

Las calderas de la primera máquina de vapor de Minas de Almadén. Reconstrucción 3D y maqueta a partir de sus planos

*The boilers of the first steam engine of Minas de Almadén.
3D reconstruction and maquette from its planes*

David Calderón-Herrera, Demetrio Fuentes-Ferrera, Luis Mansilla-Plaza, María-Julia Navas-Sánchez-Tirado
Universidad de Córdoba (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8251>

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas han ido desapareciendo de Almadén y su comarca elementos singulares de su rico y variado patrimonio minero industrial, algunos de los cuales se han convertido en chatarra o en escombros. Esta situación se ha visto truncada desde finales de la década de los años noventa del siglo pasado, gracias a los planes de recuperación del patrimonio llevados a cabo en la localidad y a su inclusión el 30 de junio de 2012 en la lista de Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO.

Los trabajos de recuperación y puesta en valor del patrimonio industrial y minero de Almadén (Ciudad Real) han permitido preservar un gran número de sus elementos patrimoniales que de otro modo habrían desaparecido. Ejemplo de estas actuaciones han sido la recuperación de edificios de importancia arquitectónica como la Real Cárcel de Forzados, el Real Hospital de Mineros, la Plaza de Toros, la Academia de Minas y el propio Parque Minero.

Pero no siempre se pueden lograr recuperaciones del elemento patrimonial real y en estos casos es necesario recurrir a las reconstrucciones virtuales computarizadas, como es el caso de la primera máquina de vapor instalada en Minas de Almadén en el año 1785.

Esta máquina fue uno de los hitos tecnológicos más importantes en la historia de las Minas de Almadén, como la primera instalada en una mina española y dando origen a la utilización del vapor

como fuente de energía. La transferencia tecnológica de esta nueva máquina, no fue fácil. La falta de su conocimiento o la falta de un combustible idóneo, entre otros aspectos, ocasionaron múltiples retrasos durante su montaje, que culminó después de 18 años de trabajo en 1805. Consecuencia de la problemática que se originó en torno a ella, retraso la llegada de nuevas máquinas al establecimiento minero hasta el último tercio del siglo XIX.

El trabajo que se presenta tiene como objeto mostrar el proceso seguido para la reconstrucción virtual por ordenador y la construcción de una maqueta a escala de las calderas de la primera máquina de vapor, instalada en el Pozo de San Teodoro de las Minas de Almadén destinada al desagüe, como resultado de un estudio detallado de esta y que permita la puesta en valor y difusión de la misma, acercando al espectador a una imagen casi real de dicho elemento del patrimonio minero industrial almadenense.

2. METODOLOGÍA

La metodología de investigación empleada en este trabajo ha sido el "*método histórico*". Se trata de un procedimiento organizado basado en el estudio de la realidad de los hechos del pasado de una forma fiel y obtener unos resultados y conclusiones sobre los hechos estudiados.

Se divide el método en tres fases: Heurística (localización y recopilación de las fuentes documentales), Crítica (valora la validez de los documentos recopilados) y Síntesis (producto final de la investigación, con la reconstrucción, explicación y afirmaciones sobre los hechos).

De acuerdo a esta propuesta los pasos que se han seguido son:

1. Recopilación de datos y estudio del contexto minero-tecnológico del siglo XIX, en especial la tecnología del vapor y las técnicas y métodos

de representación gráficos. Análisis, valoración y selección de la información.

2. Estudio del plano original de las calderas de la máquina de vapor.
3. Selección del software, para la realización de la reconstrucción virtual.
4. Reconstrucción virtual con ordenador de las calderas de la máquina de vapor.
5. Construcción de la maqueta, mediante materiales básicos como la madera, plásticos, arcilla, cartón, escayola y pinturas.

3. CONTEXTUALIZACIÓN

3.1. TECNOLOGÍA DEL VAPOR EN LA ÉPOCA

Hasta las publicaciones de Nicolás García Tapia [3], al menos en España, la atribución de la repercusión del invento de la máquina de vapor había sido un tema controvertido, pero será éste autor el que aporte pruebas suficientes para asegurar que fue el navarro Jerónimo de Ayanz, quien en el año 1611 utilizará por primera vez su máquina de vapor para el desagüe de las minas de Guadalcanal (Sevilla, España) durante su inundación, permitiendo con ello la reanudación de los trabajos de explotación minera.

