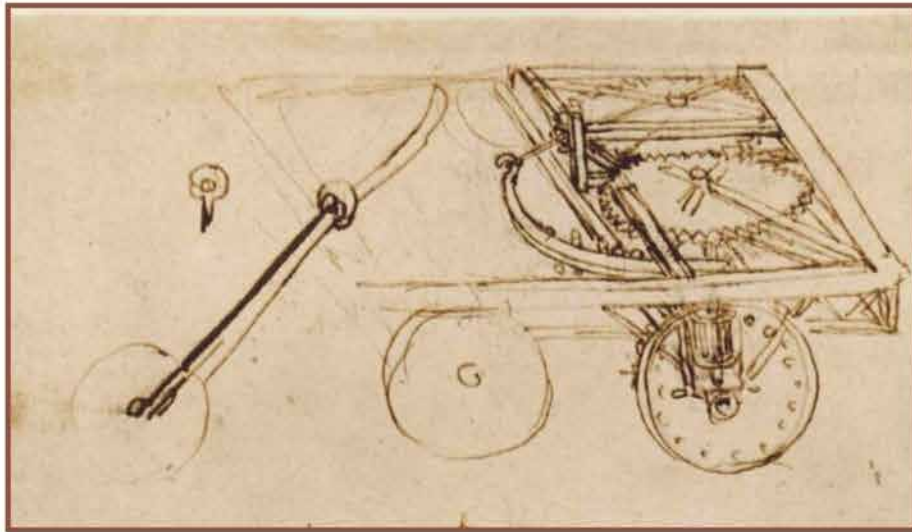


UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Programa de doctorado: Ingeniería y Gestión de Proyectos

Tesis Doctoral

Leonardo da Vinci INGENIERO



Autor:

Miguel Ángel Contreras López

Director:

José Ramón de Andrés Díaz



AUTOR: Miguel Ángel Contreras López
 <http://orcid.org/0000-0002-8418-5860>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es

Tesis Doctoral

Título.

Leonardo da Vinci: INGENIERO.

Doctorando.

Miguel Ángel Contreras López

Departamento y Universidad.

Departamento de Expresión Gráfica, Diseño y Proyectos.
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial.
Universidad de Málaga.

Programa de doctorado:

Ingeniería y Gestión de Proyectos.

Director de Tesis.

Doctor D. José Ramón de Andrés Díaz.

Fecha.

Noviembre de 2015.

D. JOSÉ RAMON DE ANDRÉS DÍAZ, Dr. Ingeniero Industrial, Profesor Titular de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la Universidad de Málaga, en el Área de Proyectos de Ingeniería, actuando en calidad de Director de la Tesis,

HACE CONSTAR:

Que la tesis presentada por D. MIGUEL ÁNGEL CONTRERAS LÓPEZ, con el título “Leonardo da Vinci: INGENIERO”, se ha desarrollado bajo su dirección y reúne los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor.

Y para que así conste a los efectos oportunos, expedimos y firmamos el presente documento en Málaga, a 16 de noviembre de dos mil quince.

Fdo.: D. JOSÉ RAMÓN DE ANDRÉS DÍAZ

Agradecimientos

*Mal haces si alabas, y peor si reprendes
una cosa que no entiendes bien
(Leonardo da Vinci)*

Por dónde empezar...la lista es interminable...una vez presentada la Tesis y apunto de defenderla la emoción que me embarga es indescriptible. Emoción que tan sólo pueden compartir aquellos que hayan pasado por una situación similar y que comprendan las dificultades con las que se encuentra cualquier doctorando cuando decide acometer la ingente tarea de ponerse a escribir una Tesis Doctoral, con todo lo que conlleva a nivel familiar, a nivel personal y a nivel laboral. Conciliar familia, amistades y trabajo ha sido francamente muy difícil. Es natural, todas las horas dedicadas a la Tesis son horas que se han dejado de dedicar a la familia y a las amistades. Por eso quiero agradecer muy especialmente a Carol, mi princesa, por su apoyo incondicional, por estar a mi lado en todo momento, por dejarme trabajar, por quererme, por comprenderme, por animarme, por respetar mis ausencias...en definitiva agradezco enormemente tu sacrificio, sin ti no lo habría conseguido, ...gracias.

Es curioso que mi vida de doctorando haya ido paralela al crecimiento familiar, cuando comencé el Doctorado tan sólo éramos dos y ahora somos cuatro. En 2010 y 2013 nacieron mis hijos Ángel y Cristina. Una maravillosa locura, criar dos hijos y paralelamente intentar investigar y terminar de redactar mi Tesis ha sido agotador a la par que motivador. Cuántas veces me ha preguntado mi hijo mayor*papá que estás haciendo en el ordenador....*, y yo le contestaba, ...*hijo, estoy haciendo un trabajo sobre Leonardo da Vinci....*, y Ángel me decía...*igual que las tortugas Ninjas....*y yo no podía dejar de reír. Momentos muy tiernos. Momentos inolvidables. No tengo palabras para agradecerte, Carol, los dos hijos tan maravillosos que hemos tenido juntos, son la alegría de la casa, el motor de nuestras vidas, ...gracias.

Agradecer a mis padres, Juan y Adela, su esfuerzo y sacrificio en criar una familia numerosa y al mismo tiempo educarnos de la mejor manera posible, inculcándonos una serie de valores como son el amor por la familia, el trabajo, el esfuerzo, el respeto. Son valores que nada más se aprenden en el entorno familiar y que se llevan dentro del corazón para toda la vida...gracias.

Agradecer a mis hermanos, Juangus, Carlos, Pepe, Marta y María Adela, por todos los momentos que hemos compartido juntos desde la infancia y que seguimos compartiendo en nuestras vidas adultas, momentos inolvidables, momentos que hacen familia, ...gracias.

