

Código Madrid I: Un análisis de los mecanismos del primer tratado completo de sistemas mecánicos

Codex Madrid I: A mechanisms analysis of the first complete treatise on mechanical systems

H. Rubio Alonso¹, A. Bustos Caballero², C. Castejón Sisamón³, J. Meneses Alonso⁴

Resumen

Desde que en 1965 se encontraron en la Biblioteca Nacional de España los Códices Madrid I y Madrid II, escritos por Leonardo da Vinci entre finales del siglo XV e inicios del siglo XVI, han pasado a ser manuscritos muy considerados, tanto por el contenido de los mismos como por el gran prestigio de su autor. En este artículo se realizará una inspección del manuscrito del Código Madrid I, una extensa colección de dibujos de sistemas mecánicos de Leonardo da Vinci, donde se presentarán resumidamente la vida del autor y su obra y se analizarán detalladamente los principales mecanismos que aparecen en dicho código. También se situarán en su contexto histórico las obras escritas de Leonardo y, en particular, el Código Madrid I, analizando los registros de tecnología mecánica anteriores a los tiempos de Leonardo da Vinci y estudiando las referencias escritas históricas existentes.

La parte principal del trabajo consistirá en una recopilación de los dibujos de los principales y más representativos mecanismos del Código Madrid I. Con esta recopilación se demostrará la variedad de elementos mecánicos y mecanismos simples del citado código, que forman, en su conjunto, un completo tratado sobre mecanismos, entendiendo los mecanismos como elementos básicos de las máquinas. Esta completa descripción de dispositivos mecánicos constituye la principal aportación de Leonardo da Vinci a la historia de las máquinas y los mecanismos.

Palabras clave

Leonardo da Vinci, Código Madrid I, tratado de mecanismos, elementos de máquinas, historia de la ingeniería mecánica.

Abstract

Since the Madrid I and Madrid II Codices, written by Leonardo da Vinci between the end of the 15th century and the beginning of the 16th century, were found in the Spain National Library in 1965, they have become highly regarded manuscripts, both for their own content as well as the great prestige of the author.

In this article, an inspection of the manuscript of the Codex Madrid I will be carried out, an extensive collection of drawings of mechanical systems by Leonardo da Vinci. The life of the author and his work will be briefly presented and the main mechanisms that appear in that codex will be analyzed in detail. The written works by Leonardo and, in particular, the Codex Madrid I will also be placed in their historical context, analyzing the records of mechanical technology prior to the time of Leonardo da Vinci and studying the existing historical written references.

The main part of the work consists of a compilation of the drawings of the main and most representative mechanisms of the Codex Madrid I. With this compilation the variety of mechanical elements and simple mechanisms of the aforementioned codex will be demonstrated, which together form a complete treatise on mechanisms, understanding mechanisms as basic elements of machines. This complete description of mechanical devices constitutes Leonardo da Vinci's main contribution to the history of machines and mechanisms.

Keywords

Leonardo da Vinci, Codex Madrid I, mechanisms treatise, machines elements, mechanical engineering history.

Recibido/received: 01/06/2023 Aceptado/accepted: 10/10/2023

1 Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid.

2 Dpto. de Mecánica. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

3 Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid.

4 Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid.

Autor para correspondencia: Higinio Rubio Alonso; e-mail: hrubio@ing.uc3m.es



Foto: Shutterstock. (Ilustración sobre los Códices de Leonardo Da Vinci).

1. Introducción

El 14 de febrero de 1967, The New York Times anuncia que el investigador estadounidense Jules Piccus había encontrado, en la Biblioteca Nacional de España en Madrid, casi 700 páginas con dibujos, bocetos y anotaciones manuscritas de Leonardo da Vinci, los tratados que ahora denominamos Código Madrid I y Código Madrid II (Da Vinci, 1504). El descubrimiento de estos códigos contribuyó a engrandecer la leyenda de Leonardo da Vinci (Reti, 1968).

En cuanto a las características físicas de ambos códigos, están escritos en papel, con dimensiones aproximadas de 210 × 150 mm. El Código de Madrid I contiene 192 folios y el Código de Madrid II tiene 157 folios.

El Código Madrid I es un tratado técnico en el que se abordaban, principalmente, amplios estudios de ingeniería mecánica. El título asignado al Código Madrid I, cuando fue registrado en la Biblioteca Nacional de España, fue: Tratado de Estática y Mecánica En Italiano, Escrito en el año 1493. (fig. 1 izquierda) (Da Vinci, 1974). Su contenido es tan relevante que se considera el primer tratado monográfico sobre elementos mecánicos conocido en este campo científico.

El texto y los dibujos del Código Madrid I presenta un acabado de alta calidad en el que muchos de los estudios presen-

tados parecen ser un refinamiento de algunas de las páginas del Código Atlántico y, aparentemente, compilados como un trabajo completo, quizás con el propósito de ser publicado. El Código Madrid I es la principal aportación de Leonardo da Vinci a la historia de las máquinas y los mecanismos (Bautista et al., 2010).

El Código Madrid II es un cuaderno cuyo contenido es más variado que el Código Madrid I. El título que la Biblioteca Nacional de España le dio cuando se registró fue: Tratados varios de Fortificación, Estática y Geometría escritos en italiano, por los años de 1491 (fig.1-der).

El Código Madrid II contiene diseños de instrumentos musicales, notas técnicas

de geometría y pliegos de condiciones de varios proyectos de arquitectura, de ingeniería civil y militar, de fortificación de la ciudad de Piombino, de canalización de la desviación del río Arno en la ciudad de Pisa (única parte del proyecto) y para la fundición del famoso caballo del Monumento Ecuestre Sforza (en detalle).

La visión actual de Leonardo da Vinci es la de un hombre sabio, el prototipo de un hombre humanista, propio del periodo del Renacimiento. Además, Leonardo es considerado un gran artista, científico e inventor, aunque esta última afirmación habría que matizarla. Aunque Leonardo da Vinci propuso el diseño de algunas máquinas originales, su funcionalidad es cuestio-



Figura 1. Carátulas asignadas por la Biblioteca Nacional de España a los Códices Madrid I y Madrid II.

nable y ni las fabricó ni probó (Ceccarelli, 2016; Cerveró-Meliá et al., 2018). Sin embargo, hay que resaltar la calidad de todo el material escrito y, sobre todo, gráfico y pictórico que legó como colección del saber de su tiempo, el Renacimiento (Reti, 1974).

