



Evolución histórica y repercusión como patrimonio industrial de las herrerías. Explicación con la Herrería de Compludo

Higinio Rubio Alonso¹, Alejandro Bustos Caballero², Cristina Castejón Sisamón³, Eduardo Carral Abad⁴,
María Jesús Gómez García⁵, Juan Carlos García Prada⁶

¹ MAQLAB, Dpto. Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid, España, email: [hrubio@ing.uc3m.es](mailto:h Rubio@ing.uc3m.es)

² MAQLAB, Dpto. Mecánica. Universidad Nacional de Educación a Distancia, España. email: albustos@ind.uned.es

³ MAQLAB, Dpto. Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid, España, email: castejon@ing.uc3m.es

⁴ MAQLAB, Dpto. Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid, España, email: ecorral@ing.uc3m.es

⁵ MAQLAB, Dpto. Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid, España, email: mjggarci@ing.uc3m.es

⁶ MAQLAB, Dpto. Mecánica. Universidad Nacional de Educación a Distancia, España. email: jcgprada@ind.uned.es

Con el inicio de la escritura y de la metalurgia comienza la protohistoria. Así, podemos afirmar que la forja de los metales fue uno de los hechos determinantes que significó el cambio desde las comunidades prehistóricas a las primeras sociedades de la historia antigua. La necesidad del tratamiento térmico y mecánico de los metales para la elaboración de los utensilios mecánicos repercutió en que el trabajo de herrero fuera una de las profesiones más antiguas que se conocen y, consecuentemente, que las herrerías representen uno de los casos de instalación industrial más antiguos. En la actualidad, cada vez es más frecuente ver antiguas instalaciones utilizadas para actividades industriales convertidas en centros de divulgación de la industria o la ciencia. Transmitir el conocimiento inherente a este “Patrimonio Industrial” es muy importante para reflejar cómo han ido evolucionando estas industrias. La Herrería de Compludo es un ejemplo de herrería antigua, de la era pre-industrial. La instalación es Monumento Nacional desde 1968 y, en ella, se conservan en funcionamiento un martillo pilón activado por una rueda hidráulica, un horno de fragua que emplea una trompa de agua para proveerse de aire a presión y un sistema de canales hidráulicos que derivan el agua de un río cercano a la rueda hidráulica y a la trompa de agua. Hoy se puede disfrutar de una visita guiada por la Herrería de Compludo donde el herrero de la misma hace de guía y transmite al visitante las particularidades de la historia y funcionamiento de la herrería y efectúa una demostración práctica. En este artículo se realizará un estudio de la evolución histórica de las herrerías y su repercusión como patrimonio industrial. También se describirá detalladamente la historia, la composición y el funcionamiento de la Herrería de Compludo y, tras un análisis minucioso de la misma, se propondrán una serie de nuevos materiales que aporten una mejor visión de la herrería, como la fabricación con impresión 3D de una maqueta del sistema rueda hidráulica-mazo-yunque y la generación de materiales multimedia para su utilización en sistemas de realidad virtual y realidad aumentada.

1. Introducción

Desde que en el año 1978 se creó el TICCIH (The International Committee for the Conservation of the Industrial Heritage), en la III Conferencia internacional sobre la Conservación de Monumentos Industriales, celebrada en Suecia [1], cada vez es más frecuente ver antiguas instalaciones que fueron utilizadas para actividades industriales convertidas en museos, instituciones culturales o centros de divulgación de la industria o la ciencia. Este “Patrimonio Industrial” es muy importante arqueológicamente, tanto por los inmuebles como por el mobiliario.

Se considera Patrimonio Industrial a todo tipo de edificaciones antiguas con fines industriales, como estaciones de tren, centrales de producción de energía, fábricas textiles, factorías azucareras, instalaciones mineras o altos hornos. También otras edificaciones antiguas de menor tamaño, como almazaras, molinos de viento, molinos de agua, aserraderos o herrerías, son objeto de Patrimonio Industrial y ayudan a dar una visión histórica y práctica de los procesos industriales antiguos, a observar sus formas, a comprender su funcionamiento y a conocer las soluciones técnicas que se empleaban para conseguir el uso industrial.

Como en los recintos museísticos de obras artísticas o históricas, la forma clásica de divulgar el Patrimonio Industrial en las propias instalaciones es con guías turísticos, amplios manuales o audio-guías, que informan al visitante sobre la actividad de esa industria y la función y composición detallada de cada máquina o estructura.

Como bien conocemos los que visitamos con asiduidad exposiciones, museos o recintos arqueológicos, para revitalizar su oferta, cada vez más se introducen actividades que utilizan las nuevas tecnologías y ayudan a comprender las obras expuestas y hacer más entretenida la experiencia [2].

Nuevas tecnologías como proyecciones a 360 grados (incluidos efectos sonoros, de movimiento u olfativos), experiencias con realidad virtual, áreas metaverso, proyecciones holográficas, acceso a entornos de realidad aumentada o mixta, manejo de maquetas realizadas con impresión aditiva 3D, ... Son algunas de las nuevas tecnologías cuya misión es facilitar la labor de observar, comprender y entretener.

Si ya han sido bienvenidas estas nuevas tecnologías en la divulgación de las obras del Patrimonio Artístico o Histórico, tendrá mayor justificación su uso en la difusión de las instalaciones del Patrimonio Industrial, todas ellas con un claro fundamento tecnológico [3].

Precisamente, en las visitas guiadas en instalaciones industriales, las tareas de mostrar el contenido, comprender el funcionamiento de las máquinas y, a la vez, entretener, no resulta sencillo. Sobre todo, cuando se quieren generalizar estas visitas para todo tipo de público. Estas nuevas herramientas tecnológicas ayudan a cumplir esta misión de entretenimiento y, además, son muy didácticas.

En este trabajo se pretende demostrar que la aplicación de alguna de estas nuevas tecnologías a una instalación del Patrimonio Industrial, enriquece grandemente la experiencia de una simple visita guiada.

La instalación elegida para aplicar estas nuevas tecnologías es la Herrería de Compludo, Monumento Nacional de España, desde 1968 [4]. En la actualidad, se puede disfrutar de una visita guiada por el herrero de la Herrería de Compludo. En este trabajo se propone complementar esa actividad clásica con otras actividades, basadas en nuevas tecnologías, que enriquezcan las explicaciones sobre la historia y el funcionamiento de la herrería, resultando la visita a la Herrería una experiencia más amena y entretenida.

Para lograr este propósito, en este trabajo se pretende hacer una revisión histórica de las herrerías en su concepción pre-industrial y particularizar en un análisis detallado del funcionamiento mecánico de la Herrería de Compludo y, con esa información, fabricar una maqueta del sistema rueda hidráulica-mazo-yunque, con impresión aditiva 3D [5] y generar materiales multimedia para su posible utilización en sistemas de realidad virtual y realidad aumentada.