Agradecer a mi familia política, a Paqui y a Cristi, su cariño, su acogida y su amistad. Siempre me he sentido querido como uno más de la familia. Hay personas que están pasando momentos difíciles y que sin embargo son un ejemplo de superación, que lo dan todo sin esperar nada a cambio, mi cuñada Cristi es una de ellas y he tenido la suerte de conocerla,...gracias.

A todas mis amistades, que han sabido comprender mi exilio, mientras me dedicaba a *luchar contra molinos de viento*, a todos...gracias.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi director de tesis, José Ramón de Andrés, su dirección, sus consejos y su paciencia. He tenido la gran fortuna de tener, además de un gran director un amigo para toda la vida, ...gracias.

Agradecer a mi secretario del tribunal, Rafael Guzmán, su celeridad, su buen hacer y sus palabras de ánimo, ...gracias.

Agradecer a todos los compañeros de mi departamento el interés y la preocupación mostrada mientras estaba realizando la tesis. Especialmente a mi compañera de mil batallas, Luz García. Desde el principio hemos trabajado codo a codo en el Departamento y nos hemos entendido perfectamente, desde el respeto y el gusto por el trabajo bien hecho, buscando la excelencia en todo momento, sin su apoyo y su amistad habría sido más difícil concluir la tesis,...gracias.

A todos los compañeros de la universidad que se han interesado por mi trabajo, especialmente a José Luis Navas, que siempre me sorprendió con una nueva noticia, o un nuevo artículo publicado sobre Leonardo. Traducirme del francés los “*Ingenieros del Renacimiento*” de Bertrand Gille ha sido un detalle precioso que no olvidaré...gracias.

A Jesús Guerrero-Strachan, por respetar mi tiempo y hacer un paréntesis en todos los trabajos que llevamos juntos, por su siempre apoyo incondicional, por su amistad, ...gracias.

No puedo dejar de olvidar en estos momentos a mi mentor, Don Pedro Portillo, aunque ya no esté con nosotros, siempre te llevaré en mi corazón, tu vida ha sido un ejemplo para todos nosotros,...gracias.

Muchas gracias a Celso Javier Roces Suárez, por permitirme publicar en el capítulo 5 de la tesis las magníficas figuras que ilustran la clasificación de los dibujos de Leonardo en máquinas, operadores y mecanismos. Sin conocerte personalmente, bastó una sola llamada telefónica y me diste el consentimiento inmediatamente, un detalle de gran generosidad,...gracias.

Al personal de la Biblioteca de la EPS por su buena disposición y colaboración en la enorme cantidad de bibliografía que hemos tenido que consultar. Libros y códigos consultados desde la BNE y todos los que se han tenido que gestionar a través del CBUA, préstamo interbibliotecario entre las universidades andaluzas, a todos...gracias.

Para Carol ... mi princesa ... mi vida ... mi amor
gracias por estos diez años tan maravillosos
gracias por ser tan comprensiva
gracias por Ángel y Cristina
...gracias

Índice general

Capítulo 1. Estado del arte	1
1.1. Antecedentes de la investigación.....	1
1.2. Objetivos de la investigación.	5
1.3. Metodología	5
1.4. Fuentes.	6
1.4.1. Fuentes directas o primarias. Producción manuscrita de Leonardo.	6
1.4.1.1. Manuscritos que conservan su estructura original.	8
1.4.1.2. Colecciones misceláneas.	12
1.4.1.3. Hojas sueltas.	14
1.4.2. Fuentes indirectas o secundarias.....	16
1.5. Contenido de la Tesis	17
Capítulo 2. Vida y Códices de Leonardo	20
2.1. Introducción.	20
2.2. Biografía de Leonardo da Vinci.	22
2.3. Descripción y contenido de los Códices de Leonardo.....	31
2.3.1. El Códice Atlántico.....	31
2.3.2. Colección Windsor.....	34
2.3.3. Códice Arundel.....	35
2.3.4. Manuscritos de Francia.....	35
2.3.5. Códices Forster.....	35
2.3.6. Códice sobre el vuelo de los pájaros.....	36
2.3.7. Códice Trivulziano.....	36
2.3.8. Códice Leicester (ex Hammer).....	36
2.3.9. Códices de Madrid.....	36
2.4.- Dispersión de los códices.....	38
Capítulo 3. Leonardo da Vinci “Ser o no ser...INGENIERO”	48
3.1. Introducción.	48
3.2. Ingeniería y pensamiento.	50
3.3. La ingeniería, motor de conocimientos científicos.	59
3.4. Los ingenieros del renacimiento. Análisis del libro de Bertrand Gille.	71
3.5. Bases científicas de los conocimientos ingenieriles de Leonardo.....	73
3.5.1. El “noble papel de la Mecánica.....	73
3.5.2. El cuerpo humano ¿una máquina perfecta?	74
3.5.3. Las máquinas de Leonardo.	76
3.5.4. Leonardo y la Ciencia de los Pesos.	80
3.5.5. Fluidos en equilibrio.....	82
3.5.6. Fuerza y movimiento. Un laberinto conceptual.	87
3.5.7. Las Cuatro “potencias “ de la Naturaleza.....	87
3.5.8. El Movimiento. Su Naturaleza según Leonardo	89
3.5.9. Fuerza y movimiento.....	90
3.5.10. Conservación de la Energía.....	92
3.5.11. Movimiento de Consumo	94
3.5.12. Peso, Fuerza y Movimiento.....	98
3.5.13. Caída de los cuerpos.....	100
3.5.14. Las trayectorias balísticas.....	104
3.5.15. El origen de las fuerzas físicas.....	105
3.5.16. Fuerza, Movimiento y Trabajo.....	107
3.5.17. Percusión: El Cuarto Poder de la Naturaleza	108