En este artículo se ofrece un análisis del Códice Madrid I y se da una visión actual del contenido del citado manuscrito mediante la selección de 100 dibujos de los principales elementos o mecanismos básicos de la máquina recopilados en dicho código, y componen un tratado completo sobre los mecanismos del Renacimiento. Antes de abordar el análisis de los mecanismos, se presentará un resumen crítico de la vida de Leonardo da Vinci y sus tratados, situando estos en su contexto histórico y, en particular, el Códice Madrid I, analizando los registros de tecnología mecánica, anteriores y coetáneos a los tiempos de Leonardo da Vinci, para relacionar la tecnología recopilada en él con la registrada por otros autores de su entorno histórico.

La producción escrita sobre la vida y obra de Leonardo es inmensa, pero este trabajo se centra en el Códice Madrid I y solo se citan aquellos documentos que son referencias directas para la realización de este trabajo.

2. Breve referencia crítica a la vida y obra de Leonardo da Vinci

Leonardo di ser Piero da Vinci nació el 15 de abril de 1452 en Anchiano, un distrito de Vinci, una ciudad toscana cercana a Florencia (Italia) y murió el 2 de mayo de



Figura 2. Autorretrato de Leonardo Da Vinci.

1519 en Amboise, una ciudad situada en el centro de Francia.

Leonardo da Vinci (fig. 2) fue el hijo ilegítimo de Piero Frusolino di Antonio, un notario florentino. Su madre era Caterina di Meo Lippi, una campesina de la región de Toscana. Creció en casa de su abuelo paterno, Antonio da Vinci, donde aprendió a leer y escribir y los rudimentos de la aritmética, aunque no fue instruido en los lenguajes y materias de los eruditos de la época (trivium y quadrivium) y no dominaba el latín ni el griego (Isaacson, 2017).

A los 17 años, Leonardo da Vinci ingresó como aprendiz en el taller del prestigioso artista Andrea del Verrocchio (pintor, escultor y orfebre), donde recibió una formación multidisciplinar en diversas artes. A partir de ese momento se inició su vida de estudio y producción artística y científica.

Hoy en día, mucha gente considera a Leonardo da Vinci un hombre de su tiempo, personificando el ideal humanista del Renacimiento. Sin embargo, muchos aspectos de su vida y obra no permiten situarlo exactamente dentro del espíritu renacentista, tanto desde el punto de vista teórico como práctico.

La visión actual de Leonardo da Vinci es la de un sabio, un erudito del Renacimiento: pintor, dibujante, ingeniero, arquitecto, científico, botánico, anatomista, escultor, etc. Su fama descansa principalmente en el hecho de que fue un pintor extraordinario, uno de los mejores pintores de todos los tiempos, creador de pinturas tan famosas como La última cena y la Mona Lisa.

Leonardo da Vinci también es conocido por su abundante producción de dibujos y escritos: sus famosos cuadernos. Sus manuscritos están reunidos en 23 cuadernos, sobre gran variedad de temas: anatomía, astronomía, geología, pintura, óptica, ingeniería civil, hidrodinámica, tribología e ingeniería mecánica. La mayoría de los cuadernos de Leonardo da Vinci fueron redescubiertos en el siglo XIX: Códices Atlántico, Arundel, Leicester, Manuscritos de París A-M (12 volúmenes), Forster (tres volúmenes), Sobre el Vuelo de los Pájaros, Trivulziano y los cuadernos de la Biblioteca Real Windsor; excepto los Códices de Madrid I y II. que fueron redescubiertos en 1965 (Cerveró-Meliá, 2021).

Los manuscritos de Leonardo da Vinci fueron realizados entre 1487 y 1519 y suman un total, aproximado, de 7.000 páginas (3.495 folios duplicados): la mayoría

de esta producción escrita se encuentra en cuadernos (23 códigos) más unas 50 hojas sueltas, distribuidas por varios museos y bibliotecas de varias ciudades de Europa y América.

Se podrían resumir los manuscritos de Leonardo da Vinci como:

- Códice Leicester o Hammer. Colección de Bill y Melinda Gates, Seattle (Estados Unidos).
- Códices o Manuscritos de París A, B, C, D, E, F, G, H, I, K, L y M. Biblioteca del Instituto de Francia, París (Francia).
- Códice de Turín o Manuscrito Sobre el Vuelo de las Aves. Biblioteca Real de Turín (Italia).
- Códice Trivulziano. Biblioteca Trivulziana, Castillo Sforzesco, Milán (Italia).
- Códice Atlántico. Biblioteca Ambrosiana de Milán (Italia).
- Colección Windsor. Biblioteca Real del Castillo de Windsor, Londres (Reino Unido).
- Códice Arundel. Biblioteca Británica, Londres (Reino Unido).
- Códices Madrid I y II. Biblioteca Nacional de España, Madrid (España).
- Códices Forster I, II y III. Victoria and Albert Museum, Londres (Reino Unido).

Muchos investigadores y comunicadores científicos veneran a Leonardo da Vinci como el mayor ingeniero de su tiempo y uno de los mejores de siempre. Para justificar su admiración, argumentan que fue un autor más prolífico que sus contemporáneos y antecesores (en número de diseños de mecanismos y máquinas) (Oliveira, 2019). Además, sus diseños técnicos, en comparación con los de otros ingenieros, introducen avances y mejoras. Sin embargo, estos autores no consideran que, probablemente, Leonardo tuviera más tiempo que los demás ingenieros porque mientras Leonardo dibujaba y escribía sobre mecanismos y máquinas o describía proyectos sobre diversos temas, esos mismos ingenieros, predecesores y contemporáneos suyos, pusieron esos proyectos en práctica, construyendo o implementando esos diseños (en algunos de las cuales colaboró el propio Leonardo). Si se habla de la importancia de Leonardo da Vinci como ingeniero, se puede decir que estaba dotado de una inmensa curiosidad pero era disperso: empezó muchas cosas y luego las abandonó.

Leonardo legó a la historia una inmensa cantidad de diseños y estudios de máquinas y mecanismos (Pedretti, 1999), pero su aporte de innovaciones técnicas

fue mínimo. Quizá porque no publicó sus hallazgos y sus escritos tuvieron escasa difusión y, por otra parte, no dejó discípulos a quienes transmitir su legado. Además, su obra no comenzó a publicarse hasta el siglo XIX, cuando Charles Ravaisson-Mollien, conservador del museo del Louvre, publicó *Les Manuscrites de Léonard de Vinci* (Ravaisson-Mollien, 1881). Desde entonces, un gran número de científicos, naturalistas, estudiosos del arte, historiadores y divulgadores científicos han analizado sus manuscritos y han publicado extensamente sobre ellos.