2. Las herrerías en la historia

Durante miles de años, las herrerías fueron elementos básicos de cualquier población, el herrero era un personaje fundamental de cualquier pueblo pues él era el encargado de suministrar, al resto de vecinos, equipos y herramientas imprescindibles para el desarrollo de los trabajos o las actividades de la vida en un ámbito civilizado. Cuando llega la Primera Revolución Industrial, las fábricas y su producción masiva redujeron considerablemente la demanda de las herramientas elaboradas por los herreros, excepto en algunas zonas de África y Asia, lugares donde aún se mantienen estos técnicos y artesanos tradicionales.

Como se ha comentado, la aparición de las herrerías y los herreros se remonta a las primeras civilizaciones y su importancia se refleja en el hecho que mitologías antiguas tenían a dioses de su panteón que eran herreros (Hefesto, en la mitología griega y Vulcano en el panteón romano).

El advenimiento de las herrerías es anterior al descubrimiento del hierro y la fabricación de herramientas de hierro pues ya, antes, los herreros trabajaban otros metales ya conocidos. El hierro lo descubren los Hititas y comienzan a elaborar herramientas de hierro alrededor del 1200 a.C. y su utilización se extiende rápidamente. Son conocidas

herramientas de hierro más antiguas, por ejemplo, dagas egipcias de 4000 años de antigüedad, pero están realizadas con hierro de meteoritos.

El combustible usado en las fraguas de las herrerías era el carbón vegetal. El carbón vegetal presenta un alto contenido de carbono no volátil y alta resistencia mecánica, siendo un agente reductor eficaz que minimiza las impurezas en el metal y mejora la calidad del hierro o del acero. El uso como combustible del coque o del carbón mineral no llegó a las herrerías hasta el siglo XVIII, pero siempre con la precaución de que el carbón esté libre de azufre porque si no el hierro o acero resultante no adquiriría las propiedades plásticas adecuadas.

Los herreros romanos, chinos o medievales, ocupaban su tiempo calentando y martilleando el hierro antes de forjarlo y fabricar productos elaborados. Estos herreros no eran conocedores de la química de la metalurgia, pero sabían que la calidad del hierro mejoraba así. La atmósfera reductora de la fragua ayudaba a la eliminación del oxígeno (óxido) y facilitaba la absorción de más carbono en el hierro, consiguiendo aceros cada vez mejores según continuaba el proceso.

En lo que respecta a restos arqueológicos, quedan muy pocos instrumentos de hierro de épocas pasadas, debido a la pérdida por corrosión y a la reutilización del hierro para producir nuevos artefactos.

2.1. El martillo de forja.

La incorporación a las herrerías del martinete, martillo pilón, martillo percutor o martillo de forja fue un gran adelanto pues este aparato utilizaba la energía hidráulica para el trabajo de forja. El martillo pilón consiste en un martillo pesado que cae sobre un yunque dispuesto sobre un poyo o asiento de madera. El martillo está montado sobre una palanca oscilante alrededor de un eje horizontal y es accionado por unas levas insertadas en un árbol de levas horizontal. El extremo libre de la palanca se apoya en el conjunto de levas y, a cada vuelta del árbol, eleva y deja caer el martillo, tantas veces como levas. El árbol de levas está accionado por una noria hidráulica vertical. El funcionamiento es irregular y la velocidad de giro se controla mediante la variación de la cantidad de agua caída que hace girar la rueda.

El martillo percutor es un invento chino que llegó a Europa alrededor del siglo XII. Aunque hay un pasaje de la Historia Natural de Plinio donde indicaba que los sistemas de morteros accionados por agua se habían generalizado en la Italia del siglo I d.C., algunos historiadores señalan que la interpretación del texto no es correcta. Puede que los romanos utilizaran martillos percutores para la molienda de minerales pero que no hay evidencias arqueológicas, más allá de ciertos yunques de piedra muy deteriorados, aparecidos en España [6] y otros países [7]. Lo cierto es que no hay certeza del uso de martinetes hidráulicos en Europa en tiempos de los romanos ni se vuelve a citar la existencia de martillos accionados por agua en otro texto europeo durante más de 1000 años.

En la antigua China, el martillo de percusión evolucionó a partir del empleo del mortero y el almirez, lo cual dio lugar al martillo basculante accionado por pedal [8], cuyos orígenes se remontan a la dinastía Zhou (1050 a. C.-221 a. C.). Los martillos de percusión se utilizaban en China desde el año 40 a.C. (dinastía Han, 206 a.C.-220 d.C.) o incluso antes (en la dinastía Zhou, 1050 a.C.-221 a.C.) y funcionaban accionados por una rueda hidráulica [9].

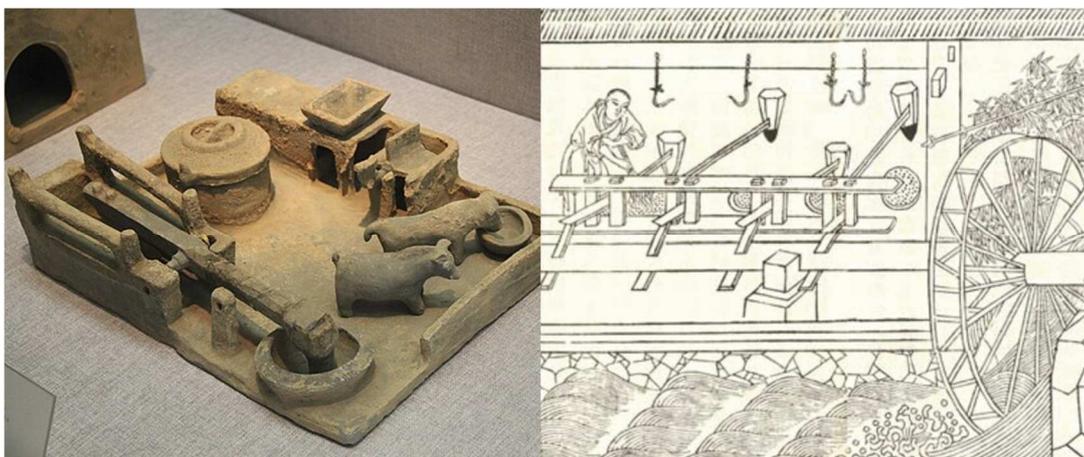


Figura 1: (Izquierda) Fotografía de una cerámica funeraria china, de la dinastía Han. (Derecha) Representación de una batería de martillos percutores [10].

Los primeros textos que describen el martillo pilón son el diccionario Jijiupian del 40 a. C.; el documento de Yang Xiong conocido como Fangyan (del 15 a.C.); y el Xin Lun, escrito por Huan Tan alrededor del 20 d.C. [9]. Durante el siglo III d. C., un alto funcionario del gobierno, el ingeniero Du Yu, estableció el uso de baterías combinadas de martillos que empleaban varios ejes de accionamiento que estaban organizados para funcionar con una gran rueda hidráulica [9]. En varios museos también pueden verse representaciones de martillos de percusión en modelos de cerámica funeraria de la dinastía Han (Figura 1). Desde entonces hasta la Edad Media, aparecen

muchos más textos de China donde se refiere al uso del martillo percutor en diferentes ámbitos. La primera representación ilustrada de una batería de artefactos de martillo pilón aparece detallada por Wang Zhen, en el libro Nong Shu [10], alrededor de 1.313 d.C. (Figura 1).

