



Estudio y reproducción física de la bomba alternativa de Al-Jazari

Gaspar Tribaldos López¹, Gustavo Medina-Sánchez², Rafael López-García²

¹Graduado en Ingeniería Mecánica, Universidad de Jaén, España. Email: gtl00001@red.ujaen.es

²Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Universidad de Jaén, España. Email: gmedina@ujaen.es

Al-Jazari fue un científico e ingeniero de origen árabe que está considerado como el inventor de la ingeniería hidráulica. En su obra más relevante “El Libro del Conocimiento de Dispositivos Mecánicos Ingeniosos”, escrita en 1206, describe cincuenta dispositivos e inventos de diversa índole, entre los que destacan varios tipos de sistemas de abastecimiento de agua. Su dominio sobre el movimiento del agua le llevó a ganarse el sobrenombre de “El maestro del agua”.

En este trabajo se realiza un acercamiento a la figura de Al-Jazari y se explica cómo se ha llevado a cabo la reproducción de uno de sus mecanismos más icónicos, la bomba alternativa de succión. Se trata de una bomba de succión de doble acción con válvulas y movimiento de pistón alternativo. La bomba aprovecha el movimiento de una corriente de agua para transmitir movimiento a un mecanismo de biela que acciona dos pistones con movimiento alternativo. El movimiento de los pistones permite succionar y elevar el agua de la corriente. Es un mecanismo muy novedoso para la época, ya que es la primera vez que se documenta el uso de una bomba de succión, el uso de una biela y del principio de doble acción.

La reproducción física se ha realizado usando descripción de la bomba y los esquemas que aparecen en el libro de Al-Jazari, a partir de los cuales se ha realizado una interpretación y un modelado digital con software CAD. Los diferentes elementos del mecanismo se han fabricado utilizando la tecnología de fabricación aditiva FFF (Fabricación por Filamento Fundido). La FFF, popularmente conocida como impresión 3d, es una tecnología de fabricación rápida muy utilizada para la fabricación de prototipos, y que permite de forma rápida y económica la reproducción tridimensional de piezas a partir de sus modelos digitales

1. Contexto histórico-tecnológico

La Edad Media, es el periodo histórico comprendido entre la caída del imperio Romano de Occidente (476) y la caída del Imperio Bizantino a manos de los turcos otomanos (1453), fue un periodo que experimentó avances tecnológicos importantes para la sociedad y mejoras de la agricultura en general. En este ámbito, la ingeniería mecánica árabe tiene un fuerte impulso y desarrollo de la mano del Islam Oriental, aportando inventos como máquinas para elevar agua, relojes, autómatas, máquinas de guerra y otros. Se constituyó así una época dorada, con un liderazgo intelectual fruto de haber conocido y mejorado el legado clásico de civilizaciones como la griega, la egipcia o la persa

1.1. Al-Jazari

Al-Jazari es uno de los más destacados ingenieros mecánicos de la Edad Media. Su nombre completo es Abū al-'Iz Ibn Ismā'īl ibn al-Razāz al-Jazarī. El nombre Al-Jazari sugiere que su familia procedía de Al-Yaira, región situada entre los ríos Tigris y Éufrates en el norte de las actuales Siria e Irak. La única información biográfica que se conoce es la contenida en su obra *El libro del conocimiento de los ingenios mecánicos* [1]. Nació en el 1136 y la mayor parte de su vida la pasó en el área de la Alta Mesopotamia, el sur de Turquía. Al igual que su padre, desempeñó el puesto de ingeniero jefe en la corte de los artuquies. Estuvo al servicio de tres gobernantes consecutivos: Nur al-Din Muhammad ibn Arslan (1174-1185), Qutb al-Din Sukman ibn Muhammad (1185-1200) y Nasir al-Din Mahmud ibn Muhammad (1200-1222). Su principal obra es “El libro del conocimiento de los ingenios mecánicos” que data de principios de 1206, la cual tardó siete años en completar. Se estima que su vida activa empezó en torno al 1175, por lo que cuando terminó su obra, tenía más de 25 años de experiencia en la construcción de máquinas y artefactos.