En cualquier caso, los autores de este artículo no pretenden restar importancia a la figura de Leonardo da Vinci. Fue un genio: fue pionero en incorporar notas de texto en sus dibujos técnicos (como medida explicativa a sus propuestas de diseños y dispositivos) y en añadir letras indicadoras en los dibujos (para orientar la práctica del diseño y hacer aclaraciones en las leyendas de estos). Se puede afirmar que Leonardo da Vinci fue un gran ingeniero y cabe destacar su método y su minucioso análisis de las máquinas, estudiando en detalle los elementos mecánicos más simples, de los que el Código Madrid I fue su principal obra. Además, su genio artístico se refleja en sus dibujos, de gran precisión y belleza.

2.1. Código Madrid I

En 1965 se encontraron en la Biblioteca Nacional de España dos manuscritos de Leonardo da Vinci de incalculable valor histórico-científico-cultural: los Códices Madrid I y Madrid II. Ambos manuscritos abarcan casi 700 páginas de nuevos escritos de Leonardo sobre arquitectura, geometría, mecánica y temas de navegación (Koffler, 1974; Ruiz García, 2012).

El Código Madrid I es una recopilación de textos y dibujos que se puede definir como un tratado completo de la ingeniería mecánica renacentista, con una gran calidad gráfica, descriptiva y de ingeniería (Cecarelli, 2008). Estas capacidades gráficas, descriptivas, de ingeniería y de detalle de los dibujos de Leonardo da Vinci son claramente superiores a las de sus predecesores y contemporáneos.

El Código Madrid I fue paginado por el mismo Leonardo y ha llegado a la actualidad prácticamente intacto, salvo 16 páginas (ocho folios) que fueron arrancadas y parecen haberse perdido. El cuidado de la paginación de las hojas y los dibujos técnico-mecánicos sugiere que Leonardo encuadró esta obra como un tratado, quizás pensando en una posible publica-

ción del citado cuaderno, pero está claro que, finalmente, optó por las teorías más conservadoras del secreto medieval, lejos de la publicación humanista.

En el Código Madrid I, Leonardo dibujó y estudió varios mecanismos para conseguir diferentes tipos de movimiento: movimientos alternativos, oscilantes e, incluso, predefinidos. Aunque escribió otros tratados que incluían estudios de máquinas (Código Atlántico, Manuscritos de París, etc.), el Código Madrid I es único, ya que establece el primer caso de tratado para deconstruir máquinas en elementos o mecanismos básicos de máquinas (Leonardo da Vinci los llamó “elementi macchinali”) (Moon, 2007). Leonardo presupone la existencia de un lector para su obra y escribe los comentarios científicos pensando en ellos. Si hubiera publicado este trabajo, habría acelerado enormemente el desarrollo del diseño de máquinas.

El Código Madrid I puede fecharse entre 1492 y 1497, en el primer periodo de Leonardo da Vinci en Milán (1482- 1499). Es entonces cuando estaba en la plenitud de su vida, estaba viviendo su cuarta década (Ruiz García, 2012). Es un manuscrito de un solo volumen que constaba originalmente de 192 hojas (actualmente solo se conservan 184 hojas), a doble cara y de dimensiones 215 × 145 mm. El cuerpo principal está compuesto por 12 cuadernos, todos con ocho folios. Los cuadernos tercero y cuarto han perdido algunos folios (Ruiz García, 2012).

El Código Madrid I está escrito con caracteres de gran calidad y con la letra manierista típica de Leonardo y contiene cerca de 1.000 dibujos de máquinas y elementos de máquinas. Los dibujos también son de gran calidad, claros y completos, y contienen estudios sobre los conceptos fundamentales de la mecánica moderna, es decir, mecanismos o elementos mecánicos. Estos mecanismos no son las máquinas de Leonardo, que son más complejas y tienen usos particulares. Sin embargo, trató de demostrar que usando y combinando estos elementos simples es posible obtener máquinas que realicen una función específica (Koffler, 1974).

El Código Madrid I tiene una gran correspondencia con el Código Atlántico: una serie de dispositivos, como engranajes, resortes, bisagras, elementos mecánicos de relojes, balanzas, pesos, tornillos, etc., se describen en el Código Atlántico y se desarrollan en el Código Madrid I, con dibujos de gran detalle y calidad. También hay conexión con otros códigos: los Códices

Forster y los Manuscritos A y H, de los Códices de París (Cerveró-Meliá et al., 2020).

3. Contexto histórico

En este apartado se analiza el contenido del Código Madrid I (Da Vinci, 1974) para emplazar los conocimientos mecánicos que contiene este manuscrito en su contexto histórico (el Renacimiento) (Lefèvre, 2008) y justificar la afirmación de considerar el Código Madrid I el primer tratado conocido en el que se recopilan y estudian los principales mecanismos y máquinas simples.

La cultura del Renacimiento está marcada por la exaltación de la dignidad del hombre, pensamiento heredado del pensamiento clásico. En el Renacimiento también se consideraron otros temas: la exaltación de la naturaleza, el espíritu crítico, utilizar la razón como instrumento fundamental de todo proceso mental, añadir las matemáticas como complemento al pensamiento literario, dejar de lado el principio de autoridad, apreciar la importancia de la práctica experimental, etc. Las ideas renacentistas fueron compartidas por la élite intelectual italiana de los siglos XV y XVI. Los intelectuales bizantinos que emigraron a Italia tras la caída de Constantinopla (1453) contribuyeron a esta corriente de pensamiento, llevando consigo el conocimiento e ideas procedentes de Oriente (Ruiz García, 2012).

Aunque Leonardo da Vinci no es el personaje ideal para representar el espíritu renacentista, su vida y su obra sí permiten ubicarlo dentro de la dimensión histórica del Renacimiento. Leonardo tuvo la suerte de vivir en uno de los ambientes más cultos del Renacimiento europeo y, aunque no desarrolló teorías integrales originales en el campo científico, fue un observador incansable y un exponente singular de una época que cambió el mundo. Su contribución al progreso efectivo de la ciencia de su época no fue muy grande, quizás por la escasa difusión de sus escritos. Sin embargo, dejó testimonio de su defensa de la experimentación como método de trabajo intelectual (y científico), su reivindicación de la técnica y de las máquinas como instrumentos de progreso y, sobre todo, de su concepción general de la realidad regida por las leyes de necesidad, pragmatismo, razón y proporción. Leonardo trató de demostrar en su obra la superioridad de la creación visual sobre el texto literario (Innocenzi, 2019; Ruiz García, 2012).