Capítulo 4. Leonardo da Vinci: INGENIERO MILITAR	115
4.1. Introducción	115
4.2. Artefactos y construcciones militares en los manuscritos de Leonardo	118
4.2.1. Armas de guerra.....	118
4.2.1.1. Cañones.....	118
4.2.1.1.1. Gran cañón (CA_0059bv).....	118
4.2.1.1.2. Bombardas (CA_0154r).....	119
4.2.1.2. Catapultas.....	120
4.2.1.2.1. Gran catapulta doble (CA_0152r).....	120
4.2.1.2.2. Catapulta múltiple tipo honda (CA_0159r).....	121
4.2.1.2.3. Trabuquete, cimitrilla y catapulta tipo honda (CA_0160r).....	122
4.2.1.2.4. Gran catapulta vertical (CA_0181r).....	124
4.2.1.2.5. Cabestrantes y catapulta doble (CA_0148r).....	125
4.2.1.3. Ballestas.....	127
4.2.1.3.1. Ballesta gigante junto con diversas armas (CA_0149r).....	127
4.2.1.4. Armas de fuego.....	128
4.2.1.4.1. Disparador automático con pedernal en el percutor (CA_0158r).....	128
4.2.2. Vehículos armados.....	129
4.2.2.1. Navío de planta circular con cañones (CA_0001r).....	129
4.2.2.2. Barco acorazado (CA_0172r).....	130
4.2.3. Máquinas de asedio y de asalto a fortificaciones.....	131
4.2.3.1. Máquina de asalto (CA_1084r).....	131
4.2.3.2. Sistema para repeler asaltos (CA_139r).....	132
4.2.4. Construcciones militares.....	133
4.2.4.1. Puentes.....	133
4.2.4.1.1. Puentes móviles (CA_0855r).....	133
4.2.4.1.2. Puente militar y artillería (CA_0071v).....	134
4.2.4.2. Baluartes y fortificaciones.....	135
4.2.4.2.1. Estudios de un baluarte (CA_0116r).....	135
4.2.4.2.2. Fortaleza de planta cuadrada (CA_0117r).....	136
 Capítulo 5. Leonardo da Vinci: INGENIERO MECÁNICO	 137
5.1. Introducción	137
5.1.1. Descripción y definiciones de la Ingeniería Mecánica.....	137
5.1.2. Breve revisión histórica.....	138
5.1.3. Asociaciones y Sociedades de Ingeniería Mecánica.....	139
5.2. Leonardo y la ingeniería mecánica en el renacimiento.....	141
5.3. Clasificación de las máquinas y mecanismos en los Códices de Leonardo.....	142
5.3.1. Introducción.....	142
5.3.2. Tipos de máquinas.....	142
5.3.3. Máquinas simples y compuestas.....	143
5.3.3.1. Máquinas simples.....	143
5.3.3.1.1. Palanca.....	143
5.3.3.1.2. Plano inclinado.....	143
5.3.3.1.3. Rueda.....	143
5.3.3.2. Máquinas compuestas.....	143
5.3.3.3. Esquema sobre máquinas simples.....	144
5.3.4. Movimiento en máquinas.....	145
5.3.5. Operadores mecánicos transformadores de movimiento.....	147
5.3.5.1. El plano inclinado: descripción y utilidad.....	148
5.3.5.2. El plano inclinado en los manuscritos de Leonardo (CM1_0064v).....	149
5.3.5.3. La rueda: descripción y utilidad.....	150
5.3.5.4. La rueda en los manuscritos de Leonardo.....	154
5.3.5.5. La polea: descripción y utilidad.....	155
5.3.5.6. Poleas y aparejos de poleas en los códices de Leonardo.....	158
5.3.5.6.1. Principios mecánicos del funcionamiento de los polipastos (MsG_0082r).....	158
5.3.5.6.2. Polipasto compuesto por 33 poleas (CM1_0036v).....	159
5.3.5.6.3. Sistema de frenado de poleas que controla la caída de la plomada de un reloj (CM1_0027r).....	159
5.3.5.6.4. Poleas múltiples para conducir engranajes y transmitir movimientos a grandes distancias (CM1_0087r y CM1_0088r).....	160
5.3.5.6.5. Tensador de poleas (CM1_0044v).....	161