No hay pruebas del uso de martillos percutores hidráulicos en Europa hasta el siglo XII, donde aparecen referidos en escritos aparecidos en Francia y Austria. Documentos encontrados en la abadía de Clairvaux (Francia), datados en 1135, atestiguan la utilización de martinetes por parte de los monjes cistercienses [11]. A su vez, Needham [12] detalla que hay documentos medievales franceses de los años 1116 y 1249 que registran el uso de martillos percutores mecanizados para fabricar hierro forjado y también hay textos medievales aparecidos en Estiria (Austria), uno escrito en 1135 y otro en 1175. Arqueológicamente se ha verificado que, en la abadía cisterciense de Fontenay (fundada en 1118), en la región de Borgoña (Francia), poseía una fragua con martillo pilón hidráulico construida a finales del siglo XII.

A partir del siglo XIII son muchas las referencias al uso de martillos hidráulicos en Europa, accionados por ruedas hidráulicas verticales, a diferencia de la mayoría de los referenciados en la antigua China que utilizaban una rueda hidráulica horizontal. En el siglo XV ya está consolidado el empleo del martillo de forja en las fraguas de toda Europa y es común ver sus principios técnicos en diferentes representaciones de la época, por ejemplo, en los códices de Leonardo da Vinci (Figura 2).

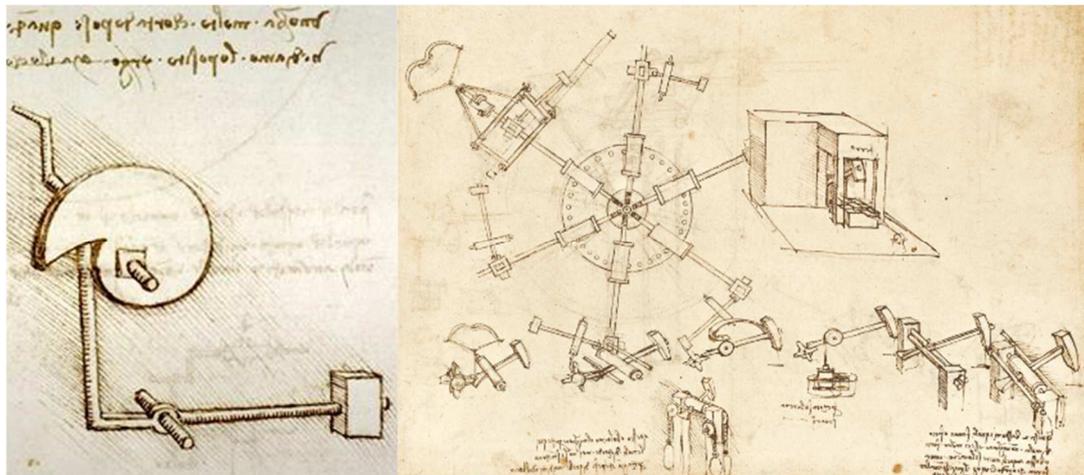


Figura 2: Dibujos de Leonardo da Vinci. (Izquierda) Una leva accionando un martillo, del Códice Madrid I. (Derecha) Una batería de seis martillos percutores automáticos, del Códice Atlántico.

Sin embargo, la litografía más antigua conocida de un martillo pilón de forja es la que aparece en la Historia de Gentibus Septentrionalibus, de Olaus Magnus (datada en 1555) [13]. En la citada representación se muestra una escena de un herrero en una fragua, con tres martillos de forja y cuatro ruedas hidráulicas verticales, tres activando los martillos y la cuarta operando el fuelle del horno (Figura 3).

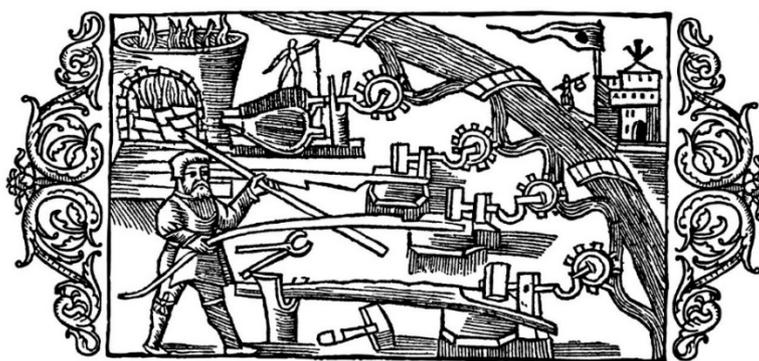


Figura 3: Litografía de la Historia de Gentibus Septentrionalibus (1555), de Olaus Magnus [13]. Representación de una herrería con tres martillos de forja.

3. La Herrería de Compludo

Desde hace miles de años, el hombre se ha preocupado del tratamiento de los metales para la fabricación de diferentes tipos de utensilios mecánicos que facilitaban la vida de las personas. Por esto, el herrero es una de las profesiones más antiguas y su función fue imprescindible para el nacimiento y desarrollo de la civilización humana. Consecuentemente, las herrerías son uno de los tipos de instalación industrial más antiguo conocido.

Las herrerías son instalaciones donde se forjan los metales, especialmente el hierro, de ahí su nombre. El trabajo del hierro requiere un fuerte tratamiento térmico y mecánico, por lo que se idearon diferentes soluciones para proporcionar sistemas de elevada capacidad mecánica y térmica.

La Herrería de Compludo (Figura 4) es un ejemplo de herrería antigua, de la era pre-industrial [14]. La instalación está situada en un paraje de monte, próxima al Camino de Santiago y cercana a Ponferrada (León), en el noroeste de España. La Herrería de Compludo es Monumento Nacional desde 1968 [4].

Una proto-instalación de la Herrería de Compludo se remonta a los inicios del monacato en España (aproximadamente, siglo VII de nuestra era), asociada a los Monasterios de Compludo o de San Pedro de Montes. Se conoce de la existencia de la Herrería de Compludo durante la Época Medieval pero la edificación actual es del siglo XIX [14].

En la Herrería de Compludo (Figura 4) se conservan, en funcionamiento, un mazo o martillo pilón activado por una rueda hidráulica, un horno de fragua donde se utiliza una trompa de agua que suministra aire comprimido y el sistema de canales hidráulicos que derivan el agua del río Meruelo a la rueda hidráulica y a la trompa de agua y, de nuevo, al río. La Herrería de Compludo es única para apreciar los ingeniosos métodos usados para facilitar el trabajo del herrero, mediante el aprovechamiento del agua, tanto moviendo la rueda motriz y avivando las llamas en los procesos que se detallarán posteriormente, como los dispositivos de guía y tope del martillo pilón o la lubricación de los cojinetes.



Figura 4: Fotografía del interior de la Herrería de Compludo.