La mayoría de los científicos de la civilización islámica de la época medieval destacaban por ser sabios multidisciplinares, en el sentido que se entiende hoy en día. Solían destacar en varias disciplinas desde la ingeniería a la poesía, pasando por la teología, la medicina, la filosofía o la ciencia. A diferencia de estos científicos, Al-Jazari sólo se interesó por el diseño y la construcción de máquinas. Al-Jazari trató, como buen ingeniero, de unir la ciencia y la práctica para diseñar máquinas llamadas “hiyal”, que significa “artefacto” o “forma complicada de hacer algo”. Esta visión práctica de la ciencia llevó a Al-Jazari a ser más un ingeniero práctico que un científico, en el sentido de que estaba más interesado en la artesanía necesaria para construir sus artefactos que en la tecnología que había detrás de ellos. Sus mecanismos se basaban más en ensamblados por prueba y error que en complicados cálculos científicos [2].

1.2. El libro del conocimiento de los ingenios mecánicos

El título original de esta obra es “Kitāb fī ma'rifat al-hiyal al-handasiyya”. El primer intento de traducir este libro corrió a cargo de Wiedmann y Hawser, que tradujeron partes del mismo al alemán en el primer cuarto del siglo XX. Sin embargo, la traducción más conocida de este libro es la que realizó en 1974 Donald R. Hill y cuyo título original es “The Book of Knowledge of Ingenious Mechanical Devices” [1]. Otros autores prefirieron traducirlo como “Compendio sobre la teoría y la práctica de las Artes Mecánicas” (Al-Hassan 1976) o simplemente como “Autómatas” (Chapuis y Droz 1958).

La gran cantidad de copias manuscritas existentes muestran la popularidad que alcanzó la obra de Al-Jazari. Posiblemente por el carácter eminentemente práctico del mismo, ya que sólo describe dispositivos que él mismo había construido explicados con un estilo que se asemeja al de un libro moderno de “hágalo usted mismo”.

El libro de Al-Jazari presenta toda una gama de dispositivos y máquinas con diversas finalidades. Lo interesante es el alto grado de ingeniería necesario para fabricarlos, así como el uso de delicados mecanismos. El libro de Al-Jazari se divide en seis tipologías que suman un total de 50 dispositivos diferentes: Diez relojes, diez recipientes autómatas para dispensar vino o agua para beber, diez dispensadores de agua para abluciones rituales y dispositivos de sangría, diez fuentes y autómatas musicales, cinco bombas para elevación de agua, y cinco máquinas diversas, como instrumentos para medir esferas o cerraduras.

De todas las máquinas incluidas en el libro destacan dos: su famoso reloj elefante, que era con mucho el reloj más sofisticado de la época, y su bomba de agua alternativa de succión con un sistema de manivela deslizante, que es la que se muestra en el presente trabajo.

1.3. Maquinas elevadoras de agua

De los artefactos diseñados por Al-Jazari nos interesaremos principalmente por las máquinas elevadoras de agua, algunas de las cuales son originales y cuyos mecanismos principales pueden verse en varias máquinas contemporáneas. El suministro de agua para fines domésticos y de riego siempre ha sido muy importante para las distintas civilizaciones por lo que se pueden encontrar diseños desde la antigüedad. Al-Jazari propuso en su libro cinco diseños diferentes de máquinas elevadoras de agua [3].

Las dos primeras máquinas diseñadas son realmente una mejora de la máquina elevadora de agua más antigua, llamada "Shaduf". Este tipo de máquina se basa en un sistema de palancas con un contrapeso en un extremo que ayuda a llenar un cubo fijado en el otro extremo, y elevarlo. Al-Jazari sugirió utilizar un tubo hueco como palanca en lugar de la viga y una cuchara en el extremo en lugar de un cubo, de modo que cuando se levante el agua pueda fluir por su interior hacia el sistema de riego. Este sistema facilitaba y agilizaba la elevación del agua.