A pesar de este primer uso español de una máquina de vapor, no será España el país que desarrolle este invento sino Inglaterra, donde se hace un uso generalizado de está alcanzando su máximo desarrollo a mitad del siglo XVIII. En el año 1759 funcionaban ya más de un centenar de estas máquinas [4]. Su expansión hacia el resto de Europa se verá favorecida por la existencia de un importante número de minas de carbón y la utilización del propio mineral como combustible. En España la situación era totalmente distinta, ya que el carbón presentaba altos costes de explotación que ocasionan una penetración mucho más lenta, alcanzando su mayor apogeo a lo largo del siglo XIX.

La evolución tecnológica de las máquinas de vapor desde el siglo XVIII, se puede resumir en la siguiente relación cronológica:

- Año 1705. Es patentada la máquina atmosférica de Thomas Newcomen, versión mejorada de la máquina de

Savery, en la que se produce la separación de la caldera de la máquina de vapor. [5].

- Año 1769. James Watt modifica la máquina de Newcomen, introduciendo un condensador separado del cilindro, logrando con ello un mayor rendimiento con menor consumo de combustible.
- Año 1782, James Watt, bajo la firma Boulton&Watt, diseña la máquina de vapor de doble efecto para aumentar su rendimiento.
- Año 1802. Aparición de las máquinas de vapor de alta presión, diseñadas por el ingeniero británico Richard Trevithick. También construye la primera locomotora en 1804. Prácticamente al mismo tiempo el estadounidense Oliver Evans diseña una máquina muy similar.
- A principios del s. XIX el británico Arthur Woolf desarrolla la primera máquina de vapor compuesta. En esta máquina, de media presión, el vapor se expande con ayuda de dos cilindros, y presentaba una notable economía frente a la máquina de Watt además de un movimiento más regular del balancín.

La importancia del vapor a lo largo de la historia ha sido notable. Aún hoy en día el vapor se sigue utilizando en la generación de energía eléctrica con las turbinas de vapor. La invención de la turbina de vapor¹ se realizó de forma casi simultánea por el ingeniero sueco Gustavo de Laval en 1882 y por el ingeniero inglés, Charles Parsons, en 1884. [6].

3.2. LAS TÉCNICAS DE REPRESENTACIÓN DE PLANOS EN LOS SIGLOS XVIII Y XIX

Durante estos siglos se producen importantes cambios en las técnicas de representación que redundarán en una mejor presentación y organización de la información. Surge el concepto de normalización en las representaciones y se produce la separación definitiva entre el dibujo técnico y el dibujo artístico, tal y como hoy lo entendemos [7].

3.2.1. Sistemas de Representación

A mediados del siglo XVIII, no existía realmente un sistema de representación como tal y la disposición de las vistas y elementos estaba ligada al conocimiento técnico y científico del autor del dibujo,

con escenificaciones de la máquina accionada por una figura humana o animal y la inclusión de alguna perspectiva.

Ya en los albores del siglo XIX, las necesidades de una mejor definición de los elementos industriales da pie a la extensión del sistema diédrico de Monge y la aparición de proyecciones ortogonales, cortes y secciones en las máquinas. Estas aparecían perfectamente identificadas en el dibujo, aunque en algunos casos no existía una disposición ordenada y se disponían en función del espacio disponible o del aspecto estético. Era habitual incluir mucha información para evitar errores de interpretación. [8].

3.2.2. Técnicas de Dibujo

Dentro de las técnicas de dibujo utilizadas destacamos el grabado. En España fue utilizada durante el siglo XVIII fundamentalmente para la divulgación científica, cartografía, geografía y para estampas artísticas [9].

Cuando se trataba de planos únicos, la técnica empleada era la del dibujo lavado, aplicando a cada elemento a representar un color similar al real, conjugando el empleo de los colores con los efectos de sombra e iluminación para dar un aspecto de realidad a la representación. Los pasos a seguir para la elaboración de un dibujo lavado los podemos encontrar en la obra de Antonio Gabriel titulada "*Compendio de la geometría elemental, especulativa y práctica: forma de levantar, y labar los planos, y modo de hacer las tintas para su manejo...*" y en un manuscrito anónimo titulado "El arte de lavar" [9].