Una de las mayores innovaciones in-

roducidas durante el Renacimiento fue utilizar el dibujo como instrumento de demostración y comunicación. Siguiendo esta idea, se definieron las convenciones gráficas necesarias para visualizar las máquinas y sugerir sus características. Este arte de describir máquinas se convirtió en un instrumento de estudio técnico-científico. Leonardo da Vinci no era original en este punto pero, quizás, sea el máximo exponente de este arte.

Otra de las aportaciones del Renacimiento fue la aparición de los llamados “ingenieros”, que superaban la categoría de “maestros de máquinas de guerra”, como solían llamarse los artesanos-construtores de la Edad Media (Ceccarelli, 2008; Moon, 2007).

Leonardo da Vinci puede clasificarse como un ingeniero que conoció la actividad de los ingenieros y arquitectos de la antigua Roma y la de sus predecesores en el Renacimiento italiano. Como antecesores de Leonardo y de los ingenieros renacentistas se pueden mencionar los ingenieros musulmanes y, antes que ellos, a los ingenieros griegos y romanos.

Seguidamente, se hace una relación de precursores en el conocimiento de las máquinas:

- Es evidente que *De architectura*, de Vitruvio, fue el tratado de referencia de los arquitectos e ingenieros del Renacimiento, pero otros autores de la antigüedad como Arquímedes (c. 287-212 a.C.) ya habían realizado varias aportaciones al estudio de las máquinas (como el principio de la palanca, el tornillo de Arquímedes y ciertas máquinas de asedio) e Hiparco de Nicea (c. 190-120 a.C.) habían establecido los principios de la trigonometría. En especial, fueron fundamentales las contribuciones que realizaron a la evolución de la mecánica y las máquinas varios miembros de la Escuela de Alejandría: Ctesibio (c. 285-222 a.C.), Filón de Bizancio (c. 280-220 a.C.), Herón de Alejandría (c. 10-70 d.C.) o Pappus de Alejandría (c. 290-350 d.C.).
- También fueron muy importantes las aportaciones de varios autores musulmanes, como herederos del saber de la Escuela de Alejandría, continuadores del avance de la ingeniería mecánica (anterior al Renacimiento) y precursores de los tratados de máquinas. Se pueden considerar los representantes más importantes los hermanos Banu Musa (siglo IX), Ibn Khalaf al-Muradi (siglo XI) e Ibn al-Razzaz al-Jazari (1136-1206) (Hassaan, 2014a; Hassaan, 2014b). En época un poco posterior a Leonardo, también merece una mención

especial Taqi-al-Din (1521-1585) y sus manuscritos sobre sistemas mecánicos (Gökdoğan et al., 2020).

- El aporte en tecnología y máquinas de los ingenieros de la antigua China es transcendental. Basta mencionar dos artefactos mecánicos de gran complejidad para la época en que fueron creados: el carro brújula o carro que siempre señala el sur (dinastía Han, 202 a.C.-220 d.C.) y la torre del reloj astronómico accionado por agua. El primer dispositivo fue un carro con un sistema de control mecánico de rumbo que, cuando el carro se movía o giraba, siempre apuntaba hacia el sur (Bautista et al., 2010; Lu, 2015; Needham, 1956). La torre del reloj fue un famoso dispositivo automático impulsado por agua cuya construcción fue completada por Su Song en 1087 (Bautista et al., 2010; Lu, 2015). El tratado chino más importante sobre máquinas, anterior al Códice Madrid I, es el *Nong Shu* (Tratado agrícola, 1313) de Wang Zhen, que contiene un gran número de ilustraciones de herramientas y máquinas utilizadas en la agricultura (Bautista et al., 2010; Lu, 2015; Needham, 1956). Ningún otro tratado de esta importancia aparecerá hasta el *Tian Gong Kai Wu* (La explotación de las obras de la naturaleza, 1637) compuesto por Song Yingxing (Bautista et al., 2010; Lu, 2015; Needham, 1956), aunque en 1627 ya se había publicado *Yuanxi Qiqi Tushuo* Luzui (Esquemas recopilados y explicaciones de máquinas maravillosas del lejano oeste), fruto de la cooperación entre el misionero jesuita Johann Schreck (J. Terentius) y Wang Cheng.

- Las primeras obras de los ingenieros del Renacimiento en Europa aparecen en el Trecento. Estos ingenieros recopilaron los diseños de máquinas, rescatados de la antigüedad, o diseños ideados por ellos mismos y realizaron tratados con fines intelectuales, para dar mayor protagonismo a la cultura técnica. Las primeras obras que se pueden mencionar son *Livre de Portraiture* (1225-1250), del ingeniero francés Villard de Honnecourt, y el tratado militar de Guido di Vigevano (*Texaurus regis Francie*, 1335), como antecesor de los cuadernos de notas de los ingenieros italianos del Renacimiento, así como de los escritos técnico-militares de la escuela alemana, entre ellos Konrad Kyeser (*Bellifortis*, c. 1405) (Lefèvre, 2004; Moon, 2007).

- En la Italia del Renacimiento se puede hablar de hasta dos generaciones de ingenieros italianos; Leonardo da Vinci fue un destacado representante de los ingenieros de la segunda generación. Entre los au-

tores de la primera generación están Filippo Brunelleschi, Taccola, Leon Battista Alberti y Giacomo Fontana (Ceccarelli, 2008; Moon, 2007). En un tiempo intermedio, marcando el paso hacia la segunda generación, se puede citar a Roberto Valturio y Francesco di Giorgio Martini, que precedieron y coincidieron en el tiempo con Leonardo da Vinci; incluso Leonardo colaboró en algunas de las obras de estos ingenieros (Lefèvre, 2004; Moon, 2007).

- Leonardo da Vinci desarrolló sus obras entre 1480 y 1515 (el Códice Madrid I se elaboró entre 1492 y 1497). Leonardo, indudablemente, conoció los trabajos de los ingenieros y arquitectos de la antigua Roma, así como los de sus predecesores y sus contemporáneos en el Renacimiento italiano: a partir del análisis de los manuscritos de Leonardo, se puede afirmar que Leonardo conoció la obra de Vitruvio Marcus Pollio (Vitruvio), Filippo Brunelleschi Mariano di Jacopo (il Taccola) (Ceccarelli, 2021), Leon Battista Alberti y Francesco di Giorgio Martini (Ceccarelli, 2018). Los manuscritos de Leonardo da Vinci marcan el inicio de un periodo, entre finales del siglo XV y finales del siglo XVII, en el que fueron apareciendo una gran cantidad de tratados sobre máquinas (Ravier-Mazzocco, 2013).