5.3.5.7. Ruedas dentadas, engranajes y piñones: descripción y utilidad	162
5.3.5.8. Ruedas dentadas, engranajes y piñones en los manuscritos de Leonardo.	165
5.3.5.8.1. Análisis de los dientes de engranaje.....	166
5.3.5.8.1.1. La potencia de los dientes (CM1_0005r).....	166
5.3.5.8.1.2. Los contactos entre los dientes y las entalladuras (CM1_0116r).....	167
5.3.5.8.1.3. Dientes cuadrangulares (CM1_0118v).....	167
5.3.5.8.1.4. Dientes asimétricos en forma de sierra (CM1_0005r).	168
5.3.5.8.1.5. Dientes helicoidales: corona y piñón con engrane helicoidal (CA_1103r).....	168
5.3.5.8.1.6. Dientes cilíndricos antifricción (CA_0091r).	169
5.3.5.8.2. Estudio de los efectos combinados entre dos o más ruedas dentadas:.....	170
5.3.5.8.2.1. Dos ruedas exteriores (CM1_0015v).	170
5.3.5.8.2.2. Tres ruedas exteriores (CM1_0015v).....	170
5.3.5.8.2.3. Una rueda dentro de otra (CM1_0015v).....	171
5.3.5.8.2.4. Cuatro ruedas (tres de ellas interiores) (CM1_0015v).	171
5.3.5.8.2.5. Cinco ruedas (cuatro exteriores) (CM1_0015v).....	172
5.3.5.9. La cremallera: descripción y utilidad.	173
5.3.5.10. La cremallera en los manuscritos de Leonardo.	174
5.3.5.10.1. Gato mecánico (CA_0998r).....	174
5.3.5.11. El tornillo: descripción y utilidad.	175
5.3.5.12. El tornillo en los manuscritos de Leonardo.	178
5.3.5.12.1. Equivalencia entre un tornillo y un plano inclinado (CM1_0086v).	179
5.3.5.12.2. Potencia del tornillo (CM1_0121r)	180
5.3.5.12.3. Medición estática de la potencia del tornillo (CM1_0004v).....	180
5.3.5.12.4. Máquinas de roscar automáticas (MsB_0070v y CM1_0091v).....	181
5.3.5.12.5. Tornillo de roscas invertidas (CM1_0058v).....	182
5.3.5.12.6. Sistema formado por una secuencia de tornillos de roscas invertidas (CM1_0057v).	183
5.3.5.12.7. Tornillo como diferencial (CM1_0057v).	183
5.3.5.13. El tornillo sinfín: descripción y utilidad.....	184
5.3.5.14. El tornillo sinfín en los manuscritos de Leonardo.....	185
5.3.5.14.1. Tornillo sinfín circular (CM1_0070r).	185
5.3.5.14.2. Tornillo sinfín cóncavo (CM1_0019r).....	185
5.3.5.14.3. Tornillo sinfín que engrana con una rueda dentada (engranaje helicoidal) (CM1_0017v).	186
5.3.5.14.4. Tornillo sinfín que engrana con una cremallera circular (MsB_0072r).	187
5.3.5.15. La leva: descripción y utilidad.	188
5.3.5.16. La leva en los manuscritos de Leonardo.	190
5.3.5.16.1. Martillo accionado por leva excéntrica (CM1_0006v)	191
5.3.5.16.2. Leva excéntrica para regular la fuerza de un resorte (MsM_0081r).....	191
5.3.5.16.3. Escape de péndulo silencioso con leva senoidal (CM1_0008r).....	192
5.3.5.17. La palanca: descripción y utilidad.	193
5.3.5.18. Palanca en los manuscritos de Leonardo.....	196
5.3.5.19. Excéntrica: descripción y utilidad.....	197
5.3.5.20. La manivela: descripción y utilidad.....	199
5.3.5.21. La biela: descripción y utilidad.	200
5.3.5.22. La excéntrica, la manivela y la biela en los manuscritos de Leonardo.	201
5.3.5.23. El cigüeñal: descripción y utilidad.	201
5.3.5.24. El cigüeñal en los manuscritos de Leonardo.	202
5.3.6. Otros operadores mecánicos y mecanismos	203
5.3.6.1. La cuña: descripción y utilidad.....	204
5.3.6.2. La cuña en los manuscritos de Leonardo.....	206
5.3.6.2.1. Estudio de la potencia y disposición de las cuñas (CM1_0047r).....	206
5.3.6.2.2. Puntas de lanzas y flechas (CA_0144r)	207
5.3.6.3. La rampa: descripción y utilidad.	208
5.3.6.4. La rampa en los manuscritos de Leonardo.	210
5.3.6.5. El trinquete: descripción y utilidad.....	211
5.3.6.6. El trinquete en los manuscritos de Leonardo:	213
5.3.6.6.1. Trinquete con uñeta o gatillo inclinado (CM1_0097r).....	213
5.3.6.6.2. Trinquete con uñeta vertical (CM1_0116v).	213
5.3.6.6.3. Trinquete con uñeta o gatillo horizontal (CM1_0117r).....	214
5.3.6.7. Articulaciones, ejes, apoyos y rodamientos en los manuscritos de Leonardo.	214
5.3.6.7.1. Varios tipos de articulaciones (CM1_0100v).....	214
5.3.6.7.2. El desgaste de los ejes y apoyos.....	215