3.2.3. Colores

Los colores tienen un papel fundamental en las representaciones con dibujo lavado. Los textos consultados nos muestran que los colores primarios eran el carmín (colorado), gutagamba (amarillo), verde de gris líquido (azul celeste), índi-

go o añil fino (azul), extracto de regaliza (marrón) y tinta china (negro). El resto de colores se conseguía con la mezcla de estos [10]. La Tabla 1 muestra un resumen de los colores empleados y su aplicación.

3.2.4. Líneas

La tipología de líneas es totalmente diferente a la actual. No existía una norma, pero como regla general se empleaba línea continua más o menos gruesa para los contornos y aristas y línea de puntos en los ejes de simetría, las líneas auxiliares y las líneas de cota. En cuanto a los enmarcados se solía utilizar un marco compuesto por dos líneas, una gruesa y otra fina e incluso hasta tres siendo la línea central la gruesa. [9]

Los grosores estaban limitados por la herramienta de dibujo (la pluma) a tres tipos: grueso, mediano y sutil. El grueso se realizaba con el corte de la pluma, el mediano se conseguía con la pluma ladeada, y el sutil trabajando diagonalmente.

3.2.5. Símbolos y Figuras

Tampoco existía una normalización en la representación de máquinas y cada autor utilizaba los suyos propios. Tan solo en los planos cartográficos y topográficos se utilizaban símbolos para simplificar la elaboración y comprensión de los planos. [7]

Era habitual encontrar figuras humanas, de animales, de cosas e incluso simplemente manos o flechas, para escenificar el funcionamiento de las máquinas o el sentido de desplazamiento o de giro de algún elemento [9].

3.2.6. Lenguaje Alfanumérico

A partir del siglo XIX se extendió el uso de leyendas explicativas en los planos para detallar el funcionamiento, las características de las piezas o elementos y su identificación. En algunas ocasiones debido a su gran extensión, podían aparecer como un documento aparte.

CÓDIGO DE COLORES EN EL DIBUJO LAVADO	
COLOR	APLICACIÓN
Carmín o Colorado	Muros mampostería; Tejados rojos
Negro con sombras azul oscuro	Tejados de pizarras
Blanco	Huecos de puertas y ventanas
Marrón y Negro	Carpintería y estructura de madera
Tinta china o Añil, con toques verdes	Pernos, clavos, ... elementos metálicos en general
Tinta china con tinta verde de gris líquido	Elementos de bronce, metal fundido o cobre
Verde, con tinta china y colorado	Tierras cubiertas de hierbas
Carmín y Gutagamba	Tierras de labor

Tabla 1: Código de colores característicos empleados en el dibujo lavado

¹ Revista de Obras Públicas, Tomo II, 1906, nº1585.

Los tipos de letra más utilizados eran la letra Bastarda a mano, Bastarda de imprenta o Cursiva, Redonda de imprenta o Romanilla, Redonda de mano, Gótica.

4. ESTUDIO DE LAS CALDERAS DE LA PRIMERA MÁQUINA DE VAPOR DE MINAS DE ALMADÉN A TRAVÉS DEL ANÁLISIS DE SUS PLANOS.

El estudio de las calderas se ha desarrollado en base al análisis gráfico del plano localizado en el Archivo Histórico de Minas de Almadén y Arrayanes, S.A. dibujado por Vicente Romero en el año 1830, y que es el único que se ha conseguido localizar de la primera máquina de vapor instalada en una mina española. Este plano es de una gran calidad y detalle y no es de extrañar que en el año 1876 fuera seleccionado para formar parte del material que se expuso en la Exposición Universal de Londres representando a las Minas de Almadén².

Para su interpretación se han seguido los pasos señalados por Patricia Zulueta [9]. En primer lugar se determinará su utilidad, después el sistema de representación gráfica y la técnica utilizada, así como los efectos de iluminación, sombras, colores y la presencia o no de algún lenguaje alfanumérico.