La tercera máquina de Al-Jazari era una mejora de la "Saqiya". El diseño clásico de la "Saqiya" es un mecanismo de tracción animal de dos engranajes de madera perpendiculares. Un animal se engancha al eje vertical de la rueda horizontal. El segundo engranaje acciona una rueda vertical con vasijas de arcilla sujetas a su circunferencia (rueda de vasijas). Al girar la rueda vertical, las vasijas se sumergen en el agua una a una y al llegar arriba el agua se vierte en una esclusa de madera. La mejora propuesta por Al-Jazari consiste en aprovechar la fuerza de una corriente de agua para impulsar el sistema. Como se puede observar no se elimina completamente la tracción animal del sistema de accionamiento, sino que diseña un sistema complementario para ayudar al animal. Así, en función del caudal de agua, el sistema puede ser totalmente autónomo, pero si el caudal no es suficiente durante periodos de sequía, el animal puede seguir accionando el sistema. La segunda mejora introducida por Al-Jazari es sustituir la rueda de vasijas por una cadena de botes con forma de ollas o macetas. La solución del sistema en cadena permitía el uso de "Saqiya" en lugares poco accesibles como los pozos, donde el diseño clásico no podía utilizarse. En la Figura 1 se muestra el dibujo incluido en el manuscrito, donde se observa que Al-Jazari intentó que el dibujo fuera lo más claro posible, mostrando el aspecto tridimensional de la máquina.

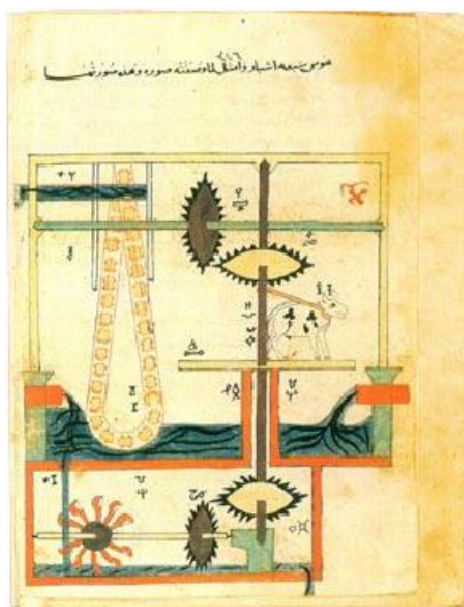


Figura 1: Dibujo de la bomba con sistema de cadena [3]

La cuarta bomba descrita por Al-Jazari se trata de un artefacto que utiliza una viga de canal hueca o un tubo con una cuchara en un extremo. El tubo oscila hacia adelante y hacia atrás gracias a un par de engranajes accionados por un animal y un sistema de manivela-deslizador. La cuchara del extremo del tubo se llena de agua cuando está en su punto más bajo y cuando se levanta, el agua puede fluir por el interior del tubo hasta el sistema de riego. En la Figura 2 se muestra el esquema con el diseño dibujado por Al-Jazari. La idea del tubo aquí es muy similar a la utilizada en las dos primeras bombas descritas. Esto demuestra que Al-Jazari utiliza diseños modulares y los mejora cada vez optimizando el proceso de diseño. Lo original de este invento es su idea de convertir un movimiento de rotación continua en uno oscilante mediante una inversión del mecanismo de manivela-deslizador. Varios historiadores (Hill 1998; Bertrand1969) consideraron este diseño como el primero en utilizar un mecanismo de manivela deslizante en una máquina. La solución adoptada por Al-Jazari probablemente no sea la mejor según nuestros conocimientos contemporáneos, pero este diseño abrió la puerta para el diseño de máquinas más complejas. La idea de tener una articulación del tipo pasador en ranura se utilizará de nuevo en su quinta invención.



Figura 2: Dibujo de la bomba con sistema de pasador [3]

La quinta bomba es la que se analiza más en detalle en este trabajo. Al-Jazari da un paso más en la conversión de los movimientos, diseñando una máquina que transforma el movimiento de rotación de una rueda de palas en un movimiento lineal de un pistón mediante un sistema de engranajes y eslabones. Esta máquina, una bomba de dos cilindros accionada por agua, representa el primer intento de utilizar la succión y la descarga para elevar el agua hasta cierta altura. Hasta entonces (siglo XII), todas las máquinas de elevación de agua se basaban en llenar algún tipo de recipiente y elevarlo para vaciarlo a la altura deseada. La máquina propuesta por Al-Jazari fue la solución al intento de forzar el agua a través de una tubería, lo que le permitió elevar el agua hasta alturas nunca antes alcanzadas con una máquina de tamaño relativamente pequeño. En la Figura 3 podemos observar el esquema de funcionamiento que se presenta en unas de las ediciones de la obra original.