5.3.6.7.2.1. Líneas de desgaste (CM1_0132v).....	215
5.3.6.7.2.2. Desgaste del eje (CM1_0119r).....	216
5.3.6.7.2.3. Desgaste del apoyo (CM1_0118r).....	216
5.3.6.7.3. Sistema para reducir el rozamiento en los ejes de rotación	217
5.3.6.7.3.1. Lubricación (CM1_0118r).....	217
5.3.6.7.3.2. Rodamientos ajustables (CM1_0100v).....	217
5.3.6.7.3.3. Cojinetes de disco y rodillos para ejes horizontales (CM1_0012v).....	218
5.3.6.7.3.4. Soporte de ejes giratorios verticales (CM1_0101v).....	220
5.3.6.7.3.5. Rodamiento de bolas (CM1_0020V).....	221
5.3.6.7.4. Gato de tornillo con rodamiento antifricción	223
5.3.6.8. Juntas y bisagras en los manuscritos de Leonardo.	223
5.3.6.8.1. Juntas tipo cuña (CM1_0062r).....	223
5.3.6.8.2. Juntas rotativas (CM1_0062r).....	224
5.3.6.8.3. Uniones semiarticuladas (CM1_0172r).....	225
5.3.6.8.4. Bisagras para puertas (CM1_0096v).....	226
5.3.6.8.5. Bisagras para armazones desmontables (CA_0095r).....	227
5.3.6.9. Tubos de madera modulares en los manuscritos de Leonardo (CM1_0025v).....	228
5.3.6.10. Ganchos automáticos en los manuscritos de Leonardo.....	229
5.3.6.10.1. Dos ganchos automáticos con contrapesos (CM1_0009v).....	229
5.3.6.10.2. Pinzas de seguridad con liberación automática (CM1_0022r).....	230
5.3.6.10.3. Gancho automático para martinete (CA_1018v).....	232
5.3.6.11. Volantes en los manuscritos de Leonardo.....	233
5.3.6.11.1. Volantes para movimientos continuo rotativo (CM1_0114r).....	233
5.3.6.11.2. Volantes para movimientos rotativos generados por un sistema de cigüeñal (CM1_0086r).....	234
5.3.6.12. Muelles en los manuscritos de Leonardo.....	235
5.3.6.12.1. Análisis de varios tipos de muelles (CM1_0085r).....	235
5.3.6.12.2. Técnicas para la regulación de la fuerza generada por los resortes.....	236
5.3.6.12.2.1. Muelle y husillo en forma de cono (CM1_0085r).....	236
5.3.6.12.2.2. Muelle, piñón cónico y engranaje helicoidal (CM1_0016r y CM1_0045r).....	236
5.3.6.12.3. Resortes y cerraduras.....	238
5.3.6.12.3.1. Bloqueo de cerradura por resorte (CM1_0099r).....	238
5.3.6.12.3.2. Cerradura con mecanismo de palanca y resorte, con llave (CM1_0050r).....	239
5.3.6.12.3.3. Mecanismos de palanca y resorte para dispositivos detonadores automáticos para armas de fuego (CM1_0018v).....	239
5.3.6.12.4. Resorte usado como freno (CM1_0010r).....	240
5.3.6.12.5. Máquina para fabricar muelles (CM1_0014v).....	240
5.3.6.12.6. Reloj de cuerda accionado por ballestas (CA_0863r).....	241
5.3.6.12.7. Motor de resorte (CM1_0014r).....	241
5.3.6.13. Cables y correas en los manuscritos de Leonardo.....	243
5.3.6.13.1. Transmisión de movimiento por medio de cuerdas (CM1_0023r).....	243
5.3.6.13.2. Transmisión de movimiento por medio de barras y cuerdas (CM1_0031r).....	244
5.3.6.13.3. Transmisión de movimiento mediante correas (CM1_0030v).....	245
5.3.6.14. Cadenas en los manuscritos de Leonardo.....	246
5.3.6.14.1. Diferentes tipos de cadenas (CM1_0010r).....	246
5.3.6.14.2. Cadena desmontable (CM1_0010r).....	247
5.3.6.14.3. Cadena de “bicicleta” (CA-0158r).....	248
5.3.7. Mecanismos para la transmisión de movimientos.....	249
5.3.7.1. Mecanismos para transformar un movimiento giratorio continuo de entrada en giratorio continuo de salida.....	250
5.3.7.1.1. Transmisión del movimiento entre ejes paralelos.	
Engranajes cilíndricos (CM1_0013r).....	250
5.3.7.1.2. Transmisión del movimiento entre ejes perpendiculares entre sí (CM1_0015v).....	250
5.3.7.1.3. Transmisión del movimiento entre ejes inclinados (CM1_0015v).....	251
5.3.7.1.4. Movimiento giratorio continuo de entrada en giratorio continuo de salida con diferentes velocidades (CA_0077v).....	252
5.3.7.2. Mecanismos para transformar un movimiento giratorio continuo de entrada en giratorio alterno de salida.....	253
5.3.7.2.1. Piñones semidentados y corona (CM1_0017r).....	253
5.3.7.2.2. Ruedas semidentadas y piñones tipo jaula (CM1_0019v y CM1_0011v).....	254
5.3.7.2.3. Rueda semidentada y arco circular dentado (CM1_0011r).....	256

5.3.7.3. Mecanismos para transformar un movimiento giratorio continuo de entrada en movimiento lineal de salida.....	257
5.3.7.3.1. Manivela, piñón, rueda dentada y cremallera (CA_0998r).....	257
5.3.7.4. Mecanismos para transformar un movimiento giratorio continuo de entrada en movimiento lineal alterno de salida.....	258
5.3.7.4.1. Ruedas semidentadas, cremallera, y barras (CM1_0002r).....	258
5.3.7.4.2. Tornillo sinfín, corona, árbol de levas y barra (CM1_0027r).....	259
5.3.7.4.3. Rueda dentada, piñón y cremallera (CM1_0028r).....	260
5.3.7.5. Mecanismos para transformar un movimiento lineal alternativo de entrada en movimiento giratorio continuo de salida.....	261
5.3.7.5.1. Sistema doble de barras articulado con rueda dentada a modo de trinquete (CM1_0123v).....	261

Capítulo 6. Leonardo da Vinci INGENIERO HIDRÁULICO 263

6.1. Introducción.....	263
6.2. Comparativa entre el Códice Leicester y “Los veintidós libros de los ingenios y máquinas de Juanelo”.....	264
6.2.1. Obstáculos en una corriente.....	264
6.2.2. Sifones.....	265
6.2.3. Origen de los ríos.....	265
6.2.4. Ascenso del agua en una vasija por medio del calor.....	266
6.2.5. Estructuras de ingeniería sobre ríos: puentes, presas y sistemas de cimentación.....	266
6.2.6. Molinos y máquinas hidráulicas.....	266
6.3. Ingenios y proyectos hidráulicos en los manuscritos de Leonardo.....	269
6.3.1. Sistema del portón de cierre del canal (CA_0656r).....	269
6.3.2. Desvío del curso del río Arno alrededor de Pisa (CM2_0052v y CM2_0053r).....	270
6.3.3. Canal de Florencia al mar (CM2_0022v y CM2_0023r).....	271
6.3.4. Excavaciones para construcción de canales (CM2_0010r, CM2_0010v, CA_0003r, CA_0004r)....	272
6.3.5. Draga (MsE_0075v).....	274
6.3.6. La excavación del túnel de Serravalle (CM1_0110v y CM1_0111r).....	275
6.3.7. Escafandra y respirador (CA_0909v y CAr_0024v).....	277
6.3.8. Estudio de la forma de los peces y la dinámica de los barcos (MsG_0050v y CM2_0035r).....	279
6.3.9. Movimiento de los fluidos. (CM2_0024r, CM2_0064r, CM1_0134v, CM1_0151r y CM1_0152r).....	281
6.3.10. Turbina hidráulica (CM1_0022v).....	283
6.3.11. Acoplamiento entre la rueda hidráulica y el tornillo de Arquímedes (CA_0026v y CM1_0025v).....	285
6.3.12. Diversos estudios de hidráulica (CM1_0145r, CM1_0151r y CM1_0151v).....	287
6.3.13. Canal de San Cristóforo (CA_1097r).....	290
6.3.14. Máquinas para elevar el agua (CA_1069r).....	291
6.3.15. Bomba hidráulica doble (CA_0020r).....	293
6.3.16. Diferentes formas de elevar el agua (CA_0156r).....	294
6.3.17. Máquinas para elevar agua (CA_0006r).....	295

