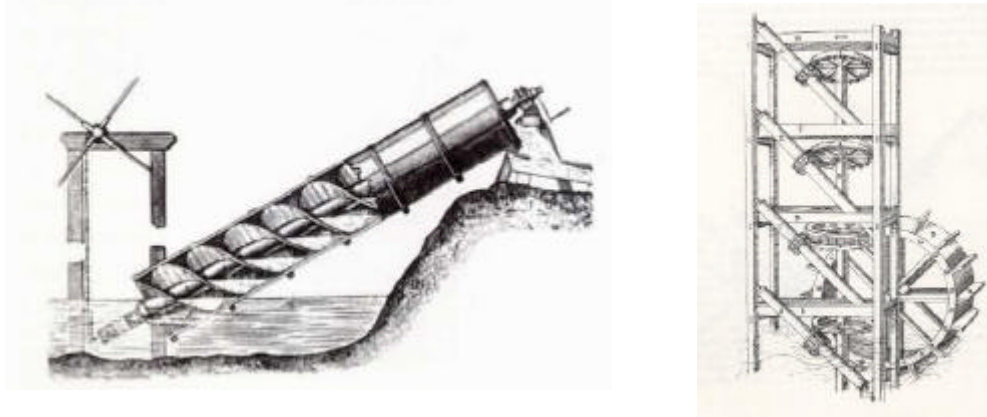
## 1. Introducción

En este trabajo se sintetizan las investigaciones realizadas para determinar como fue en la realidad el “Artificio de Juanelo Turriano”, destinado a la elevación de agua desde el río Tajo a Toledo. La utilización de las últimas técnicas de modelado sólido y simulación de movimientos, permiten validar las hipótesis históricas, que fueron recuperadas y estudiadas, y la revisión detallada que se ha realizado de las investigaciones anteriores acerca de este tema; detectando incongruencias o indefiniciones en los planos; obligado como se está por la necesidad de que el sistema virtual que se crea funcione correctamente.

En primer lugar, se revisan los ingenios conocidos, hasta ese momento de la historia, para la elevación de agua y la biografía de Juanelo. Para pasar después a repasar cronológicamente las diferentes teorías que sobre el diseño del ingenio se conocen. Por último se presenta, de forma muy breve, la reconstrucción virtual que se ha hecho del artificio, apoyándose en técnicas de CAD.

## 2. Ingenios predecesores para la elevación de agua

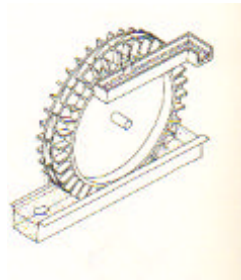
La construcción del artificio en Toledo causó una gran sensación, siendo visitada por personajes tan relevantes como D. Juan de Austria. Hasta entonces nada parecido se había hecho en el mundo, puesto que la mayor elevación previamente realizada era la de Augsburgo; una torre de menos de cuarenta metros y que a la vista de descripciones de la época utilizaba tornillos de Arquímedes para elevar el agua de nivel. Estos “tornillos sin fin” son un tipo especial de máquinas volumétricas, consistentes en un tubo enrollado en espiral alrededor de un eje. Un extremo se sitúa por debajo del nivel del agua que al girar sobre sí mismo con una cierta inclinación, permite ascender el agua por su interior y fluir por el extremo situado a un nivel más elevado.



*Figura 1: Tornillo de Arquímedes y Cóclea*

En muchas ocasiones, como puede observarse en la figura, el movimiento de giro era proporcionado mediante una rueda o noria con la cual engranaban, las cuales aprovechaban la energía de una azuza o de un río que las hace girar para conseguir un movimiento primario. Además, estas norias también podían elevar el agua por sí mismas, al incorporar unas vasijas o recipientes alrededor de su circunferencia exterior y girar alrededor de su eje que apoyaba en dos columnas fijadas en el cauce del río. Al dar la rueda una vuelta completa, cada vasija se llenaría abajo y en la parte alta de la noria, se vacía. Valga como ejemplo las Grúas de “El Carpio”, construidas entre 1561 y 1563 a orillas del Guadalquivir y que estuvieron funcionando durante más de trescientos años, elevando el agua para uso de riego.