Figura 3: Dibujo de la bomba de dos cilindros [3]

Tres son las principales novedades de este diseño:

1. El uso de la excentricidad para convertir el movimiento de rotación continua en un movimiento oscilante. Además, mediante una articulación de tipo pasador en ranura, Al-Jazari consiguió el movimiento alternativo necesario de los pistones.
2. El uso de válvulas como medio para permitir el proceso de succión y descarga de forma alternativa. Esta idea se sigue utilizando en máquinas contemporáneas para controlar las fases de aspiración y descarga.

3. El uso de una gran rueda hidráulica como accionamiento del mecanismo para que el sistema sea completamente autónomo. Algunos historiadores mencionan que Al-Jazari también utilizaba animales para accionar esta máquina, sobre todo durante las épocas de sequía.

2. Descripción y funcionamiento de la bomba alternativa

La bomba alternativa descrita por Al-Jazari se trata de una bomba de succión de doble acción con válvulas y movimiento alternativo de un pistón. Esta bomba incorpora mecanismos de dos máquinas anteriores: la rueda de palas de accionamiento de la noria, y la máquina de bombeo del sifón definido por Filón.

El objeto de esta bomba es elevar el agua desde un río para abastecer una comunidad o usarla para riego. En la Figura 4 se muestra el mecanismo de transmisión de movimiento de la bomba, con imágenes procedentes del modelado digital realizado.

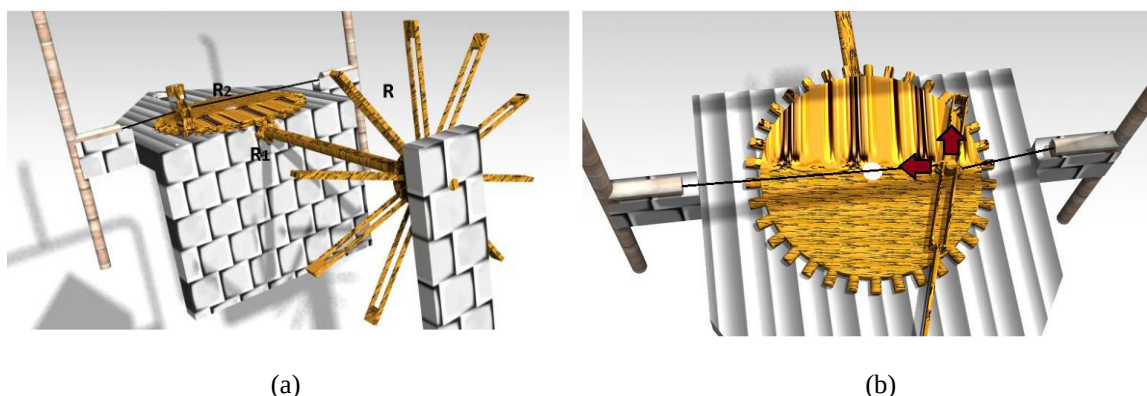


Figura 4: Transmisión de movimiento del mecanismo

El mecanismo se mueve de forma continua por la acción de una rueda de palas (R) sumergida en una corriente de agua, ya sea en el cauce de un río o un canal. La rueda mueve un eje en cuyo extremo se encuentra un pequeño engranaje (R1) que transmite el movimiento a otro engranaje mayor (R2) que rotará alrededor de un eje vertical. Sobre este engranaje se encuentra un tetón que desliza por la ranura de una corredera. A ambos lados de la corredera se encuentran dos bielas que unen la corredera con los dos pistones. Este mecanismo permite transformar el movimiento giratorio de la rueda de palas en un movimiento lineal alternativo que abre y cierra de forma simultánea los dos pistones.

El movimiento de ida del pistón genera una sobrepresión que permite elevar el agua contenida en la válvula impulsándola por la tubería. El movimiento de vuelta crea por el contrario una depresión que abre la válvula antirretorno permitiendo el llenado. En la Figura 5 se puede ver de forma esquemática los dos movimientos. Las tuberías de ambas válvulas acaban encontrándose formando una única tubería de abastecimiento. Los movimientos de succión-impulsión simultáneos permiten conseguir un caudal casi uniforme por la tubería de salida (Figura 6).