En la Figura 5 se pueden observar las diferentes estancias del edificio de la Herrería de Compludo y los diferentes componentes que participan en los sistemas hidráulico y mecánico.

3.1. Funcionamiento de la Herrería

El agua empleada en la Herrería es recolectada de una represa (presa o azud) del río, aguas arriba, y conducida mediante un canal a un reservorio, de donde se recoge el agua utilizada para impulsar la rueda hidráulica de palas y comprimir el aire en la trompa.

Una primera compuerta accionada desde el interior de la Herrería, mediante un sistema de palancas, permite controlar la cantidad de agua que incide sobre los alabes del rodezno, una rueda hidráulica o turbina rudimentaria. Este sistema permite regular la velocidad del martillo pilón, según la cantidad de agua descargada el rodezno adquirirá más o menos velocidad de giro. El eje de la rueda hidráulica está formado por un largo árbol soportado por dos cojinetes primarios. En el medio del árbol están insertados cuatro prominencias o lóbulos, como si fuera un engranaje de cuatro dientes. Este sistema de lóbulos accionadores, funcionando como un árbol de levas, transmiten el movimiento al martillo pilón, transformando el movimiento de giro del árbol en otro de elevación y caída súbita del mazo, provocando que el extremo del mazo golpee el yunque con la fuerza necesaria para poder realizar los trabajos propios de la forja.

Para una buena operatividad del sistema mecánico se cuidan aspectos tan importantes como la lubricación de los cojinetes, lo cual se realiza con un chorrillo de agua, sobrante de la impulsión de la turbina, canalizado con un sencillo conducto.

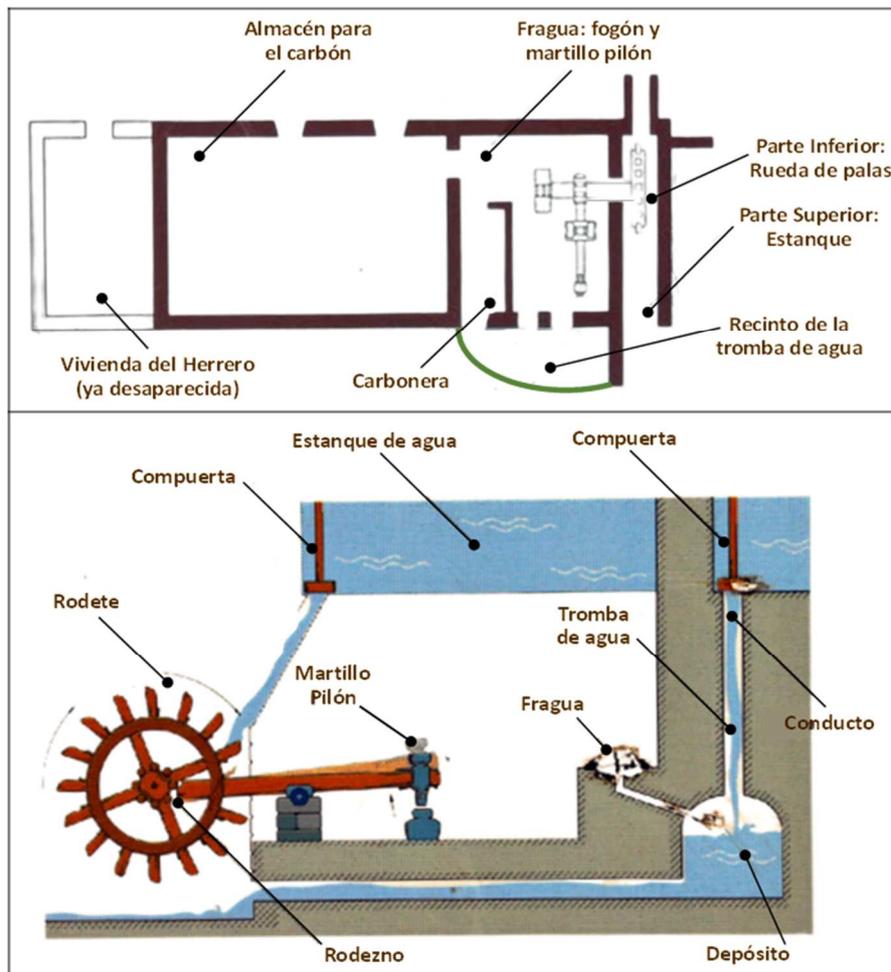


Figura 5: Arriba, representación de las diferentes partes del edificio de la Herrería de Compludo. Abajo, diagrama esquemático de los diferentes componentes que participan en los sistemas hidráulico y mecánico.

Para avivar el fuego y conseguir mayor temperatura en las brasas de la fragua, no se emplea fuelle ni atizador, sino aire comprimido contenido en un receptáculo o depósito de un sistema de trompa hidráulica. Un mecanismo permite abrir y cerrar el obturador de un tubo que conecta con el depósito y permite suministrar aire presurizado en las brasas al gusto del herrero.

Como en el caso de la rueda de palas, una segunda compuerta accionada desde el interior de la Herrería mediante un sistema de palancas permite captar el agua del canal y que esta caiga por un tubo (un tronco de árbol hueco), a modo de trompa hidráulica. Para que este sistema funcionase se necesitaba un salto de agua de unos 5 metros.

El aire comprimido se genera en la trompa hidráulica por el efecto de la caída por gravedad de agua por un conducto vertical, con una cantidad importante de aire disuelto en el agua. En la parte alta del tubo hay dos orificios por los que el aire es aspirado dentro del tubo, por efecto Ventury. El aire arrastrado por el agua, cuando llega a una cavidad excavada en la roca (que funciona como depósito o cámara de separación) se separa del agua y queda atrapado y comprimido, alcanzando mayor presión cuanto más agua va cayendo. Hay una salida de agua del depósito, a través de un sifón, que retorna el agua al río.

4. Análisis y modelado del dispositivo mecánico

En este apartado se realiza un análisis de cada subconjunto mecánico de la Herrería de Compludo y, particularmente, de las piezas más significativas y se presenta el modelo CAD creado.

Como ya se ha comentado, la Herrería de Compludo consiste en un mazo o martillo pilón activado por una rueda de palas hidráulica, y un horno de fragua donde se utiliza una trompa de agua para suministrar aire comprimido al fogón. El dispositivo mecánico de la Herrería de Compludo, está formado por dos subconjuntos: la rueda de palas o turbina hidráulica y el martillo pilón. El mecanismo de la turbina hidráulica y el martillo pilón se modelaron, de manera realista, utilizando un software avanzado de CAD. Las dimensiones de los elementos fueron medidas in situ, en la propia Herrería de Compludo. Para facilitar su modelado, cada subconjunto se dividió, a su vez, en cuatro partes, resultando ocho elementos o subsistemas (Figura 6 y Tabla 1).