Capítulo 7. Leonardo da Vinci INGENIERO CIVIL..... 297

7.1. Introducción.....	297
7.2. Los ingenios civiles en los manuscritos de Leonardo.....	299
7.2.1. Cabrestantes para la construcción de edificios (CA_1083v).....	299
7.2.2. Máquinas elevadoras (CA_0138r).....	300
7.2.3. Grúa rotativa (CA_0965r).....	301
7.2.4. Andamios móviles con grúa giratoria (CA_808v).....	302
7.2.5. Banco de trabajo para el aserrado de piedras (CA_0002r).....	303
7.2.6. Pulidora de espejos (CA_0017v).....	304
7.2.7. Prensa de estampación (CA_0029r).....	305
7.2.8. Máquina para estirar duelas metálicas (CA_0010r).....	306
7.2.9. Máquina para fabricar limas (CA_0024r).....	307
7.2.10. Asadores automáticos (CA_0021r).....	308
7.2.11. Máquina de desbarbado (CA_1105r).....	309
7.2.12. Máquina de cardado (CA_0106r).....	310
7.2.13. Máquina para fabricar cuerdas (CA_0012r).....	310
7.2.14. Máquina de hilar accionada por manivela con uso de aleta (CA_1090v).....	311

Capítulo 8. Leonardo da Vinci INGENIERO AERONÁUTICO	313
8.1. Introducción	313
8.2. El sueño de volar de Leonardo en sus manuscritos.....	317
8.2.1. Pájaros en vuelo (CA_0845r).....	317
8.2.2. Hombre volador (CA_0166r y CA_0166v).....	318
8.2.3. Alas mecánicas.....	319
8.2.3.1. Mecanismo de ala mecánica fijándose en una libelula (CA_1051v).....	319
8.2.3.2. Experimento para probar si un ala mecánica con 200 libras de peso podía ser accionado por la fuerza del hombre (MsB_0088v).....	320
8.2.3.3. Estructura de ala mecánica de grandes dimensiones (CA_0858r).....	321
8.2.3.4. Diseño de varias alas mecánicas (CA_0846v).....	322
8.2.3.5. Estudio de alas mecánicas (CA_0070br).....	322
8.2.3.6. Estudio más preciso de un ala mecánica (CA_0844r).....	323
8.2.4. Estudio de máquinas voladoras.....	324
8.2.4.1. Estudio de máquinas aladas y paracaídas (CA_1058v).....	324
8.2.4.2. Tornillo aéreo (MsB_0083v).....	326
8.2.4.3. Ornitóptero (MsB_0080r).....	327
8.2.4.4. Máquina voladora (CA_0860r).....	328
8.2.4.5. Dispositivos de propulsión para máquina voladora (CA_0755r).....	329
8.2.4.6. Estudio ergonómico de máquina voladora (CA_0843r).....	330
8.2.4.7. Máquina voladora (CA_0824v).....	331
8.2.4.8. Artefacto volador con piloto (CA_0873r).....	332
8.2.4.9. Pilotos accionando mecanismo de propulsión para máquina voladora (CA_0897r).....	333
8.2.4.10. Ala delta (CM1_0064r).....	334
8.2.4.10. Máquina voladora y mapa de Europa (CA_1006v).....	335
Capítulo 9. El automóvil de Leonardo	337
9.1. Antecedentes.....	337
9.2. Objetivos.....	337
9.3. Génesis y evolución de la investigación del “ <i>automóvil de Leonardo</i> ” a lo largo de la historia	339
9.3.1. La tradición historiográfica.....	339
9.3.2. El error de interpretación.....	341
9.3.3. La nueva interpretación.....	341
9.3.4. Los modelos digitales y de funcionamiento.....	341
9.3.5. Fuentes.....	342
9.3.5.1. Folio 812 recto (296va) del Códice Atlántico: “El automóvil de Leonardo”.....	343
9.3.5.2. Folio 17 verso (4va) del Códice Atlántico.....	344
9.3.5.3. Folio 114 recto (40rb) del Códice Atlántico.....	345
9.3.5.4. Folio 868 recto (316ra) del Códice Atlántico.....	346
9.3.5.5. Folio 878 recto (320ra) del Códice Atlántico.....	348
9.3.5.6. Folio 878 verso (320va) del Códice Atlántico.....	348
9.3.5.7. Folio 926 recto (339ra) del Códice Atlántico.....	349
9.3.5.8. Folio 956 recto (347rb) del Códice Atlántico.....	350
9.3.5.9. Folio 956 verso (347vb) del Códice Atlántico.....	351
9.3.5.10. GDS Galería de los Uffizi, 4085Ar.....	352
9.3.5.11. GDS Galería de los Uffizi, 446 Er.....	353
9.3.5.12. GDS Galería de los Uffizi, 446 Ev.....	354
9.3.5.13. GDS Galería de los Uffizi, 447 Ev.....	355
9.3.5.14. El Códice de Madrid I, f. 0v.....	356
9.3.5.15. El Códice de Madrid I, f. 4r.....	357
9.3.5.16. El Códice de Madrid I, f. 16r.....	358
9.3.5.17. El Códice de Madrid I, f. 24r.....	359
9.3.5.18. El Códice de Madrid I, f. 45r.....	360
9.3.5.19. El Códice de Madrid I, f. 85r.....	361
9.3.5.20. El Códice de Madrid I, f. 117r.....	362
9.3.6. Interpretaciones.....	363
9.3.6.1. Guido Semenza (1928).....	363
9.3.6.2. Gerolamo Calvi (1936).....	364
9.3.6.3. Arturo Uccelli (1936).....	364
9.3.6.4. Jotti da Badia Polesine (1938).....	365