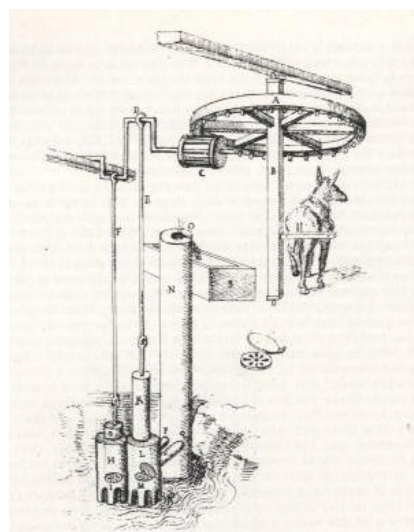
Esta idea de que el agua podía dar movimiento y ser elevada por una rueda fue propuesta por Arquímedes en el siglo III A.C., época en la que Ctesibio, Ingeniero y Matemático alejandrino ideó y construyó la bomba impelente, descrita años más tarde por Vitrubio en su obra “Los diez Libros de Arquitectura”, libro X, capítulo VII. Además de la máquina ctesibica como el la llama, en este libro X, en el capítulo cuarto, Vitrubio habla de “Máquinas para elevar agua”, donde clasifica ciertos elementos ideados para extraer agua y describe su construcción, al igual que lo hace acerca de las norias y ruedas fluviales en el capítulo V. Por último, en el capítulo VI, Vitrubio describe la construcción de una “Cóclea para elevar agua”, o lo que es lo mismo, un tornillo de Arquímedes.



*Figura 2: Noria*

Según la opinión de varios historiadores, Juanelo tuvo la opción de tomar a esas bombas como solución al problema de abastecimiento de agua en la ciudad de Toledo. Eran bien conocidas por él, tanto las de aspiración, en las que la elevación de agua se producía únicamente por la presión atmosférica, como las impelentes en las que se producía una elevación por aspiración y otra por impulsión. La elevación producida por la presión atmosférica solo podía alcanzar una altura de diez metros, mientras que la elevación por impulsión estaba limitada por la resistencia del material y como no, por el coste de conseguir unos materiales resistentes que aguantasen la presión derivada del desnivel que se pretendía vencer.

La siguiente figura es una copia de la bomba impelente de dos cuerpos incluida en el libro XIII de “Los Veintiún Libros De Los Ingenios Y Las Máquinas”, atribuido por varias personas al propio Juanelo. En ella se pueden distinguir los elementos que describía Vitrubio en su obra.



*Figura 3: Bomba impelente de dos cuerpos*

Ya que Juanelo en un principio tendría que costearse la construcción de su artificio y además no creía en la capacidad de los materiales para aguantar la presión que se derivaba del desnivel entre el cauce del Tajo y el Alcázar como para optar por las bombas, se decidió por la invención de una máquina nueva, de invención propia, en la que la elevación del agua se produciría a presión atmosférica.

### **3. Giovanni Turriano (Juanelo Turriano). Reseña histórica**

Conozcamos al autor, antes de conocer su obra. Giovanni Turriano nació en Cremota (Lombardía) alrededor del año 1500. Llegó a España de la mano del emperador Carlos V en 1530, donde ejercía las funciones de relojero de la Corte. De esta etapa se recuerda su restauración del reloj planetario de Giovanni Dondi, y la construcción del famoso reloj astronómico “Cristalino”. También destacó como ingeniero, matemático y fabricante de mecanismos, gozando tanto del favor del monarca, que lo acompañó en su retiro de Yuste.

Tras la muerte de su padre, Felipe II no quiso prescindir de su servicio y le nombró Matemático Mayor, participando en esta época en la reforma del calendario actual, mientras estuvo “prestado” al servicio del Papa Gregorio XIII. Durante su estancia en España las aportaciones de Juanelo Turriano al patrimonio del Imperio fueron numerosas: construcción de la presa del pantano de Tibi, en Alicante, la más alta del mundo durante casi 300 años; diseña las campanas, durante la edificación de El Escorial, de la mano de su amigo Juan de Herrera; construye también molinos, varios autómatas (danzarines, guerreros, pájaros voladores, etc.), relojes, etc.