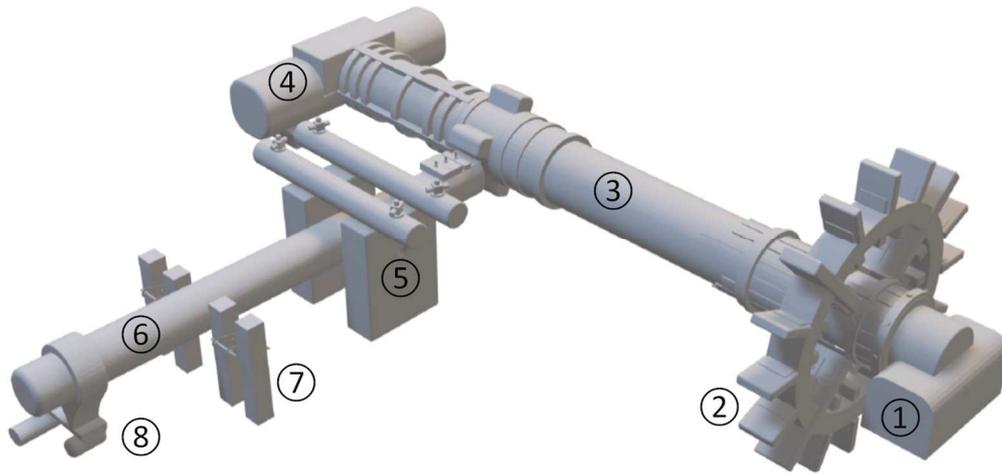


Figura 6: Representación de los diferentes subsistemas mecánicos del dispositivo de martillo pilón de la Herrería de Compludo.

Tabla 1: Subsistemas mecánicos del dispositivo de martillo pilón de la Herrería de Compludo.

Nº elemento	Descripción
1	Sistema de apoyo del eje-leva, lado turbina
2	Turbina o rueda de palas
3	Conjunto eje-leva
4	Sistema de apoyo del eje-leva, lado interior
5	Sistema de apoyo del martillo pilón
6	Martillo pilón
7	Guía del martillo pilón
8	Yunque

El conjunto final del modelo 3D del dispositivo son los ocho subsistemas mecánicos que, a su vez, están formados por 36 piezas distintas. En la Figura 6 se puede apreciar una representación gráfica, en vista isométrica, del modelo 3D del dispositivo, cuyos elementos se describen en la Tabla 1.

Las capacidades en el diseño de elementos mecánicos y relaciones entre conjuntos de elementos permiten una representación fiel de los componentes del dispositivo mecánico de la Herrería de Compludo, así como la simulación del funcionamiento o el explosionado del conjunto mecánico.

A continuación, se explican algunos detalles de cada uno de los componentes que forman el dispositivo mecánico de la Herrería de Compludo:

4.1. Rueda de palas o turbina hidráulica

La rueda de palas o turbina hidráulica de la Herrería de Compludo es una máquina diseñada para transformar la energía generada por la caída de un determinado caudal de agua que golpea las palas de la rueda, en energía cinética de la rueda, produciendo un movimiento de rotación el cual es transferido a través de un eje.

La turbina hidráulica de la Herrería de Compludo es un dispositivo eficiente de acción, con eje horizontal y dirección del flujo tangencial. Comparada con los modelos actuales de turbinas, se asemejaría a una turbina Pelton.

El rodete consiste en un rotor equipado con un sistema de 16 palas o álabes fijados a una rueda motriz. La rueda motriz está firmemente unida al eje a través de chavetas y anclajes, asegurando una conexión rígida y estable. Los álabes son las piezas independientes que reciben el empuje directo del fluido. Este diseño permite que los álabes desvíen el flujo de agua de manera eficiente y facilita el mantenimiento y la posible reparación, ya que permite sustituir cada pieza individual sin necesidad de reemplazar todo el rodete.

4.2. Conjunto eje-leva

El eje actual de la turbina es un tronco de nogal de 7,8 metros, al cual se encuentran acoplados el resto de los componentes de la turbina hidráulica. El eje de la turbina tiene alojado un sistema de leva y, en los extremos del eje, hay dos muñones que funcionan como gorriones de cojinete.

El sistema de leva está constituido por un artefacto anular con cuatro prominencias o lóbulos. A medida que la turbina gira, las prominencias de la leva actúan secuencialmente sobre una placa insertada en el extremo del

rodezno o mazo, en el lado opuesto al martillo. El diseño del perfil de los lóbulos de la leva está pensado para que la elevación del mazo se realice suavemente pero el retorno se efectúa bruscamente, provocando, por efecto de la fuerza de la gravedad, una caída súbita del martillo sobre el yunque, golpeándolo con intensidad. Este ciclo se repite tantas veces como sea necesario, aprovechando la energía hidráulica para transformar el movimiento rotatorio de la turbina en una potente percusión, esencial para ejecutar los trabajos de forja en la herrería.

4.3. Cojinetes

En la turbina hidráulica de la Herrería de Compludo, dada su antigüedad y condiciones de funcionamiento, se utilizan cojinetes lisos o de fricción. Estos cojinetes permiten el movimiento giratorio del eje en relación con los soportes y son componentes esenciales en el sistema tribológico, donde su buena lubricación es responsable de minimizar la fricción y el desgaste.

Estos cojinetes, soportan el movimiento de rotación del eje de la turbina, tienen forma cilíndrica, no contienen partes móviles, requieren un área de contacto considerable (por las elevadas cargas) y los extremos del eje hacen la función de gorriones que están alojados en los manguitos de los sistemas de apoyo. Los sistemas de apoyo son composiciones fijas muy robustas que deben soportar una carga significativa.

Los cojinetes están lubricados con agua, para reducir las pérdidas por rozamiento. El cojinete del lado de la turbina aprovecha el agua que entra por la compuerta que activa el rodete y el cojinete del lado interior está lubricado mediante una canalización de madera que lleva el agua desde la zona de la turbina al cojinete.

Además de los cojinetes de la turbina, también hay cojinetes en el martillo pilón que permiten el movimiento de giro del mazo cuando la leva lo activa. En el rodezno del martillo hay insertado un dispositivo anular o abrazadera con dos muñones, colocados en horizontal y que hacen la función de gorriones de los cojinetes. Estos cojinetes están soportados por el sistema de apoyo del martillo pilón y no llevan un sistema de lubricación permanente.

4.4. Martillo pilón

El actual martillo pilón de la herrería de Compludo es un tronco de madera de roble, de 4,85 metros de largo, de hasta 60 cm de diámetro y tiene alrededor de 600 Kg de masa. El mazo golpea el yunque a una velocidad que puede alcanzar los 180 golpes por minuto, cuando la compuerta se fija en su máxima apertura.

El rodezno dispone de una placa de golpeo, localizada en la zona donde la leva contacta con el mazo y que consiste en una serie de chapas atornilladas al extremo del mazo. Esta placa de golpeo se usa para evitar el desgaste y conseguir mayor durabilidad. En el extremo opuesto a la placa de golpeo se encuentra el anillo golpeador: un anillo robusto de metal, con punzón, que está acoplado a la punta del mazo y es la pieza que impacta contra el yunque, durante el proceso de forja.