Como se ha comentado, los conocimientos sobre mecanismos y máquinas llegaron a Leonardo da Vinci heredados de otros ingenieros. En este aspecto, el caso de Francesco di Giorgio Martini es especialmente significativo porque la importancia de su carrera ha quedado empañada por la sombra de Leonardo, quien se inspiró en la obra de Martini y copió sus dibujos (Ceccarelli, 2018; Moon, 2005; Moon, 2007). A finales del siglo XV, Francesco di Giorgio era un ingeniero muy acreditado en Italia, cuyas obras eran conocidas y muy apreciadas. Leonardo da Vinci no tuvo tanto reconocimiento en vida como Francesco di Giorgio. Además, hay que considerar que los manuscritos de Leonardo no se publicaron hasta mucho tiempo después. En defensa de Leonardo y su inspiración en la obra de Francesco di Giorgio, cabe señalar que, a su vez, la obra de Francesco di Giorgio se había inspirado en la obra de Taccola (Ceccarelli, 2021; Moon, 2007).

Para apreciar este proceso de herencia del conocimiento y comprender cómo surgió y evolucionó el conocimiento técnico entre la antigüedad y el Renacimiento, se puede tomar como ejemplo el caso de las bombas de pistón. Este proceso evolutivo

se puede observar en los dibujos de la figura 3:

- La figura 3a es un dibujo realizado por Al-Jazari (1204-1206) (Hassaan, 2014a).
- La figura 3b es un dibujo de Taccola (c. 1450, primera representación europea de una bomba de pistón) (Ceccarelli, 2021).
- La figura 3c es un dibujo de Francesco di Giorgio Martini (1475-1480) (Rubio et al., 2023).
- La figura 3d es un dibujo de Leonardo da Vinci (Código Madrid I, 1492-1497) (Rubio et al., 2022).

4. Los mecanismos del 'Código Madrid I'

Poco después del redescubrimiento de los Códices Madrid I y Madrid II, en 1965, prestigiosos investigadores comprobaron que el Código Madrid I era un compendio básico de elementos mecánicos en el que se incluían dibujos de los principales elementos constructivos mecánicos de máquinas: Reti (Reti, 1974) comparó los dibujos de elementos de máquinas y mecanismos del Código Madrid I de Leonardo con la lista básica de 22 elementos constructivos propuesta por Franz Reuleaux en su libro del año 1893 sobre el diseño de máquinas *The Constructor*. Más recientemente, Moon confirmó esta lista (Moon, 2007) y realizó un estudio avanzado de los elementos y mecanismos de la máquina que Leonardo describió en el Código Madrid I, incluyendo una comparación con los trabajos de Timoshenko (Moon, 2009).

¿Qué elementos mecánicos se pueden ver en el Código Madrid I? En los, aproximadamente, 1.000 dibujos de elementos mecánicos y mecanismos se pueden ver:

- Cojinetes de bolas y de rodillos.
- Varios tipos de engranajes y conjuntos de engranajes.
- Levas y seguidores.
- Volantes de inercia.
- Transmisiones por correa (abiertas y

cruzadas).

- Transmisiones por cadena (varios modelos de cadena).
- Mecanismos de trinquete.
- Articulaciones.
- Acoplamientos.
- Estudios de deformaciones.
- para transmisión del movimiento lineal.
- Y muchos más dibujos de elementos mecánicos y estudios funcionales que, en este trabajo, se intentan resumir todos ellos en solo 100 dibujos.

En la figura 4 se presenta una secuencia de nueve agrupaciones de dibujos de máquinas simples de Leonardo da Vinci y en la tabla 1 se realiza una breve descripción de los mecanismos de los dibujos de la figura 4.

En la representación de la figura 4 se muestran 100 dibujos, compilación de los 100 principales mecanismos, elementos de máquinas y estudios funcionales que Leonardo ilustró en el Código Madrid I. Estas nueve agrupaciones de dibujos de mecanismos, formadas por los 100 dibujos, sirven de base para interpretar correctamente las máquinas como conjuntos de mecanismos y elementos de máquinas y se puede apreciar la gran contribución de los estudios de Leonardo a la ingeniería de máquinas como ciencia.

Los autores de este artículo consideran que la clasificación de los 100 dibujos de elementos *macchinali* propuesta en este trabajo (fig. 4 y tabla 1) es un resumen suficientemente representativo de los cerca de 1.000 dibujos que contiene el Código Madrid I.

A pesar de la amplitud de la clasificación de mecanismos propuesta, quedan fuera de esta clasificación estudios tan interesantes como el estudio de los movimientos rotatorios generados por un sistema de volante y cigüeñal (fig. 5a); o el estudio de un sistema de cierre (fig. 5b): con llave en posición de cerrado, sistema

cerrado por resorte (parte superior) y con llave en posición abierta (parte inferior).

5. Conclusiones

Leonardo da Vinci fue, sobre todo, un maestro de la pintura, que también se adentró en muchas otras disciplinas: la física, la anatomía, el diseño de edificios y máquinas, el urbanismo, etc. y también dejó una ingente obra escrita de estos temas. Su genio pictórico se refleja también en sus espléndidos dibujos, de gran precisión y, en muchas ocasiones, de una belleza sublime. Sin embargo, Leonardo protegió u ocultó sus hallazgos y sus manuscritos (el uso de la imprenta ya estaba extendido en su época), lo que llevó a opinar que gran parte del trabajo científico-técnico de Leonardo era especulativo o no original.

En este trabajo se han mostrado y se han analizado algunas de las principales aportaciones de Leonardo da Vinci solo en el campo de los mecanismos y los elementos mecánicos.

Tras una profunda revisión del Código Madrid I de Leonardo da Vinci, este trabajo se centra en estudiar los principios de generación de soluciones más utilizados por Leonardo: inspiración en la naturaleza; los principios de los mecanismos y su visión orgánica; análisis en profundidad de las máquinas para descomponerlas en elementos *macchinali*; síntesis que permite componer máquinas para la integración de elementos y mecanismos mecánicos; las analogías entre los diferentes elementos de la máquina, y la economía en el diseño al suprimir lo superfluo. Todos estos avances permitieron que sus diseños mecánicos fueran mejores que los de sus contemporáneos.