Pero su gran creación fue la máquina hidráulica, para surtir de agua del Tajo, a la ciudad de Toledo. El encargo fue hecho en 1565 por el Marqués de Vasto y subiría a los depósitos situados bajo El Alcázar la cantidad permanente de “mil seiscientos cántaros de a cuatro azumbre de agua”, unos 12.400 litros diarios, con un plazo de ejecución de tres años. Juanelo cumplió su parte del contrato, y el mecanismo funcionaba a pleno rendimiento, en plazo, y superando las previsiones iniciales al llegar hasta los 1.700 litros. Sin embargo la ciudad no le pagó, con la excusa de que el caudal completo quedaba para uso exclusivo del Palacio Real, en donde era almacenado. Arruinado, tras costear además de su bolsillo el mantenimiento del artificio durante seis años, se llega a un acuerdo para construir un segundo, sufragado por la Corona, que quedaría en poder de Juanelo y sus herederos. Terminado en 1.581; y aunque el Rey cumplió con su deuda, no así la ciudad; por lo que no pudiendo costear su mantenimiento se vio obligado a renunciar a él, lo que sin duda contribuyó a su muerte el 13 de Junio de 1.585.

El complejo mecanismo de los artificios dificultó su conservación, ambos funcionaron durante más de cuarenta años, hasta mediados del siglo XVII, cuando se procedió a desmontar el primer ingenio y se dejó al segundo como icono de la ciudad, debido al entusiasmo y admiración que en tantas personas del mundo había levantado. Poco a poco, con el paso del tiempo y debido al constante robo de piezas fueron desapareciendo los restos de los artificios hasta el punto de que nada queda en Toledo de los ingenios.

### **4. Reconstrucción del artificio de Juanelo.**

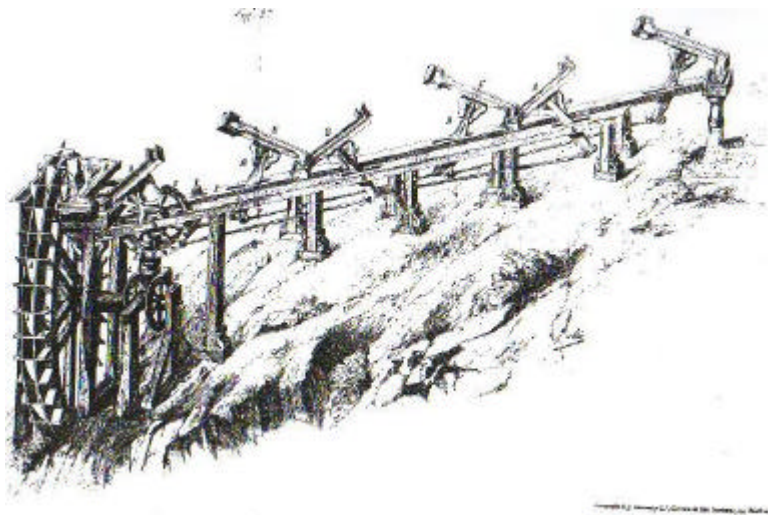
Pero, ¿Cómo eran estas máquinas que causaban tanta admiración?. ¿Cómo funcionaban?. Responder a esas cuestiones cuando el único legado de los ingenios había sido el elogio de escritores, viajeros y demás contemporáneos de Juanelo, sin haberse encontrado plano o dibujo alguno que los represente, se convierte en una ardua y complicada tarea. De entre todos esos documentos destacan tres fundamentalmente, aparte de antiguos inventarios que se realizaron sobre los ingenios y que han sido encontrados en importantes bibliotecas nacionales. El primer y quizás más importante de los tres, pertenece al humanista y amigo de Juanelo, Ambrosio de Morales, que no vio los artificios pero sí la pequeña maqueta que Juanelo construyó para

convencer al pueblo de la validez de su idea. En él están basadas las dos teorías que hoy día existen acerca del funcionamiento de los artificios, y la descripción que hace de las máquinas versa del siguiente modo:

*<<...La suma de esta invención es anexas o engoznar unos maderos pequeños en cruz por enmedio y por los extremos de la manera que en Roberto Valturio está una máquina para levantar un hombre en alto. Estando todo el trecho así encadenado, al moverse los dos primeros maderos junto al río se mueven todos los demás hasta el Alcázar con gran sosiego y suavidad, cual para la perpetuidad de la máquina convenía... Mas lo que es más maravilloso es haber encajado y engoznado en este movimiento de la madera unos caños largos del mismo metal a los cabos, los cuales subiendo y abajando con el movimiento de la madera, al bajar el uno va lleno y el otro vacío, y juntándose por este lado ambos, están quedos todo el tiempo que es menester para que el lleno derrame en el vacío. En acabando de hacerse esto, el lleno se levanta para derramar por el caño en el vacío, y el que derramó ya y quedó vacío se levanta para bajarse y juntarse con el lleno de atrás, que también se baja para henchirle. Así los dos vasos de un caño están alguna vez vacíos, teniendo sus dos colaterales un vaso lleno, yéndose mudando así, que el que tuvo un vaso lleno queda vacío del todo, y el vacío del todo tuvo luego un vaso lleno, y siempre entre dos llenos hay un caño con dos vasos vacíos...>>.*

Basado en este texto, el ingeniero de minas Don Luís de la Escosura y Morrogh se convirtió en el año 1880 en la primera persona que se enfrentaba al reto que suponía dar una explicación al funcionamiento de los ingenios de Toledo. Interpretar la descripción de Morales sin ilustración alguna resulta muy complicado, por lo que Escosura se dedicó a buscar algún dibujo que le ayudase a comprender aquel escrito y comenta en sus conclusiones:

*<<...lo que con diligencia y trabajo no pude conseguir, me lo proporcionó la casualidad, examinando un libro rarísimo... El título de la obra es el siguiente: Le diverse et artificiose Machine del Capitano Agostino Ramelli... Quiso la casualidad que yo abriese este libro por la lámina correspondiente al capítulo XCV, que representa una máquina para elevar agua, en la que inmediatamente reconocí el artificio de Juanelo que describe Morales...>>*



*Figura 4: Máquina de Ramelli*

La figura 4 muestra la lámina en la que Escosura vio reflejado el artificio de Juanelo, aunque aceptaba algunas diferencias con la descripción que hacía Morales. Concretamente, el amigo de Juanelo comentaba en un párrafo por separado, titulado “Particularidades maravillosas del Aqueducto”: *<<...la forma de la cadena y de los arcaduces de cobre con que al principio*

*se tomaba el agua del río...>>>*. Por tanto, para completar su teoría, Escosura consideró una primera elevación realizada mediante una cadena de cangilones movida por una rueda hidráulica, la cual tomaba la fuerza de movimiento de las propias aguas del Tajo, y a continuación una segunda, basada en la disposición propuesta por Ramelli en su lámina, de la que suprimía los cangilones de la primera rueda convirtiéndola únicamente en motriz. Además, sustituía también las cajas y canales por unos vasos y tubos de latón para dar completo sentido a las palabras de Morales en cuanto a movimientos, pausas y paradas. El último gran escollo para Escosura le supuso tener que dar significado a la escala de Valturio comentada en la descripción, concluyendo que se correspondía con los tirantes que transmitían el movimiento de vaivén de unos cazos a los otros, a los cuales sustituirían en la lámina de Ramelli. De este modo fue como Luis de la Escosura y Morrogh quedó convencido de haber encontrado respuesta al misterio de los artificios de Juanelo. La idea pues, se corresponde con un sistema de plano inclinado, de pendiente continua, a través del cual se elevaba el agua desde el río Tajo hasta el Alcázar y constituye la primera de las dos teorías vigentes acerca del funcionamiento de las máquinas.

La segunda fue ideada por D. Ladislao Reti conocido como el gran investigador de la técnica, y quien interesado e intrigado por el tema, estudió los escritos de Escosura y los de un ingeniero alemán llamado Theodor Beck, quién había aceptado y desarrollado un poco más la teoría del propio Escosura. Pronto le surgieron dudas y problemas acerca de la reconstrucción que planteaban, por lo que se decidió a hacer un estudio más crítico de la aceptada interpretación del funcionamiento y de la historia de su creador, a lo que siguió una intensa búsqueda en diversos archivos y grandes bibliotecas. Con ello comprobó rápidamente que las noticias recogidas por Escosura estaban lejos de representar toda la información histórica que había quedado del artificio y del propio Juanelo. El resultado de su investigación lo expuso en una conferencia pronunciada en Toledo, el 15 de junio de 1967 y en la que contó con una maqueta construida por el artesano D. Juan Luis Peces Ventas en las que quedaron plasmadas todas las conclusiones a las que llegó y las cuales pueden verse reflejadas en el siguiente esquema:

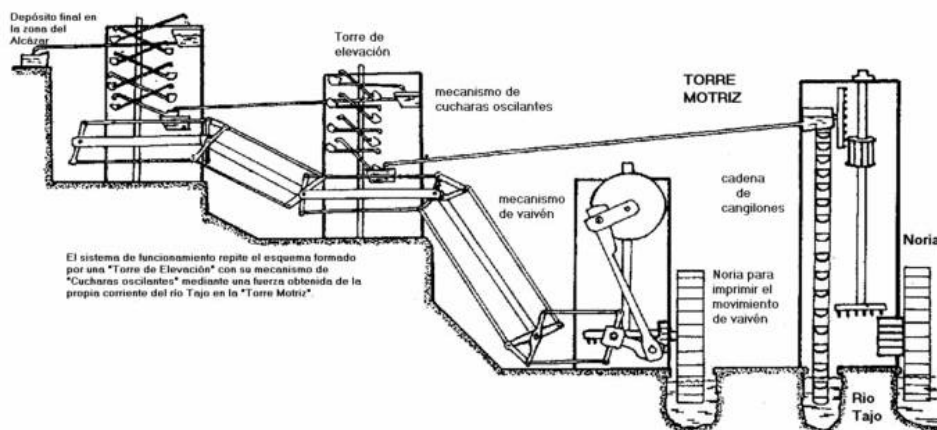
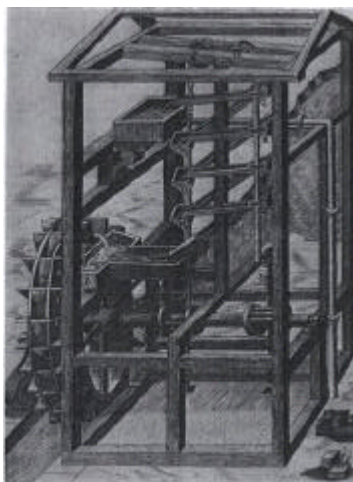


Figura 5: Esquema de Ladislao Reti

Según Reti, en primer lugar existió una presa en el Tajo desde la que partían dos canales por donde el agua era conducida a unas ruedas hidráulicas que movían el artificio, una concretamente daba movimiento a una cadena de cucharas, de cuya existencia en el mecanismo ya habló Escosura, y el otro hacía lo mismo con la rueda motriz del artificio propiamente dicho. En cambio, esta segunda elevación es la raíz de la diferencia entre ambas teorías, ya que Reti no aceptó la lámina de Ramelli que tanto ayudó a Escosura a desvelar la incógnita de los ingenios



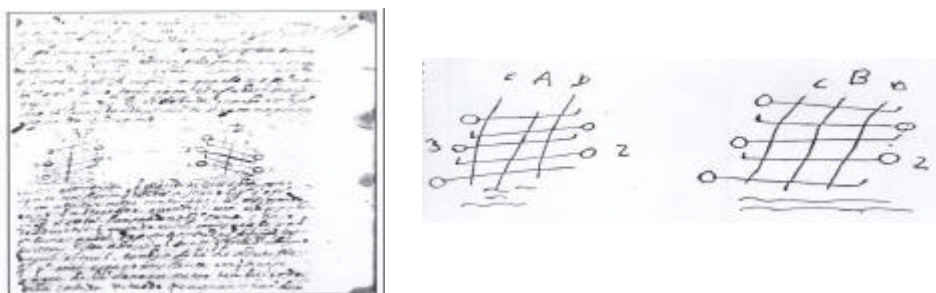
de Toledo, sino otra, concretamente la siguiente en orden de aparición del mismo libro de Ramelli.