9.3.6.5. Giovanni Canestrini (1939).....	366
9.3.6.6. Mario Loria (1969).....	368
9.3.6.7. Carlo Pedretti (1975 y 1996).....	369
9.3.6.8. Enrico Gigli (1979).....	369
9.3.6.9. Augusto Marinoni (1981).....	370
9.3.6.10. Mark E. Rosheim (2001).....	371
9.3.6.11. Mario Taddei y Edoardo Zanon (2004).....	372
9.4. Anatomía de CA 812r (296va).....	373
9.4.1. Introducción.....	373
9.4.2. Recuadro A: Vista axonométrica del automóvil.....	374
9.4.3. Recuadro B: Vista en planta del automóvil.....	374
9.4.4. Recuadro 1: Engranaje de cremallera.....	375
9.4.5. Recuadro 2: Variante del engranaje de cremallera. Mecanismo auxiliar.....	377
9.4.6. Recuadro 3: Freno.....	378
9.4.7. Recuadro 4: Eje de rotación de los brazos curvos.....	380
9.4.8. Recuadro 5: Pétalo de la rueda de levas que controla la dirección.....	380
9.4.9. Recuadro 6: Tensor auxiliar.....	381
9.4.10. Recuadro 7: Boceto del eje.....	381
9.5 Modelo digital 3D.....	383
9.5.1. Introducción.....	383
9.5.2. Vistas.....	383
9.5.2.1. Vistas principales.....	383
9.5.2.2. En perspectiva.....	384
9.5.2.3. Vista explosionada.....	385
9.5.2.4. Vistas por componentes.....	386
9.5.3.1. Motor de muelles.....	388
9.5.3.2. Ruedas dentadas horizontales.....	388
9.5.3.3. Sistema de transmisión angular.....	389
9.5.3.4. Transmisión de la potencia a las ruedas.....	389
9.5.3.5. Mecanismo de escape.....	390
9.5.3.6. Rueda de pétalos (levas).....	390
9.5.3.7. Dirección programable.....	392
9.5.3.8. Mecanismo auxiliar.....	394
9.5.3.9. Freno a distancia.....	395

Capítulo 10. CONCLUSIONES..... 397

Apéndice A. BIBLIOGRAFIA..... 401

Apéndice B. TABLAS BASE DE DATOS..... 409

B.1. Introducción.....	409
B.2. Correspondencias entre los Códices de Leonardo en temas de mecánica técnica.....	409
B.2.1. Correspondencias en temas de mecánica técnica entre el Códice Atlántico y el Códice de Madrid I.....	409
B.2.2. Correspondencias en temas de mecánica técnica entre el Manuscrito A de Francia y el Códice de Madrid I.....	412
B.2.3. Correspondencias en temas de mecánica técnica entre los Códices Forster y el Códice de Madrid I.....	413
B.2.4. Correspondencias en temas de mecánica técnica entre el Manuscrito H de Francia y el Códice de Madrid I.....	415
B.3. Estudios arquitectónicos y urbanísticos en los manuscritos de Leonardo.....	415
B.3.1. Códice Atlántico.....	415
B.3.2. Códice Arundel.....	417
B.3.3. Códices Forster I y II.....	417
B.3.4. Manuscritos de Francia.....	418
B.3.5. Códices de Madrid I y II.....	419
B.3.6. Códice Trivulziano.....	420
B.3.8. Colección Windsor.....	421

Apéndice C. Glosario técnico usado por Leonardo en sus manuscritos..... 423

Índice de figuras

Capítulo 1. Estado del arte

Figura 1.1: Justificación del caos compositivo del cuaderno. Códice Arundel, f. 0001r..... 7

Capítulo 3. Leonardo da Vinci “Ser o no ser...INGENIERO”

Figura 3.1: Máquina para estirar duelas metálicas. Códice Atlántico, f. 0010r (detalle). 79

Figura 3.2: Eje de la balanza, polea y peso. Manuscrito B de Francia, f. 0065r 81

Figura 3.3: Viga pivotante que está en equilibrio con dos fuerzas en ángulos diferentes.
Manuscrito B de Francia, f. 0065r (CLAGETT, 1999) 81

Figura 3.4: Experimento para determinar la fuerza de empuje. Códice de Madrid I, f. 0181r 83

Figura 3.5: Ilustración de la cantidad de agua desplazada por un barco flotante
Códice de Madrid I, f. 0123v (detalle). 83

Figura 3.6: La medición de la variación de la presión del agua con la profundidad por medio de una serie de placas móviles, sostenidas por contrarrestar las fuerzas que se generan por los pesos y se transmiten a las placas a través de cadenas y poleas. plazada por un barco flotante. Códice Leicester, f. 0006r (detalle). 84

Figura 3.7: Explicación esquemática de la ley de los vasos comunicantes.
Códice de Madrid I, f. 0150r (detalle). 87

Figura 3.8: Chorros de agua que caen de un recipiente desde 4 alturas diferentes.
Códice de Madrid I, f. 0134v (detalle). 94

Figura 3.9: Rodamiento de bolas. Códice de Madrid I, f. 0020v (detalle). 96

Figura 3.10: Comparación entre la trayectoria de dos pelotas. Manuscrito A de Francia, f. 0024r 97

Figura 3.11: Determinación del centro de gravedad del tetraedro. Códice Arundel, f. 0218v 101

Figura 3.12: Movimiento acelerado en un plano inclinado.
Manuscrito M de Francia, f. 0042v (detalle) 103

Figura 3.13: Representación gráfica del movimiento acelerado en un plano inclinado
(CLAGETT, 1999) 103