4.1. SISTEMA DE REPRESENTACIÓN

En el plano (Fig. 1) se representa una batería de dos calderas, con hogar exterior y cubierta de mampostería, formando todo ello en su conjunto un edificio. Explica con claridad las dimensiones y geometría de las calderas y el edificio, así como las partes de las que estaba compuesto el conjunto.

Se ha empleado el sistema diédrico, dividiendo el papel, de 816 mm de anchura por 557 mm de altura, en cuatro partes: planta, alzado y perfil, más una cuarta parte que incluye dos secciones, una en perfil y la otra en planta.

4.2. TÉCNICA DE DIBUJO

El lavado al agua ha sido la técnica empleada. Con los tonos azulados se representan los metales, salvo en las calderas que al ser de cobre están en color rojizo. La mampostería seccionada está en tono carmín y la que no está cortada, en tonos grises, siendo más oscuro el más cercano al observador, dejando en blanco el hueco libre de la puerta.

La iluminación, se considera natural y va de izquierda a derecha con una inclina-

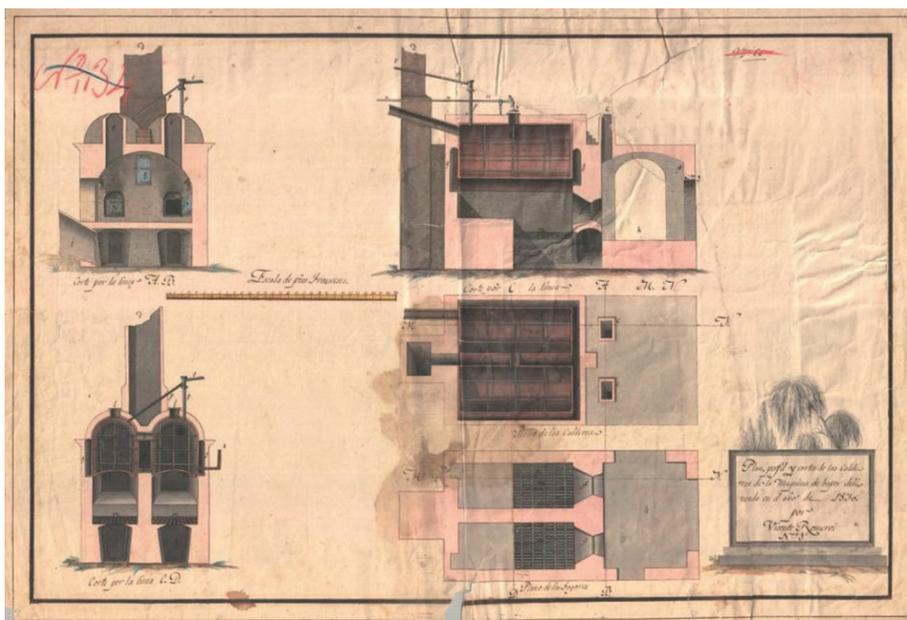


Fig. 1: Plano de las calderas de la 1ª máquina de vapor de minas de Almadén. Fuente: Archivo Histórico Minas de Almadén

ción de 45°, como se deduce de las sombras utilizadas. Con ello se consigue un efecto así un efecto tridimensional de la representación, que unido al colorido del plano y a los efectos de iluminación y sombras generan una sensación de realidad.

El plano tiene dibujado un marco de doble línea, siendo la exterior de menor grosor que la interior, para delimitar la zona de trabajo.

4.3. LENGUAJE NUMÉRICO

Se observa la presencia de un cajetín donde aparece el título del plano, la fecha y el nombre del autor. También aparece debajo de cada sección un texto explica-

tivo que ayuda a entender la dirección de la vista, como por ejemplo: "Corte por la línea AB"; lo que hace referencia a las líneas de puntos por donde se ha realizado el corte para dibujar la sección.

Incluye una identificación mediante letras de cada uno de los componentes de la caldera, y aunque la leyenda no aparece incluida en el propio plano se ha elaborado una para ayudar a su comprensión y que se recoge en la Tabla 2.