Como se comentó anteriormente, en el martillo pilón también hay insertada una abrazadera con dos muñones que insertados en el sistema de apoyo del martillo pilón actúan como cojinetes, permitiendo el movimiento de giro del mazo cuando éste es impulsado en el extremo por la leva. La colocación de este dispositivo en el rodezno es asimétrica (no se encuentra centrada en la mitad del mazo), así que, en reposo y sin contacto con la leva, el anillo golpeador está apoyado en el yunque.

4.5. Guías y tope del martillo pilón

Para evitar el cabeceo del mazo a alta velocidad, se utilizan unos postes que sirven de guía para el recorrido del mazo, garantizando un movimiento preciso y estable del martillo. Estas guías están elaboradas de madera resistente y se colocan a ambos lados del martillo y actúan como rieles para mantener el martillo alineado mientras realiza los movimientos ascendentes y descendentes, de forma que el martillo se mueva de manera controlada, evitando desviaciones laterales. Las guías reducen el cabeceo del martillo, especialmente a altas velocidades, asegurando que cada golpe sea preciso y directo sobre el yunque. Además, también ayudan a proteger la estructura del martillo pilón, a reducir el desgaste y prolongan la vida útil del equipo.

Para asegurar el correcto funcionamiento del martillo pilón, el dispositivo de la Herrería de Compludo dispone de un tope de recorrido. El tope consiste en un bloque de piedra situado en el recorrido del mazo, debajo del martillo pilón, a la altura de la placa de golpeo, actuando como un límite de recorrido para la distancia de desplazamiento del martillo. Con esto, se logra proteger tanto el martillo como el yunque de impactos excesivos que podrían dañarlos. El tope, además de ayudar a evitar daños también contribuye a la precisión del trabajo del herrero, garantizando que cada golpe del martillo sea controlado.

4.6. Yunque

El yunque del martillo pilón está situado directamente bajo el martillo y está diseñado para soportar los repetidos impactos y proporcionar una superficie robusta y estable para el trabajo del herrero. El yunque de la Herrería de Compludo suele ser un elemento móvil, de material resistente, que debe absorber y redistribuir la fuerza de los golpes, asegurando que la pieza de metal caliente se moldee adecuadamente con cada impacto del martillo pilón.

5. Resultados de aplicar las nuevas tecnologías

En la actualidad, el visitante de la Herrería de Compludo puede disfrutar de una visita guiada, donde el guía, un herrero de dilatada tradición familiar, transmite al visitante las particularidades de la historia, evolución y funcionamiento de la herrería y efectúa una demostración práctica, con todos los elementos de la herrería funcionando de manera sincronizada.

Las actividades de narración y demostración del funcionamiento de la herrería, por parte del guía-herrero, suelen durar entre 20 y 30 minutos. La visita puede complementarse con un paseo y la observación de los exteriores de la herrería, que está en un entorno de monte muy atractivo. En total, la visita completa a la herrería y su entorno rondaría los 60 minutos.

La Herrería de Compludo está en un paraje apartado, con una carretera de acceso peligrosa y donde hay que desplazarse en vehículo privado. Por esto, muchos posibles visitantes consideran que no es interesante abordar este difícil viaje para una experiencia de sólo una hora de duración.

Las actividades recreativas antes mencionadas podrían complementarse con otras donde se empleen nuevas tecnologías modernas que, además de enriquecer el relato de la historia de la Herrería, podrían mejorar la observación de los elementos del dispositivo mecánico, su función en el mecanismo, facilitar la comprensión del funcionamiento del dispositivo e introduzcan al visitante en el uso de estas tecnologías que suelen resultar muy atractivas para los usuarios primerizos. Para abordar estos posibles complementos se realizó un estudio de las diferentes técnicas virtuales aplicables a la Herrería de Compludo y se decidió implementar las siguientes:

- Diseño y fabricación de una maqueta de la Herrería de Compludo mediante impresión 3D FFF (FFF, Fused Filament Fabrication).
- Desarrollo de una aplicación de Realidad Aumentada que permita comprender todos los recursos ingenieriles que presenta la Herrería de Compludo.
- Desarrollo de una aplicación de Realidad Virtual que permita al usuario introducirse en un entorno virtual de la Herrería de Compludo.

5.1. Diseño y fabricación de la maqueta

Como primera etapa de la aplicación de técnicas virtuales, utilizando un software avanzado de CAD, se confeccionó un modelo realista del dispositivo mecánico de la Herrería de Compludo, donde las dimensiones de los elementos fueron medidas en la propia Herrería: se elaboró el diseño detallado por ordenador de cada uno de los componentes y se realizó el ensamblaje de los mismos, de forma operativa.

Sin embargo, los elementos de este primer modelo realista, por cómo estaban diseñados, no permitían su transformación para la fabricación por impresión 3D aditiva. Fue necesario realizar adaptaciones de este primer diseño, con el objetivo de facilitar la fabricación mediante impresión 3D y hacer posible el posterior ensamblado físico de los componentes. Para ello se generó un nuevo modelo virtual del dispositivo, que vamos a denominar modelo funcional.

En el modelo funcional del dispositivo se eliminaron la mayoría de los detalles que no afectaban al funcionamiento del mecanismo y que complicaban innecesariamente el proceso de fabricación, como tornillos, arandelas, etc. Además, en algunos casos, fue necesario añadir algunos componentes adicionales. Así, finalmente, las piezas fueron simplificadas y resultó factible su impresión aditiva.

Antes de abordar la fabricación de las piezas, fue necesario considerar las tolerancias resultantes del proceso de fabricación por impresión aditiva 3D y las holguras a asignar para asegurar un correcto acople entre las piezas en el proceso de ensamblaje posterior.

Se realizan pruebas con diversos tipos de ajuste entre piezas, con contacto deslizante, encaje o rotación [15], concluyendo que, para obtener un buen ajuste entre las piezas, con esas dimensiones, era necesario dejar una diferencia de 0,2 mm entre las piezas macho y los agujeros y alojamientos de cada uno de los ensambles.

También fue necesario diseñar una plataforma sobre la cual apoyar toda la maqueta y que permitiera el correcto funcionamiento del mecanismo. Esta plataforma se realizó de forma realista, incluyendo una pared similar a real. Además, en la selección de los colores de impresión de los componentes de la maqueta no se optó por colores realistas sino por colores que aseguraran la distinción entre piezas, para facilitar la comprensión del conjunto. En la Figura 7-izquierda se muestra el montaje final del modelo funcional, donde se pueden apreciar cada una de las piezas con los colores empleados para imprimirlas.

Una vez obtenido el modelo funcional del dispositivo, se abordó el proceso de fabricación aditiva mediante impresión 3D de todas las piezas previamente diseñadas. Para la fabricación de las piezas, se seleccionó como material de impresión PLA [16], un material muy popular en la creación de maquetas, por sus buenas propiedades, bajo coste y fácil adquisición.