*Figura 6: Lámina del libro de Ramelli aceptada por Reti*

Por tanto, la teoría de Reti sobre el artificio de Juanelo consiste en un sistema vertical, inspirado en estos torreones de cucharones que elevaban el agua de forma escalonada: el agua ascendía a lo largo de la torre gracias al movimiento de vaivén de las cucharas para luego ser transportada mediante conducciones de latón de una torre a la siguiente. Para secundar su teoría, Reti contó con varios grabados de la época que reflejaban esa elevación realizada de forma escalonada, con varios inventarios de la época que pudo encontrar en las búsquedas realizadas en diversas bibliotecas y además con un documento fundamental para él que describía de esa forma el funcionamiento de las máquinas de Toledo. El escrito fue realizado por un viajero de la época llamado Sir Kenelm Digby, quien vio a los artificios funcionando y del que cabe resaltar: <<...Y así los dos lados de la máquina eran como dos piernas que pisaban por turnos el agua...>>

Por todo ello, ésta es la teoría más aceptada en la actualidad, más aun si cabe después de la aparición del tercer escrito mas importante en toda la investigación acerca del enigma de las máquinas de Toledo. El hallazgo de este documento, publicado en 1986 en la *Revista de estudios extremeños*, supone reforzar la teoría de Reti, ya que describe un artificio que iba subiendo el agua a presión atmosférica de forma escalonada por medio de torretas de cazos que permitían adaptarse a las irregularidades del terreno. Incluso el documento aporta los únicos dibujos existentes hasta el momento realizados por alguien que vio funcionando a los ingenios.