4.4. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA

Del estudio del plano, se puede deducir que se trata de una caldera de vapor

LEYENDA	
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN
a	Caldera
b	Conducto paso del vapor entre calderas
c	Conducto salida del vapor hacia el cilindro de la máquina de vapor
d	Chimenea principal
e	Chimeneas secundarias
f	Hogar (zona donde se produce el fuego)
g	Cámara de aire por la que circulan los humos para el recalentamiento de la caldera
h	Espacio de trabajo para los encargados de alimentar el fuego
i	Entrada a los ceniceros
j	Ceniceros
l	Válvula de seguridad
k, n	Sistema contrapeso de la válvula de seguridad
m	Emparrillado para colocar el combustible
o, p	Tuberías entrada de agua a las calderas
q	Puerta de acceso, para mantenimiento y limpieza
x	Rebosadero o indicador del nivel del agua
y	Conducto paso de agua entre calderas
z	Hueco en el hogar por el que escapan los humos hacia la cámara de recalentamiento

Tabla 2: Leyenda del plano de las calderas de la primera máquina de vapor. Fuente: [6]

² Revista Minera, Científica, Industrial y Mercantil, N° 27 publicada en 1776.

de tipo Watt. Se ve perfectamente su geometría, con forma rectangular y con los costados planos, la parte inferior en forma cóncava y la parte superior en forma de semicilindro, típico de estas calderas como se puede ver en la Figura 2.

También se puede deducir su ciclo de funcionamiento. Comienza con la elección de la presión de trabajo. Este punto es uno de los más importantes y consiste en la selección del peso "k" colocado encima de la válvula de seguridad "l" y que va a regular la presión de trabajo. A este lugar se podía acceder a través de la cubierta de la sala "h" donde existían unas escaleras que facilitaban el acceso a la parte superior de las calderas.

Acto seguido se llenaba la caldera de agua por medio de los conductos "o, p" hasta alcanzar el nivel indicado por el rebosadero "x". Esta agua procedía de un depósito exterior para este propósito o de la que se extraía del interior de la mina por la propia máquina de vapor. Llenada la caldera y tarada la válvula de seguridad, se cargaba el hogar con madera o carbón y se encendía el fuego para calentar la caldera.

El mejor combustible era el carbón por su mayor poder calorífico, pero en la Mina de Almadén la lejanía de los puntos de suministro³ obligó a sustituir este por arbustos o retamas de monte, de menor poder calorífico y por tanto con mayor necesidad de este combustible.

El calentamiento de la caldera se producía de dos formas. Una por el contacto directo con el fuego por la parte inferior, y la otra por el calor que se desprendían de los gases que circulan por la cámara "g".

Cuando el agua alcanzaba la temperatura de ebullición y comenzaba a generarse el vapor, este era conducido a través de la tubería "c" hasta el interior del cilindro, moviendo el pistón alojado en su interior y transmitiendo el movimiento a la máquina.

5. RESULTADOS

5.1. RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL

La existencia en los planos de una escala gráfica de 29 pies franceses (1 pie francés equivale a 325 mm) permite conocer las dimensiones del edificio de la caldera y de todos sus componentes de la



Fig. 2: Sección reconstrucción virtual de las calderas de la primera máquina de vapor

medición directa sobre plano y comprobar que está dibujado a escala 1:47.

Las dimensiones aproximadas de cada una de las calderas eran de 4,65 m. de longitud, por 1,86 m. de anchura y una altura de 2,32 m. lo que viene a dar un volumen aproximado de 20 m³, cada una.

Estos datos han permitido reconstruir virtualmente mediante el uso del ordenador la caldera y todos sus componentes y obtener la información suficiente para construir una maqueta a escala de este importante elemento del patrimonio minero industrial de Almadén (Fig. 3).

La reconstrucción se ha realizado con el programa de Autodesk, AutoCAD Inventor 2015 montado sobre un ordenador equipado con un procesador Intel

Core i7, 3.6 GHZ con memoria RAM de 16 Gb DDR3, tarjeta gráfica 4 Gb Geforce GTX1050 y disco duro SSD 500 GB Sata 3.