Posteriormente, se definieron los parámetros de impresión adecuados [17] y se procedió a generar el código para importar en la impresora y poder comenzar la fabricación. Fijados los parámetros de impresión y los modelos CAD de cada una de las piezas, se implementaron en la herramienta software UltiMaker Cura 5.7.1, para obtener el código G. Una vez obtenido el código G, revisada y calibrada la impresora, se realizó el proceso de fabricación de las piezas por impresión aditiva 3D en una impresora Ender 3 Pro.

Una vez imprimidas todas las piezas, se procedió al montaje. Para realizar el ensamblado se empleó un adhesivo específico para plásticos. Primeramente, se pegó a la plataforma-base una lámina de goma EVA (Etileno Vinil Acetato) para homogeneizar el suelo y ocultar las uniones entre piezas. Después se unieron los elementos que, acoplados, formaban el conjunto eje-turbina y, consecutivamente, se fueron fijando las diferentes piezas en su lugar asignado, obteniendo el resultado que se muestra en la Figura 7-derecha. Para animar el sistema completo con un movimiento como el que se produce en la herrería, se añadió a la rueda de palas una manivela que permite la activación manual.

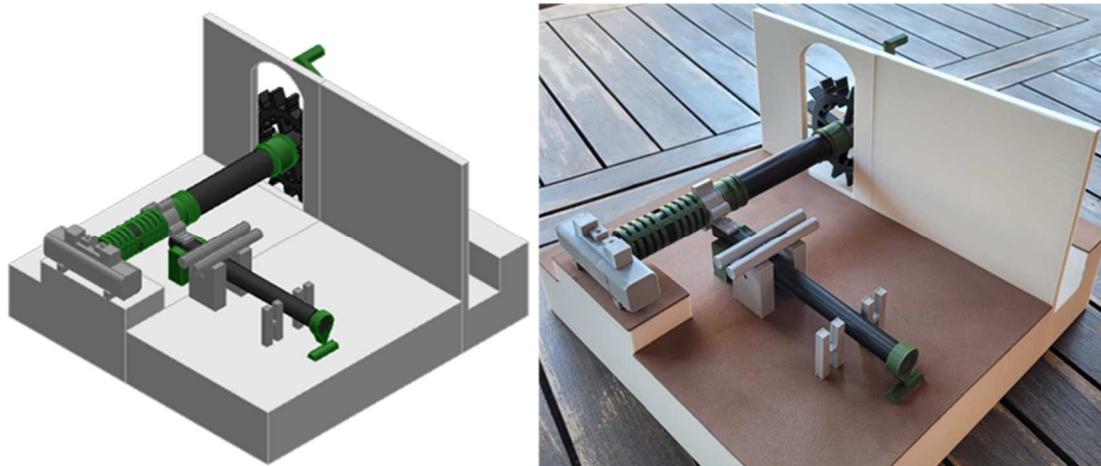


Figura 7: Representación del modelo funcional del dispositivo mecánico de la Herrería de Compludo (vista izquierda) y fotografía de la maqueta del dispositivo realizada por impresión aditiva 3D (vista derecha).

5.2. Aplicación de Realidad Aumentada

Para una aplicación de Realidad Aumentada con Android basta con un dispositivo smartphone en el que instalar la aplicación [18]. Esto hace que sea fácilmente accesible y que tenga un bajo coste.

Con una aplicación de Realidad Aumentada se pueden ver los elementos reales, a la vez que se realizan aclaraciones y se facilita la comprensión del funcionamiento de una instalación. Permite la visualización de modelos virtuales e información adicional a la vez que se visualiza el entorno real. Este entorno real puede ser la propia Herrería de Compludo, la maqueta de la herrería o cualquier otro espacio.

El funcionamiento de esta aplicación consiste en una experiencia de Realidad Aumentada mediante el uso de la cámara incorporada en un dispositivo móvil inteligente. Esta experiencia se consigue mediante marcadores o la detección del entorno. También es posible la interacción del usuario con la aplicación, mediante botones táctiles que permiten navegar por la aplicación y manipular los modelos virtuales.

La aplicación de Realidad Aumentada permite tres opciones diferentes de acceso: Image Target, Model Target y Ground Plane. El usuario puede elegir la opción que desee, en función del material de apoyo que tenga disponible. Se ofrecen experiencias diferentes para cada una de las opciones de reconocimiento.

La opción “Image Target” necesita de un marcador, ya sea una imagen impresa u otro dispositivo, y permite al usuario acceder a un entorno virtual divulgativo donde visualizar un modelo del mecanismo de la Herrería de Compludo, verlo en funcionamiento y manipularlo.

Tras realizar un escaneado de la maqueta de la Herrería creada mediante impresión 3D, y usarlo como modelo marcador, la opción de “Model Target” es un material adicional a la maqueta. Con esta opción, una vez reconocida la maqueta, se añade información sobre ella y se muestra el potencial de reconocer modelos 3D u objetos reales: podría ser el dispositivo completo o elementos del dispositivo reales de la Herrería, pudiendo aportar información adicional valiosa durante la visita a la instalación.

La opción “Ground Plane” permite la colocación del modelo digital del mecanismo de la Herrería de Compludo en cualquier plano de la realidad para poder inspeccionarlo con detalle. Esta opción reconoce superficies de la realidad y con un simple toque en la pantalla coloca el modelo en el plano que la aplicación indica en ese momento. El tamaño del modelo es semejante al de la maqueta, por lo que es como tener acceso a la maqueta de forma virtual.

5.3. Aplicación de Realidad Virtual

La aplicación de Realidad Virtual de la Herrería de Compludo se desarrolló orientada tanto para el uso de gafas de realidad virtual como para dispositivos móviles que utilicen Android. Para obtener la aplicación de Realidad Virtual, primero se diseñó el entorno virtual. El modelo del dispositivo de la Herrería de Compludo ya estaba disponible, se había realizado para la aplicación de Realidad Aumentada, con su animación incluida. Por ello, solo hubo que diseñar la herrería (con el software Solid Edge). Se realizó un boceto sencillo pero realista, acorde a las dimensiones de la instalación.

Posteriormente, tras configurar el software Unity (importando un paquete desde la página web de Google VR y configurar los ajustes [19]), se introducen los modelos en la escena, se añade una luz que ilumina el habitáculo y se coloca la cámara de la escena. Esta cámara posee un elemento denominado “Tracked Pose Driver” que permite a la cámara moverse en función de la orientación de la cámara de realidad virtual o del dispositivo móvil. Además, se incluye la animación del dispositivo y el audio de forma similar a la aplicación de la Realidad Aumentada, pero en este caso se activa desde el inicio de la aplicación e indefinidamente. En la Figura 8 se muestra una reconstrucción de cómo sería la visión del usuario durante la experiencia virtual con unas gafas de realidad virtual.