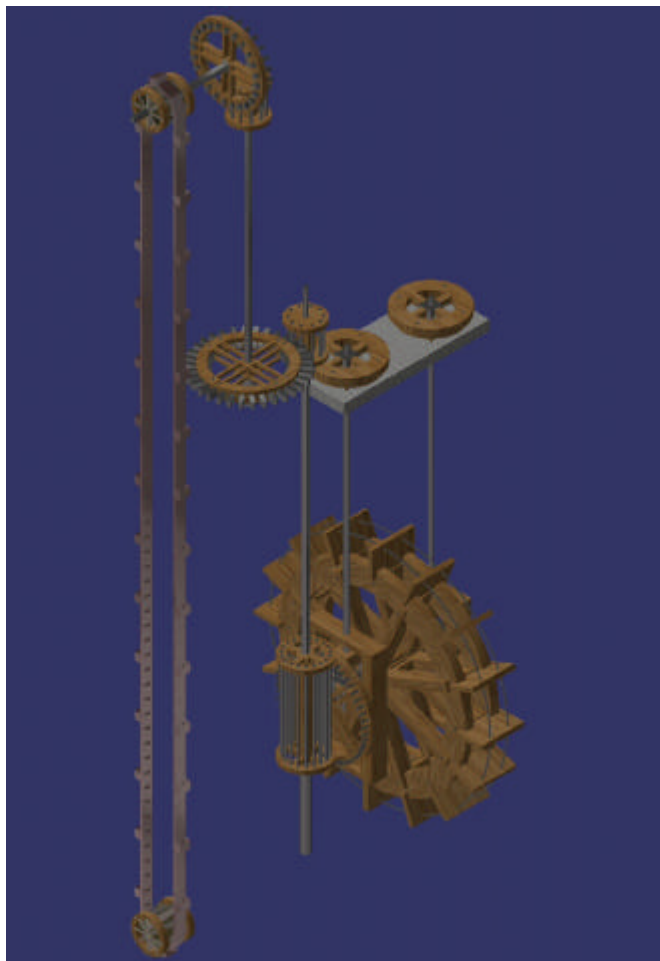


*Figura 7: Tercer escrito*

## 5. Modelado y animación del artificio.

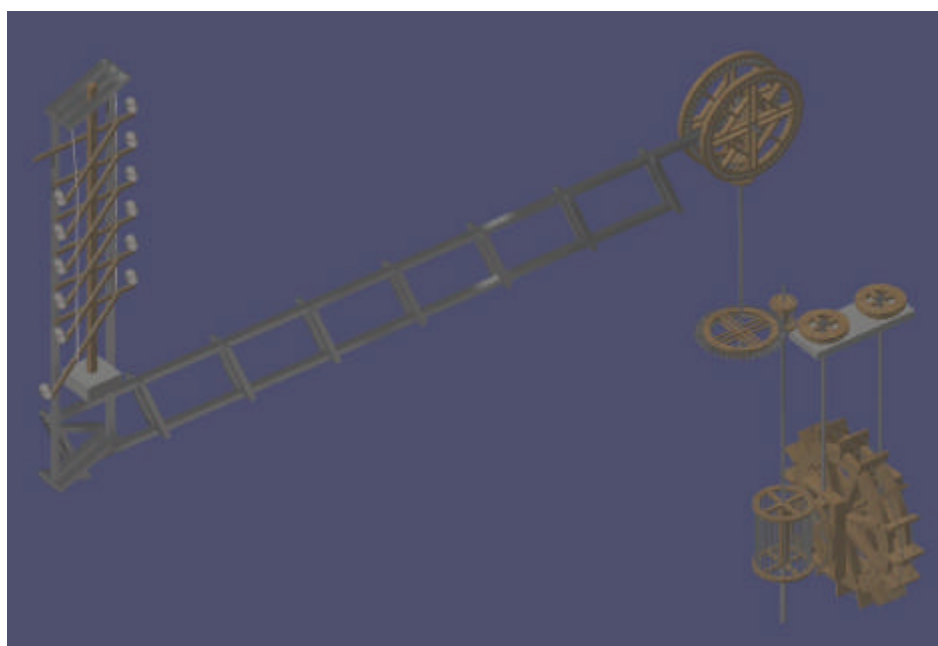
Se ha realizado el modelado del artificio de Juanelo, basado en los diseños aportados por la Fundación Juanelo Turriano correspondientes al “Proyecto de Reconstrucción Parcial del Artificio de Juanelo”, elaborado por su fundador y discípulo de Reti, D. Jose Antonio García-Diego, el cual nunca se llegó a llevar a cabo y que, claro está, se basa en la teoría vertical. La elección de esta solución se ha hecho en base a dos razones: es la teoría más conocida y divulgada; además de la más completa y desarrollada, por cuanto dispone de planos que han servido de base para la reconstrucción virtual. El modelado sólido ha sido realizado gracias a la potencia que proporciona el programa CATIA en su release 5, en sus módulos de generación de piezas y de conjuntos, e incluso llegando a animar el modelo y verlo en movimiento. Las mayores dificultades las supuso la cantidad de indefiniciones y errores que contenían los citados planos, para lo que se tuvo que recurrir a otros esquemas, imágenes e incluso maquetas existentes hoy día para dar solución a dichos inconvenientes. Con esto no se pretende, ni mucho menos, desprestigiar ni desmerecer el trabajo realizado por el equipo de García-Diego, todo lo contrario ya que los medios y el estado del arte de la Representación Gráfica en aquellos años, 1975, no permitían, como hoy día la verificación y revisión del funcionamiento de los diseños, gracias a las herramientas de simulación y realidad virtual disponibles.

A continuación se muestran los modelos correspondientes a la primera y a la segunda elevación por separado.



*Figura 8: Perspectiva del conjunto montado correspondiente a la primera elevación*





*Figura 9: Perspectiva del conjunto montado correspondiente a la segunda elevacion*

## **6. Consideraciones finales.**

La simulación por ordenador y su siguiente escalón la realidad virtual permiten la reconstrucción “real” de mecanismos, máquinas, edificios, etc., permitiéndonos conocer como serán o como fueron. En este trabajo se ha aprovechado la potencia de estas técnicas para “restaurar” un ingenio audaz e innovador para su época, y que incluso hoy en día, despierta la curiosidad y el interés de ingenieros y profanos.

La importancia que la realidad virtual tiene en estos momentos y va a adquirir a corto plazo, queda fuera de toda duda, se ha acuñado ya el término: “el habla del siglo XXI”. La Ingeniería Gráfica tiene mucho que decir en estas técnicas, y nuestro colectivo tiene la obligación y la oportunidad con ellas, de situarse a la cabeza de los avances científicos de la humanidad.

## **Referencias .**

Escosura y Morrogh, Luis. *El artificio de Juanelo y el puente de Julio Cesar*

Fundacion Juanelo Turriano. *Reconstrucción del Artificio de Juanelo Turriano en Toledo*

González Conde, Lucas. *Recreación virtual del Artificio de Juanelo Turriano*. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, 2004.

Pseudo-Juanelo Turriano. *Los veintiún libros de los Ingenios y las Maquinas*

Ramelli, Agostino. *The Various and Ingenious Machines*

Reti, Ladislao. *El artificio de Juanelo en Toledo*. Diputación provincial de Toledo (1968)