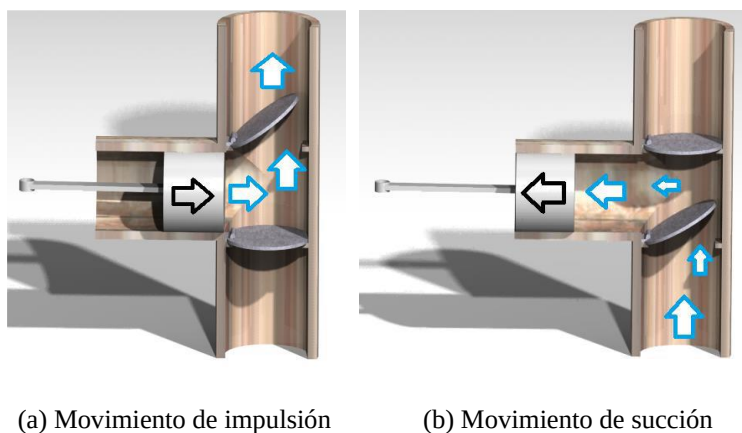


Figura 5: Movimientos de los pistones y las válvulas

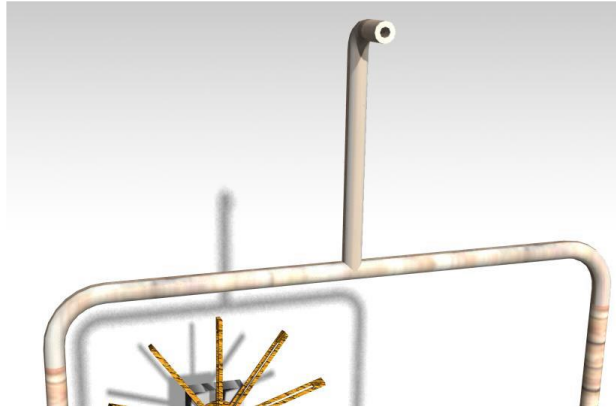
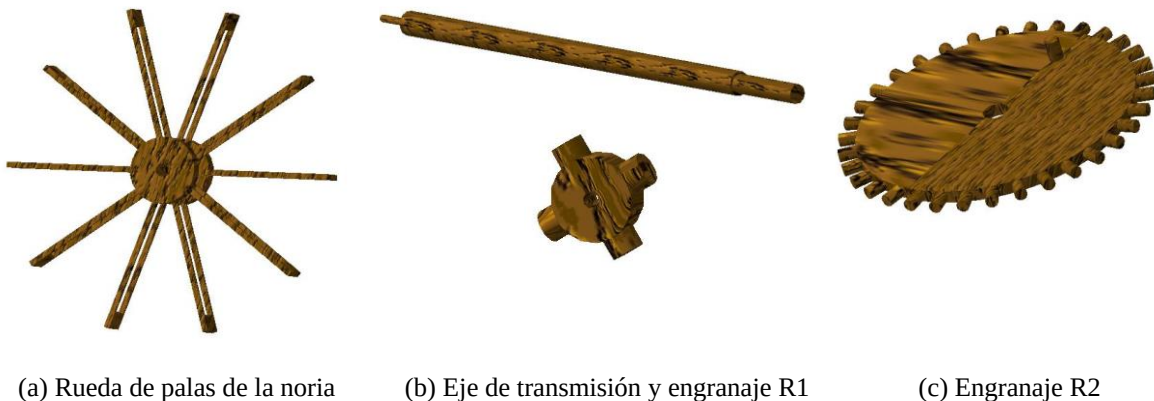


Figura 6: Unión de las tuberías en una única tubería de abastecimiento.

3. Modelado geométrico digital

El modelado digital se ha realizado usando el software de diseño CAD CATIA V5R21. Antes de realizar el diseño digital se realizaron dibujos esquemáticos del funcionamiento del mecanismo que fueron adaptados a la geometría digital siguiendo tres condicionantes: el tamaño máximo de pieza permitido por la impresora 3D a utilizar, las recomendaciones de las guías de diseño de piezas para fabricación mediante tecnología FFF, y las adaptaciones estéticas y funcionales para poder ensamblar las piezas del modelo físico. Para la elección del tamaño del mecanismo se ha tenido en cuenta las indicaciones dadas por Al-Jazari que afirma que la bomba era capaz de elevar el agua hasta una altura de 13,6 m. Se ha realizado una estimación del tamaño necesario de las piezas para que el pistón permita generar la presión necesaria para alcanzar dicha altura. Se ha estimado que para una corriente a 5 m/s la rueda de palas debería tener un diámetro de 3 m. Con estas premisas se diseñaron las distintas piezas para ser fabricadas a una escala aproximada de 1:40, lo que permitió que las piezas de mayor tamaño (las tuberías) pudieran tener una longitud de aproximadamente 200 mm.