La obra de Leonardo da Vinci y, en particular, el Código Madrid I han sido ubicadas en su contexto histórico y se ha constatado que personajes ge-

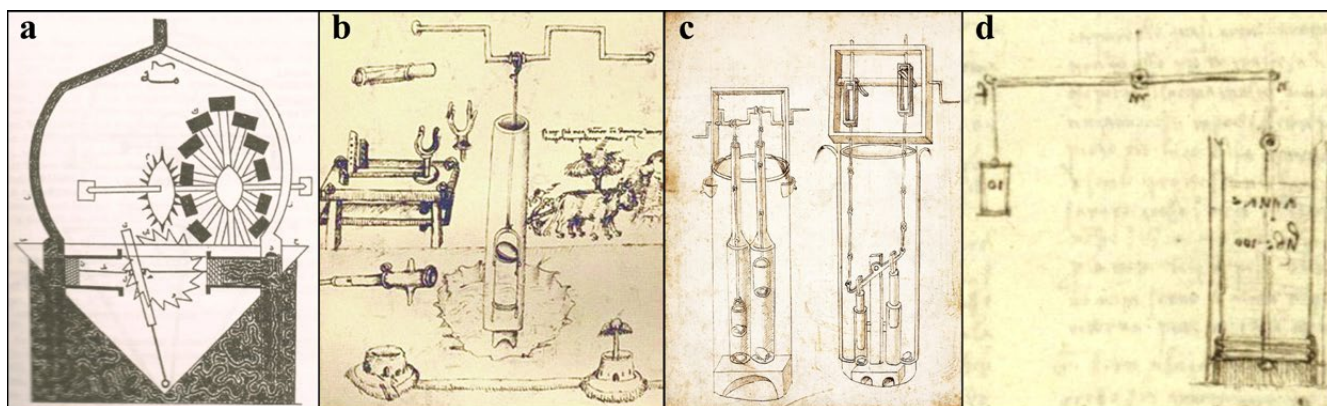


Figura 3. Dibujos de bombas de pistón de varios autores.

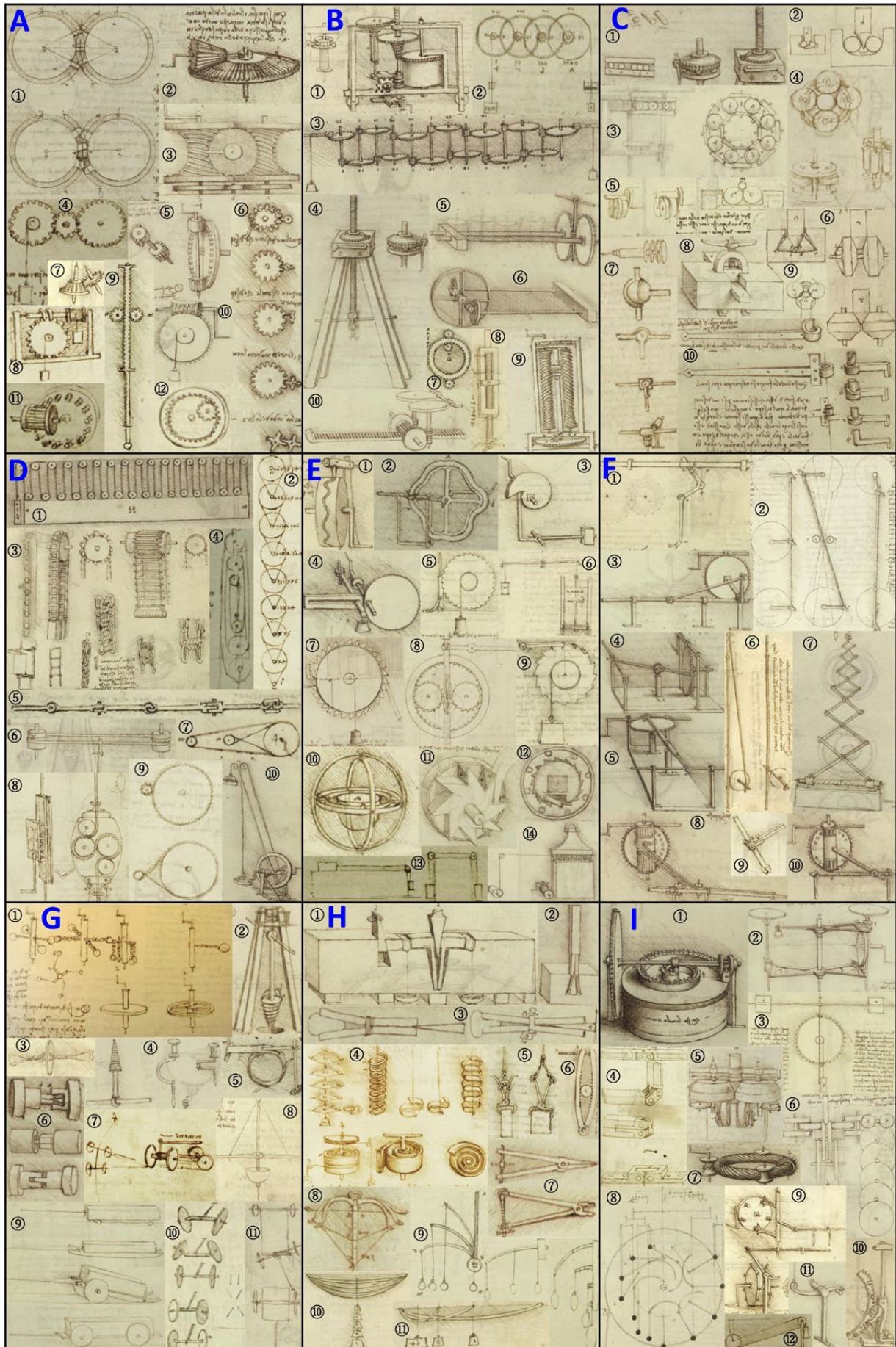


Figura 4. Agrupaciones de dibujos de mecanismos: selección de mecanismos del Códice Madrid I.