En primer lugar se han realizado las representaciones 2D (bocetos), generalmente secciones, plantas o alzados de los elementos a construir. A partir de estas formas 2D se han obtenido los objetos 3D (en algunos casos únicamente se tratada de dar alturas) y en otras empleando operaciones booleanas o herramientas de generación de volúmenes (extrusiones, barridos, etc). En este caso no se ha recurrido a la generación de mallas, trabajando exclusivamente con sólidos y sus transformaciones.

Creados los objetos tridimensionales se ha procedido a la aplicación de texturas y materiales. Se ha recurrido a utilizar

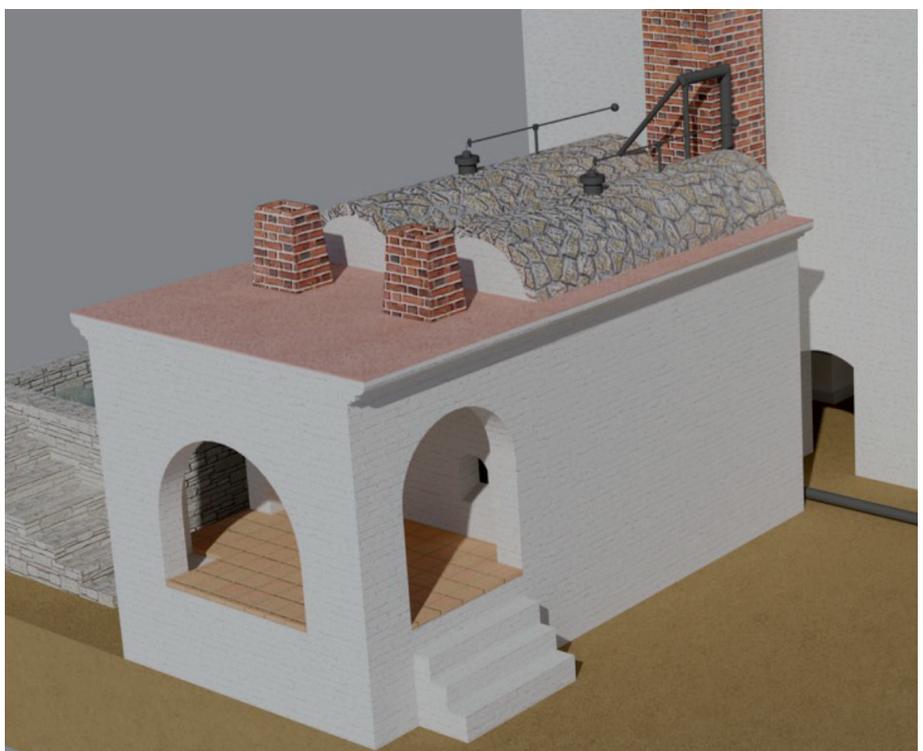


Fig. 3: Vista parcial de la reconstrucción virtual de las calderas de la primera máquina de vapor

³ Los puntos de abastecimiento más cercanos se encontraban a 90 Km en las poblaciones de Peñarroya-Pueblonuevo (Córdoba) y Puertollano (Ciudad-Real) con unas vías y medios de transporte bastante precarios que encarecían su precio y hacían poco viable su utilización.



Fig. 4: Maqueta de las calderas de la primera máquina de vapor

fotografías de edificios similares contemporáneos a la caldera y que se encuentran restaurados en Almadén.

De forma similar a las técnicas del dibujo lavado, Autodesk Inventor 2015 permite añadir luces a la escena. Se ha optado por una luz solar para un ambiente general y luces puntuales orientadas a las zonas que se quieren destacar, generando los efectos de sombra y tridimensionalidad.

Definidos todos estos parámetros, se realiza la fase final del proceso: el renderizado. Este proceso consiste en la obtención de un mapa de bits, en el que cada pixel tiene un color dependiendo de la zona de la escena representada. Como salida se ha seleccionado un tamaño de salida de 1024x769 píxeles, lo que proporciona una buena calidad de imagen, que permite su ampliación mediante zoom, sin perder calidad.

5.2. CONSTRUCCIÓN DE MAQUETA

El segundo resultado obtenido ha sido la posibilidad de construcción de una maqueta a escala 1:25 (Figura 4) para lo cual nos hemos apoyado en la reconstrucción virtual realizada con Autodesk Inventor y poder elaborar los diferentes componentes de la maqueta a un tamaño adecuado y claro para exposición.