Se empezó con el diseño de la rueda de palas de la noria, el eje de transmisión del movimiento y las ruedas de engranajes R1 y R2. El engranaje de mayor tamaño (R2) se diseñó con 34 dientes (uno cada $10,6^\circ$), un agujero central para insertar el eje de giro vertical, y un tentón para guiar el movimiento oscilante de la biela. Posteriormente se diseñaron la plataforma estática donde se unen los distintos elementos del mecanismo y las tuberías con sus accesorios (codos, empalmes y pistones). La última parte del mecanismo diseñado fueron las válvulas con un sistema de bisagras para simular el movimiento de apertura y cierre para los ciclos de succión e impulsión. En las Figuras 7 y 8 se muestran los diseños de las principales partes del mecanismo, representados a distintas escalas con el objetivo de que se aprecie su geometría. En la figura 9 se muestra el montaje final donde puede apreciarse la diferencia de tamaño de cada elemento.



(a) Rueda de palas de la noria

(b) Eje de transmisión y engranaje R1

(c) Engranaje R2

Figura 7: Diseño de elementos de movimiento rotatorio



Figura 8: Diseño de elementos de movimiento rotatorio

Sobre el diseño digital se tomaron algunas licencias estéticas de diseño para mejorar el funcionamiento de los engranajes y para que el origen islámico del mecanismo sea más reconocible. En la figura 9 se puede ver el resultado final montado del diseño digital.