Referencia	Descripción del mecanismo del dibujo	Referencia	Descripción del mecanismo del dibujo
A-1	Engranajes rectos de barras y de dientes	E-9	Mecanismo de trinquete con uñeta horizontal
A-2	Engranaje cónico	E-10	Esfera armilar
A-3	Engranajes cilíndricos de dientes rectos	E-11	Rueda hidráulica
A-4	Sistema de engranaje globoide doble	E-12	Mecanismo de trinquete con uñeta interior
A-5	Mecanismo de inversión con engranajes	E-13	Sistemas para medición del rozamiento con pesos
A-6	Estudio de relación de transmisión con engranajes	E-14	Accionamiento de poleas y peso para relojería
A-7	Engranaje cónico con piñón de linterna	F-1	Mecanismo de generación de movimiento lineal
A-8	Estudio de fuerzas en engranaje de tornillo sin fin	F-2	Estudio de mecanismo articulado de cuatro barras
A-9	Cremallera con dos piñones	F-3	Mecanismo de movimiento lineal con engranaje
A-10	Engranaje de tornillo sin fin globoide	F-4	Mecanismo de barras con engranaje vertical
A-11	Engranaje de corona de barras y piñón de linterna	F-5	Mecanismo de barras con engranaje horizontal
A-12	Engranaje interior	F-6	Mecanismos de manivela-biela-deslizadera
B-1	Dispositivo regulador con engranajes	F-7	Mecanismo de tijera o tijeras de Núremberg
B-2	Sistema reductor con engranajes	F-8	Dispositivo de acción lineal con engranaje linterna
B-3	Sistema de reducción con engranajes de linterna	F-9	Articulación de tres grados de libertad
B-4	Husillo o gato de tornillo con rodamiento axial	F-10	Sistema de acción lineal con engranaje de linterna
B-5	Husillo de doble tornillo	G-1	Diseños de volantes de inercia
B-6	Unidad de husillo de doble tornillo	G-2	Dispositivo de perforación
B-7	Engranaje con dentado interior y exterior	G-3	Volante de cuerda
B-8	Husillo simple	G-4	Herramienta de broca y berbiquís
B-9	Mecanismo de inversión de doble hélice	G-5	Mecanismo de freno
B-10	Accionamiento de piñón y cremallera	G-6	Acoplamientos
C-1	Rodamiento axial de bolas	G-7	Estudio del trazado de curvas por un carro
C-2	Estudios de cojinetes de bolas para pivote cónico	G-8	Herramienta manual de perforación con cuerda
C-3	Rodamiento axial con separadores de bolas	G-9	Estudio de arrastre de peso
C-4	Rodillos de rodamiento para ejes	G-10	Estudio de inclinación de ruedas respecto a un eje
C-5	Soportes abiertos de ejes con discos de rodamiento	G-11	Diseño de carro de uno y dos ejes
C-6	Estudios de cojinetes de rodillo para pivote cónico	H-1	Mecanismos de cuña
C-7	Juntas universales	H-2	Enclavamiento por cuña
C-8	Máquina para hacer resortes	H-3	Sujeción por cuña
C-9	Soporte cerrado de eje con discos de rodamiento	H-4	Varios tipos de resortes
C-10	Bisagras convencionales y de cierre automático	H-5	Dispositivos de pinzas
D-1	Mecanismo transmisión de múltiples poleas	H-6	Sistema de sujeción
D-2	Sistema de reducción de poleas y correas	H-7	Modelos de alicates
D-3	Varios modelos de cadenas	H-8	Estudio de deformación de ballesta
D-4	Sistema de bloqueo y aparejo	H-9	Estudio de deformación de vigas en voladizo
D-5	Varios modelos de enganche de cadenas	H-10	Estudio de deformaciones en viga biapoyada
D-6	Mecanismo de correa y poleas	H-11	Estudio longitud-deformación en vigas biapoyadas
D-7	Accionamientos por correa abierta y cruzada	I-1	Tambor cilíndrico central para reloj
D-8	Mecanismo de elevación manual	I-2	Mecanismo de transformación alternativo
D-9	Analogía entre transmisión por engranajes y correa	I-3	Mecanismo de escape para reloj
D-10	Grúa con cabrestante de tambor	I-4	Estudio posicional de una articulación
E-1	Mecanismo de leva espacial cilíndrica	I-5	Ruedas de fricción con pivote cónico
E-2	Mecanismo de leva	I-6	Dispositivo con ruedas de fricción
E-3	Palanca activada por leva	I-7	Tornillo sin fin circular
E-4	Mecanismo de leva excéntrica	I-8	Estudio de mecanismo para movimiento perpetuo
E-5	Mecanismo de trinquete con uñeta vertical	I-9	Mecanismos para movimiento intermitente
E-6	Bomba de pistón y cilindro	I-10	Mecanismo alternativo accionado por palanca
E-7	Mecanismo de trinquete con uñeta angulada	I-11	Mecanismo actuador para reloj
E-8	Mecanismo de seguridad con doble trinquete	I-12	Mecanismo de plano inclinado

Tabla 1. Descripción de los mecanismos de los dibujos de la figura 4.

niales, con amplios conocimientos en máquinas, como Leonardo da Vinci y otros, pudieron alcanzar las alturas en la ciencia de los mecanismos y de las máquinas gracias a las contribuciones de muchos otros predecesores, tam-

bién personajes geniales.

En este artículo, tras revisar extensamente el manuscrito del Código Madrid I, según el criterio de sus autores, se muestran y describen los dibujos de elementos y mecanismos de máquinas

más importantes. Se realiza una recopilación de los 100 dibujos de mecanismos principales del manuscrito, representativos del contenido del manuscrito. Esta recopilación de dibujos ilustra la variedad de elementos mecá-

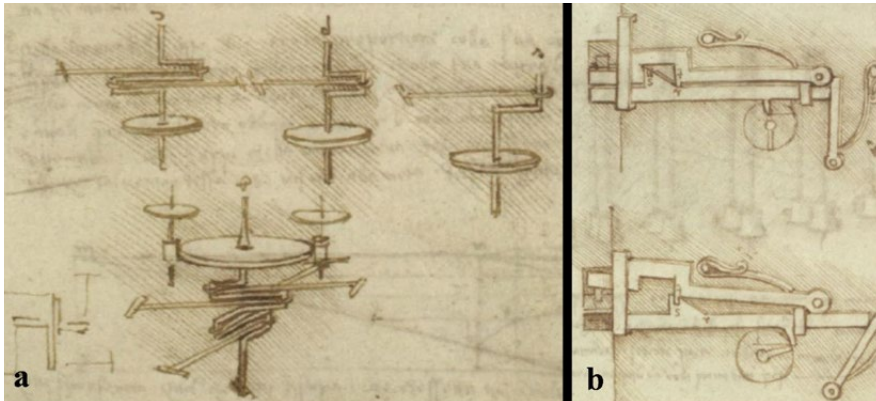


Figura 5. Dibujos de sistemas mecánicos del Códice Madrid I: (a) volante-cigüeñal (b) bloqueo de cierre.

nicos y mecanismos simples que existen en el Códice Madrid I, formando, en su conjunto, un amplio tratado sobre los mecanismos (entendiendo los mecanismos como elementos básicos de las máquinas), representación del conocimiento de este tema a finales del siglo XV.