Los pasos que se han seguido en la construcción han sido los siguientes:

1. Seleccionar un elemento de referencia a partir del cual se construye el resto.

2. Construir el armazón del edificio de calderas.
3. Selección de texturas, similares a los que se han elegido para la reconstrucción virtual.
4. Construir el resto de los elementos como las calderas y las conducciones.
5. Colocación de todos los elementos de la maqueta en su lugar para terminar de formar todo el conjunto.
6. Trabajo de retoque, donde se realizan los ajustes necesarios para que todo encaje, se perfilan pinturas, texturas con papel o arcilla, se aplica un proceso de envejecimiento, y se añaden detalles como lámparas, rejillas, escaleras, arena, montones de leña, para obtener la mayor sensación de realismo.

6. CONCLUSIONES

El análisis que se ha llevado a cabo del plano ha permitido conocer con todo detalle cómo eran las calderas de la primera máquina de vapor instalada en las Minas de Almadén, su forma, el tipo y funcionamiento.

El uso de los programas informáticos de modelado, junto con programas de retoque fotográfico han sido dos herramientas empleadas para recuperar de forma virtual como era la realidad de este importante elemento del patrimonio minero industrial de estas minas hoy totalmente

desaparecido, cuyo resultado final se pretende publicar en una plataforma on-line de modelos 3D y realidad virtual (VR) para que puedan ser visitados por todas aquellas personas interesadas en estos temas.

Este trabajo constituye la primera fase de un trabajo más amplio, que se pretende llevar a cabo después de esta experiencia para todos los elementos que conformaban el conjunto de la máquina de vapor, así como de otros bienes singulares desaparecidos del patrimonio minero industrial de Almadén.

Este tipo de trabajos es aplicable a cualquier campo de la Ingeniería y Arquitectura en la que se pretende recuperar objetos, construcciones o máquinas que han desaparecido y que tiene un valor histórico y/o tecnológico mediante su reconstrucción 3D y su maqueta.

PARA SABER MÁS

1. Mansilla Plaza, L., Metodología para la valorización del patrimonio minero industrial de Castilla la Mancha. 2013, Córdoba: Universidad de Córdoba.
2. Tascón, I.G. and J.F. Pérez, Agustín de Bentacourt y Molina, un científico al servicio de dos imperios. 1990, Secretaría General del Plan Nacional de I+D: Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología.
3. Sánchez Gómez, J., Minería Metalurgia en la Edad Moderna. Vol. 16. 1997, Madrid: Ediciones Akal.
4. García Tapia, N., Les premières applications de la vapeur: le cas de Jerónimo de Ayanz. 1993, San Francisco: Relations Science-Technique. 279-285.
5. Tredgold, T., Tratado de las Máquinas de Vapor, y de su Aplicación a la Navegación, Mina, Manufacturas, etc. 1831, Madrid: Imprenta de D. León Amarita.
6. Calderón Herrera, D., La energía del vapor en las minas de Almadén -La máquina de vapor-. 2013, Córdoba: Universidad de Córdoba.
7. Fuentes Ferrera, D., Estudio de la Evolución de los Métodos de Explotación de la Mina de Almadén a través de sus Representaciones Gráficas en el Período comprendido entre Finales del Siglo XVIII y Principios del Siglo XX. 2012, España: Universidad de Córdoba.
8. Piélagos, C., Teoría mecánica de las construcciones para los estudios de la Academia especial de ingenieros: sacada de las obras de M. Navier y de varios autores : comprende la resistencia de los cuerpos que sirven de materiales, y la descripción y establecimiento de las construcciones de tierra, de piedra, de madera y de hierro.: 1837.
9. Zulueta Pérez, P., Los Ingenios y Las Máquinas. Representación Gráfica en el Período Ilustrado en España. 2007, España: Secretario de Publicaciones e Intercambio Editorial. Universidad de Valladolid.
10. Fernandez, A.G., Compendio de la geometría elemental, especulativa y practica: forma de levantar, y labar los planos, y modo de hacer las tintas para su manejo... 1778, Sevilla: Oficina de D. Nicolás Vazquez y Compañía.