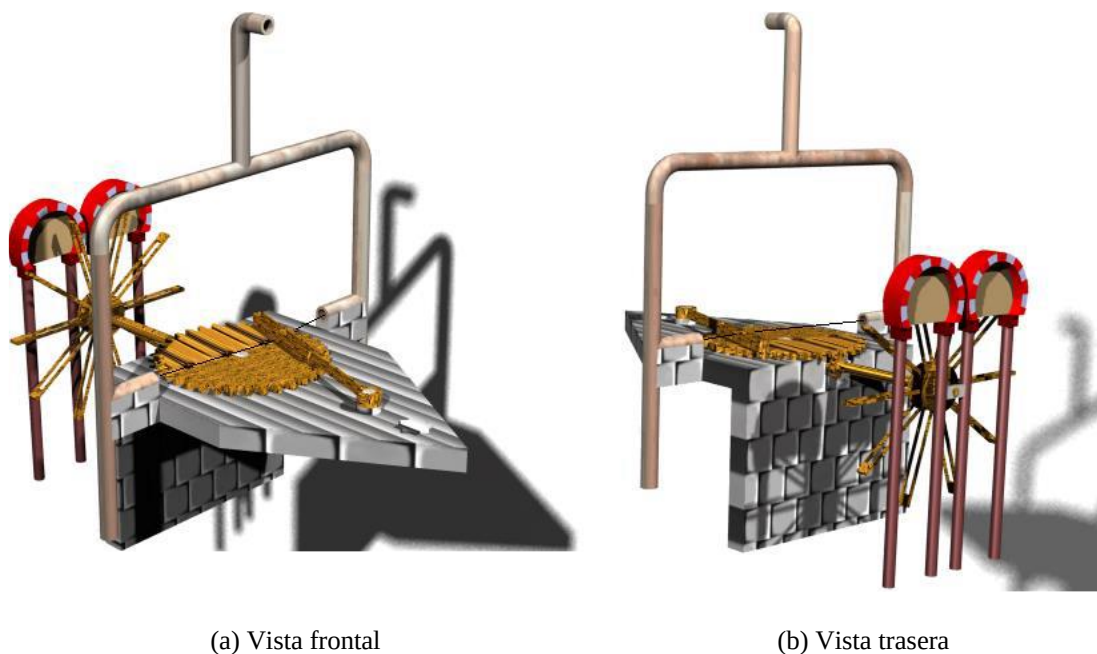


Figura 9: Diseño digital de la bomba de succión de Al-Jazari

4. Fabricación y montaje

4.1. Proceso de fabricación de piezas

La totalidad de las piezas se han fabricado utilizando la tecnología de fabricación aditiva FFF (Fabricación por Filamento Fundido), también conocida por sus siglas en inglés FDM (Fused Deposition Modeling). Esta tecnología es muy popular y permite la reproducción física de modelos digitales de forma directa, rápida y económica. La tecnología FFF se basa en la deposición por capas de un filamento de un material termoplástico que es fundido por un extrusor que sigue una trayectoria determinada. La trayectoria seguida por el extrusor determinará la geometría de la pieza fabricada. En este trabajo las piezas se han realizado usando una impresora FFF de bajo coste, la Ender 3 de Creality. Como termoplástico se ha

utilizado un PLA estándar de SmartMaterials. El PLA es un termoplástico de origen vegetal que es muy usado en la tecnología FFF por su facilidad de procesado, su bajo coste y su carácter reciclable y biodegradable. Por último, se ha utilizado el software seccionador y de gestión de impresión Ultimaker Cura. Este software permite configurar la posición de las piezas, establecer los valores de los parámetros del proceso de fabricación, y realizar una simulación del proceso obteniendo informaciones clave como el tiempo de procesado y la cantidad de material consumida. Una vez configurado, el software proporciona el código con el movimiento que seguirá la impresora para la fabricación de la pieza. Para la fabricación de las piezas se han usado los parámetros recomendados por el fabricante, ya que el PLA es un material que no suele dar problemas y no necesita condiciones exigentes de impresión. El proceso de fabricación de cada pieza ha seguido el esquema clásico de la fabricación aditiva para convertir diseños digitales en piezas físicas, el cual se muestra en la Figura 10 [4].

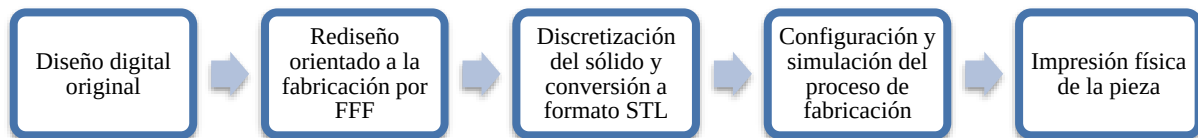
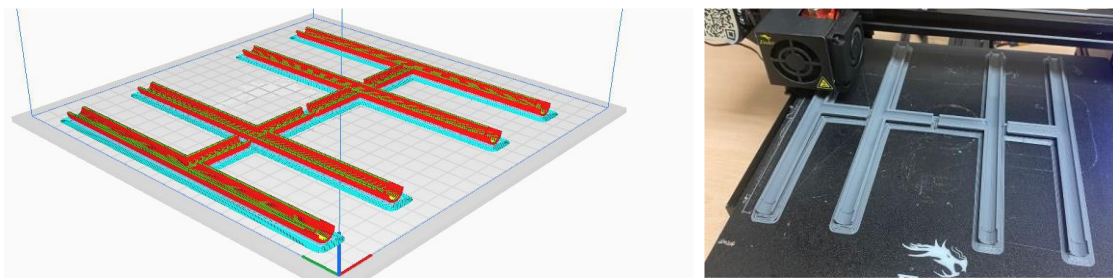


Figura 10: Esquema del proceso de fabricación de las piezas

Para poder optimizar el proceso de fabricación de algunas de las piezas hubo que modificar ligeramente su diseño digital. Por ejemplo, la plataforma de unión fue dividida en dos piezas para poder fabricarlas

sin la generación de soportes de impresión, que aumentaban el tiempo de fabricación considerablemente. De igual manera, las piezas huecas, como las tuberías y los empalmes, tuvieron que ser imprimidas en dos mitades para evitar la aparición de material de sujeción de difícil eliminación en su interior. También se modificó el diseño para añadir salientes y conicidades a las zonas de unión entre piezas para facilitar su posterior montaje. En la figura 10 se pueden observar una imagen de la configuración del proceso con el software Cura y del proceso de fabricación con la impresora Ender 3.