Agradecimientos

Esta publicación es colaboración con el Proyecto de I+D+I MC 4.0, financiado por AEI /10.13039/50110 0 011033 a través de los subproyectos PID2020-116984RB-C21 y PID2020-116984RB-C22; proyecto TED2021-131372A-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR; proyecto “Sistema de monitorización de estado para detección de fisuras en ejes ferroviarios (SMEPDFEF-CM-UC3M)”, de la Convocatoria 2021 para proyectos de I+D para jóvenes doctores/as de la Universidad Carlos III de Madrid.

Referencias

Bautista E., Ceccarelli M., Echavarrí J., Muñoz J.L. (Ed.) (2010). *A Brief Illustrated History of Machines and Mechanisms*. History of Machines and Machine Science, Vol. 10, Springer Netherlands.

Ceccarelli M. (2008). Renaissance of machines in Italy: From Brunelleschi to Galilei through Francesco di Giorgio and Leonardo. *Mechanism and Machine Theory* 43, 1530-1542.

Ceccarelli M. (2016). Contributions of Leonardo da Vinci in Mechanisms Design. *Actas del XXI Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, 459-466, Elche.

Ceccarelli M. (2018). Contributions of Francesco di Giorgio in Mechanism

Design. *Actas del XXII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Madrid.

Ceccarelli M. (2021). Contributions of Mariano di Jacopo (il Taccola) in Mechanism Design. *Actas del XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Jaén.

Cerveró-Meliá E., Ferrer-Gisbert P.E., Capuz-Rizo S.F. (2018). Functional feasibility review of the technical systems designed by Leonardo da Vinci. *Proceedings of 22nd International Congress on Project Management and Engineering*, Madrid.

Cerveró-Meliá E., Capuz-Rizo S.F., Ferrer-Gisbert P. (2020). Leonardo da Vinci's Contributions from a Design Perspective. *Designs* 4, 38.

Cerveró-Meliá E. (2021). Contribución de la obra científico-técnica de Leonardo da Vinci a los proyectos de ingeniería [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia], Valencia.

Da Vinci L. (1504). *Leonardo interactivo: Códices de Madrid de Leonardo da Vinci*, Biblioteca Nacional de España, Madrid. <http://leonardo.bne.es/index.html>.

Da Vinci L. (1974). *The Madrid Codices*, National Library Madrid, No. 8937. Translated by L. Reti. Taurus; McGraw-Hill, Madrid.

Gökdoğan M. D., Uymaz, T. (2020). Taqî al Dîn (1521–1585). *Distinguished Figures in Mechanism and Machine Science*, Vol. 38, Springer International Publishing, 127-145.

Hassan G. A. (2014a). Innovation of Mechanical Machinery in Medieval Centuries, Part IV: Mechanisms, Gear Trains and Cranes. *International Journal of Advanced Research in Computer Science & Technology* 2(4), 78-84.

Hassan G. A. (2014b). Innovation of Mechanical Machinery in Medieval Centuries. Part I: Windmills, Water Wheels and Automatic Fountains. *International Journal of Innovation and Applied Studies* 9, 1497-1505.

Innocenzi P. (2019). *The Innovators Behind Leonardo*. Springer International Publishing.

Isaacson W. (2017). *Leonardo da Vinci. The Biography*, Simon & Schuster, New York.

Koffler S. (Ed.) (1974). *Two rediscovered manuscripts of Leonardo da Vinci*. The UNESCO Courier, Published by UNESCO (1974).

Lefèvre W. (2004). *Picturing machines 1400-1700*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Lu Y. (Ed.) (2015). *A History of Chinese Science and Technology*. Springer Berlin Heidelberg.

Moon F.C. (2005). *The kinematics of Francesco di Giorgio Martini and Franz Reuleaux*. *Proceedings of the Third International Workshop on History of Machines and Mechanisms*, Moscow.

Moon F. C. (2007). *The Machines of Leonardo Da Vinci and Franz Reuleaux*. History of mechanism and machine science, Vol. 2, Springer Netherlands.

Moon F. C. (2009). *History of Dynamics of Machines and Mechanisms from Leonardo to Timoshenko*. *International Symposium on History of Machines and Mechanisms*, 1-20, Springer Netherlands.

Needham J. (1956). *Science and Civilisation in China*, Vol. 4, Part 2, Cambridge University Press, Cambridge.

Oliveira, A. R. E. (2019). *The Mechanical Sciences in Leonardo da Vinci's Work*. *Advances in Historical Studies* 8, 215-238.

Pedretti C. (1999). *Leonardo: The Machines*. Gruppo Editoriale Giunti, Firenze.

Ravaisson-Mollien C. (1881). *Les Manuscrits de Léonard de Vinci*, The Warburg Institute: Paris.

Ravier-Mazzocco B. (2013). *Voir et concevoir: Les théâtres de machines (XVIe-XVIIIe siècle)*. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Paris.

Reti L. (1968). *The Two Unpublished Manuscripts of Leonardo da Vinci in the Biblioteca Nacional de Madrid-II*. *The Burlington Magazine*, 110(779), 81-91.

Reti L. (1974). *The unknown Leonardo*. McGraw-Hill, New York.

Rubio H., Bustos A., Castejón C., Meneses J. (2022). *Analysis of the Codex Madrid I as a Compendium of Mechanisms*. *Explorations in the History and Heritage of Machines and Mechanisms*. *History of Mechanism and Machine Science*, Vol. 40, 120-133, Springer.

Rubio H., Bustos A., Castejón C., Meneses J. (2013). *Analysis of the First Treatise on Machine Elements: Codex Madrid I*. *Foundations of Science*, 26 (1).

Ruiz García E. (Ed.) (2012). *El imaginario de Leonardo: Códices Madrid de la BNE*. Biblioteca Nacional de España, Madrid.