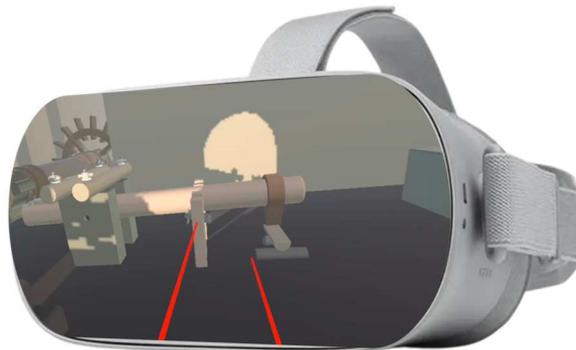


Figura 8: Ejemplo de la vista de usuario en la aplicación de Realidad Virtual.

6. Conclusiones

Para comprobar la trascendencia técnica y su posible incorporación como actividad propia del Patrimonio Industrial, se realizó una investigación sobre la historia de las herrerías y los martillos de forja.

Además, con los resultados mostrados en este documento se demuestra la viabilidad de aplicar técnicas virtuales de última generación en el ámbito del Patrimonio Industrial y cómo estas pueden redundar en actividades que complementen la simple visita. Las técnicas virtuales escogidas en este trabajo fueron la Realidad Aumentada, la Realidad Virtual y la impresión 3D. La instalación del Patrimonio Industrial seleccionada fue la Herrería de Compludo. Las aplicaciones desarrolladas en este trabajo pueden traducirse a actividades que complementen la visita guiada a su instalación.

A nivel técnico, primeramente, se realizó un análisis mecánico de las características y el funcionamiento del dispositivo mecánico de la Herrería de Compludo y posteriormente, se implementó un modelo virtual realista y se realizó la simulación del mecanismo.

Después, se realizó una maqueta funcional mediante impresión aditiva 3D, que podía ser accionada manualmente. Para la fabricación por impresión 3D, fue necesario realizar un modelo virtual funcional del dispositivo. Posteriormente, esta maqueta se usó como marcador para la aplicación de Realidad Aumentada.

También se llevó a cabo una aplicación de Realidad Aumentada (empleando herramientas software como Unity, Vuforia o Blender). Esta aplicación permite al usuario visualizar diseños virtuales 3D e información de la Herrería de Compludo integrados en el entorno real mediante el reconocimiento de marcadores o interactuando con la pantalla del dispositivo.

Además, se realizó una aplicación de Realidad Virtual mediante el software de Unity. La aplicación permite al usuario sumergirse en un entorno virtual donde puede ver en funcionamiento la instalación virtual de la Herrería de Compludo y desplazarse por ella, pudiendo acercarse al dispositivo para apreciar los detalles de sus componentes.

Como resumen, podemos decir que en este trabajo se comprueba que la implementación de diferentes tecnologías actuales, propias de la industria 4.0, a un entorno del Patrimonio Industrial, suscitan actividades que enriquecen el conocimiento, la divulgación y la comprensión del funcionamiento del mismo.

7. Agradecimientos

Este trabajo fue realizado gracias a la financiación obtenida de la Agencia Estatal de Investigación en sus proyectos TED2021-131372A-I00 (AEI) y MCIN/AEI/10.13039/501100011033 (con números de subvención MC4.0 PID2020-116984RB-C21-C22); y del proyecto MEMRIAAP-CM-UC3M, financiado por la Comunidad de Madrid. Además, los autores quieren agradecer a los hermanos Mario y Diego Carramiñana Gracia, por su colaboración en la programación y desarrollo de las nuevas tecnologías.

8. Referencias

- [1] INCUNA Homepage. [En línea]. Disponible en: <https://incuna.es/patrimonio-industrial/ticcih/>
- [2] Los Últimos Días de Pompeya. La Exposición Inmersiva. [En línea]. Disponible en: <https://madridartedigitales.com/agenda/pompeya/>
- [3] Molina, J. et Al., “Patrimonio virtual: aplicación práctica del uso de nuevas tecnologías a la documentación y puesta en valor del patrimonio”, Actas de II Jornadas de MCMPCV, pp. 28-37. Alfàs del Pi (Alicante), 2017. ISBN: 978-84-697-7374-1.
- [4] García-Otero, J.M. “Compludo: herrería entre la Edad Media y el siglo XIX”. Restauración & rehabilitación (4), 46-51 (1997).
- [5] Gómez-Amador, A.M. et Al. “Modeling, 3D printing and mechanical analysis of roman patenotre”. Explorations in the History and Heritage of Machines and Mechanisms. HMM 2024. History of Mechanism and Machine Science, vol 47. Springer, Cham (2024).
- [6] Sánchez-Palencia, F. J. (1984/1985): “Los «Morteros» de Fresnedo (Allande) y Cecos (Ibias) y los lavaderos de oro romanos en el noroeste de la Península Ibérica”, "Zephyrus", Vol. 37/38, pp. 349–359.
- [7] Wilson, A. (2002). “Machines, Power and the Ancient Economy”, The Journal of Roman Studies, vol. 92, pp. 1–32.
- [8] E. Bautista, M. Ceccarelli, J. Echávarri, J.L. Muñoz. Brief Illustrated History of Machines and Mechanisms. History of mechanism and machine science, Vol. 10. Springer. 2010.
- [9] Shi, X. The Hydraulic Tilt Hammer in Ancient China. In: Zhang, B., Ceccarelli, M. (eds) Explorations in the History and Heritage of Machines and Mechanisms. History of Mechanism and Machine Science, vol 37. Springer, Cham. (2019).
- [10] Zeng, W.; “Nong Shu” (Medieval Treatise on Agriculture, 1313).
- [11] Dillmann P., Bernardi P., Fluzin P. “Iron in medieval monuments metallographic analysis of irons coming from the Palais des Papes In Avignon”. In: Revue d'Archéométrie, n°27, pp. 183-192, (2003).
- [12] Needham, J.; Wang, L. (1986) [1965]. Science and Civilization in China: Volume 4, Physics and Physical Technology, Part 2, Mechanical Engineering. Taipei: Caves Books Ltd (reprint edition of Cambridge & New York: Cambridge University Press). ISBN 0-521-05803-1.
- [13] Olaus Magnus, “Historia de Gentibus Septentrionalibus”. Roma, 1555.
- [14] Balboa de Paz, J.A., “Hierro y Herrerías en el Bierzo preindustrial”. Diputación Provincial de León. León (1990).
- [15] Lamikiz, A. M. et Al., “Fabricación aditiva”. Editorial UNED, 2023. ISBN: 978-84-362-7945-0.
- [16] Dave, H.K.; Davim, J.P., Eds. “Fused Deposition Modeling Based 3D Printing”. Springer Cham, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-68024-4.
- [17] Khan, S. et Al., “A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts”. Materialstoday: Proceedings, Volume 50, Part 5, pp. 2119-2127, (2022).
- [18] Navarro F. et Al. “Realidad virtual y realidad aumentada. Desarrollo de aplicaciones”, RA-MA Editorial, 2018. ISBN: 978-84-9964-739-5.
- [19] Quickstart for Google VR SDK for Unity with Android, Google for Developers. [En línea]. Disponible en: <https://developers.google.com/vr/develop/unity/get-started-android>