(a) Configuración y simulación del proceso de fabricación

(b) Impresión 3D

Figura 11: Diseño digital de la bomba de succión de Al-Jazari

Tras su fabricación las piezas se sometieron a trabajos de posprocesado. Estos consistieron en la eliminación del material de soporte generado durante la fabricación y en el lijado de las zonas de ensamblaje de las piezas. Las piezas fabricadas con FFF presentan un característico acabado rugoso debido al efecto escalera provocado por la superposición de las capas de polímero fundido. Esta rugosidad afecta al ensamblaje de las piezas por lo que es necesario un ligero lijado superficial de las zonas de unión.

4.2. Proceso de montaje

Una vez terminadas las piezas se fueron uniendo utilizando un adhesivo de cianocrilato de rápido secado, bastante eficaz para la unión de piezas de PLA. Tras el montaje de las piezas se procedió al pintado del mecanismo para que quedara más atractivo estéticamente. Antes del pintado, para que la pintura se quede adherida y no se despegue, se les aplicó a las piezas una capa imprimación de secado rápido para plástico. En la figura 12 se puede observar la reproducción física de la bomba una vez terminada.

La reproducción fabricada es cuasi funcional, ya que reproduce los movimientos del eje y los engranajes, así como del mecanismo de corredera. Pero no reproduce el movimiento de los pistones y las válvulas por tamaño y por que las tuberías no son estancas y no permiten la succión e impulsión de agua.



Figura 12: Reproducción física a escala de la bomba alternativa

5. Conclusiones

Las nuevas tecnologías, como el modelado digital o la fabricación aditiva, nos permiten vincular el conocimiento del pasado con la actualidad. Los escritos antiguos sobre mecánica no siempre describen las máquinas y mecanismos de una manera precisa, pero la tecnología actual nos permite interpretar dichos escritos para mostrar sus contenidos de una manera precisa y atractiva que mejora su comprensión y difusión. La reconstrucción digital o física de mecanismos históricos tiene un gran valor pedagógico para las generaciones actuales de ingenieros mecánicos, ya que el conocimiento de los orígenes de ciertas máquinas pueden llevarnos al desarrollo de nuevas ideas.

Respecto a la metodología utilizada para la reproducción física de la bomba, se ha puesto de manifiesto la eficacia de la misma. Con una impresora de bajo coste se ha podido fabricar una reproducción casifuncional de un mecanismo antiguo sin tener datos técnicos del mismo, simplemente con una breve descripción funcional. De la misma manera los softwares CAD y CAM han permitido la reproducción digital de todo el mecanismo y el control y configuración del proceso de fabricación de las piezas. Además, estos softwares facilitan el proceso de rediseño y ajuste geométrico de las piezas antes de su fabricación con el consiguiente ahorro de tiempo y dinero.

Por último, hay que poner en valor la figura de Al-Jazari como uno de los ingenieros mecánicos más importantes de la Edad Media. Sus diseños de bombas de elevación de agua le otorgaron el sobrenombre de “El Maestro del Agua”, título que sin duda tiene merecido a tenor de la originalidad e innovación de algunos de sus diseños.

6. Referencias

- [1] Hill, P. *The Book of Knowledge of Ingenious Mechanical Devices: (Kitāb fī ma'rifat al-ḥiyal al-handasiyya)*. Springer Science & Business Media (2012)
- [2] Dirik, M. “Al-Jazari: The Ingenious Inventor of Cybernetics and Robotics”. *Journal of Soft Computing and Artificial Intelligence* 1, 47-58 (2020)
- [3] Romdhane, L., Zeghloul, S. “Al-Jazari (1136–1206)”. *Distinguished Figures in Mechanism and Machine Science. History of Mechanism and Machine Science*, vol 7. Springer, Dordrecht. (2009).
- [4] Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer. (2010).
- [5] Short, D. B. “Use of 3D printing by museums: Educational exhibits, artifact education, and artifact restoration”. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 4(2), 209–215 (2015).
- [6] Lipson, H., Moon, F. C., Hai, J., & Paventi, C. “3-D printing the history of mechanisms”. *Journal of Mechanical Design*, 127, 1029–1033 (2005).