Figura 3.14: Pérdida de energía en un movimiento pendular. Códice de Madrid I, f. 0147r (detalle)..... 104

Figura 3.15: Ritmos regulares del vaivén de un péndulo para arcos pequeños
Códice de Madrid I, f. 0147r (detalle). 105

Figura 3.16: Trayectorias parabólicas para diferentes ángulos de lanzamiento.
Como es habitual en los diagramas de Leonardo, la dirección del movimiento es de derecha a izquierda. Códice de Madrid I, f. 0147r (detalle). 106

Figura 3.17: Chorros de agua parabólicos con resistencia al aire.
Manuscrito C de Francia, f. 0007r (detalle). 106

Figura 3.18: Propagación de las ondas de sonido desde una campana hasta una oreja
Manuscrito C de Francia, f. 0016r (detalle). 111

Figura 3.19: Estudios de colisiones elástica e inelásticas. Manuscrito A de Francia, f. 0008r 112

Figura 3.20: Dibujo que explica la ley de la reflexión. Manuscrito A de Francia, f. 0019r 113

Capítulo 4. Leonardo da Vinci: INGENIERO MILITAR

Figura 4.1: Gran cañón. Códice Atlántico, f. 0059bv 118

Figura 4.2: Bombardas. Códice Atlántico, f. 0154r 119

Figura 4.3: Gran catapulta doble. Códice Atlántico, f. 0152r 120

Figura 4.4: Catapulta múltiple tipo honda. Códice Atlántico, f. 0159r 121

Figura 4.5: Trabuquete y cimitrilla. Códice Atlántico, f. 0160r 122

Figura 4.6: Catapulta tipo honda. Códice Atlántico, f. 0160r 123

Figura 4.7: Gran catapulta vertical. Códice Atlántico, f. 0181r 123

Figura 4.8: Cabestrantes y catapulta. Códice Atlántico, f. 0148ra 125

Figura 4.9: Catapulta doble. Códice Atlántico, f. 0148rb 126

Figura 4.10: Ballestas y bombardas. Códice Atlántico, f. 0149ra 126

Figura 4.11: Ballesta gigante. Códice Atlántico, f. 0149rb 127

Figura 4.12: Disparador automático con pedernal en el percutor. Códice Atlántico, f. 0158r 128

Figura 4.13: Navío de planta circular con cañones. Códice Atlántico, f. 0001r 129

Figura 4.14: Barco acorazado. Códice Atlántico, f. 0172r 130

Figura 4.15: Máquina de asalto. Códice Atlántico, f. 1084r 131

Figura 4.16: Sistema para repeler asaltos. Códice Atlántico, f. 0139r 132

Figura 4.17: Puentes móviles. Códice Atlántico, f. 0855r 133

Figura 4.18: Puente militar y artillería. Códice Atlántico, f. 0071v..... 134
Figura 4.19: Estudios de un baluarte. Códice Atlántico, f. 0116r..... 135
Figura 4.20: Fortaleza de planta cuadrada. Códice Atlántico, f. 0117r 136

Capítulo 5. Leonardo da Vinci: INGENIERO MECÁNICO

Figura 5.0: Esquema sobre máquinas simples 144
Figura 5.1: Movimiento giratorio o de rotación del eje de un molino y circular de sus aspas 145
Figura 5.2: Movimiento giratorio alternativo y oscilante del péndulo de un reloj 146
Figura 5.3: Movimiento lineal continuo..... 146
Figura 5.4: Movimiento lineal alternativo. 146
Figura 5.5: Plano inclinado en la naturaleza y en un hacha..... 148
Figura 5.6: Plano inclinado usado como rampa. 148
Figura 5.7: Plano inclinado como husillo (izq.) y como cuña (hacha de la der.) 149
Figura 5.8: Estudio del plano inclinado. Códice de Madrid I, f. 0064v..... 150
Figura 5.9: Rueda y sus derivados..... 151
Figura 5.10: Composición de la rueda..... 152
Figura 5.11: Rueda de transporte, en una carretilla 153
Figura 5.12: Rueda de palas, en una noria..... 153
Figura 5.13: Ruedas como operador transmisor de movimiento de giratorio entre ejes..... 154
Figura 5.14: Rueda como polea, para elevar pesos..... 154
Figura 5.15: Rueda como excéntrica. 155
Figura 5.16: Diferentes muestras de tipos de ruedas en los manuscritos de Leonardo. 156
Figura 5.17: Partes de una polea..... 157
Figura 5.18: Formas del perímetro acanalado de las poleas. 157
Figura 5.19: Cambio de la dirección de una fuerza con polea. 158
Figura 5.20: Polea de correa para la transmisión de movimiento giratorio entre dos ejes..... 158
Figura 5.21: Polipasto. 159
Figura 5.22: Principios mecánicos del funcionamiento de los polipastos. Ms. G, f. 0082r 160
Figura 5.23: Polipasto compuesto por 33 poleas. Códice de Madrid I, f. 0036v 161
Figura 5.24: Mecanismo de frenado por poleas de la plomada de un reloj..... 161
Figura 5.25: Poleas múltiples. Códice de Madrid I, f. 0087r (izq.) y f. 0088r (der.) 162
Figura 5.26: Dispositivo de estiramiento por poleas. Códice de Madrid I, f. 0044v 163
Figura 5.27: Engranaje recto y piñón. 164
Figura 5.28: Tornillo sinfín y cremallera. 164
Figura 5.29: Sistema de transmisión rueda-linterna 165
Figura 5.30: Sistema de engranajes rectos. 165
Figura 5.31: Sistema sinfín-piñón 165
Figura 5.32: Sistema cadena-piñón. 166
Figura 5.33: Sistema cremallera-piñón. 166
Figura 5.34: Detalle del engrane de ruedas dentadas. Códice de Madrid I, f. 0005r 168
Figura 5.35: Contacto entre dientes de engranaje. Códice de Madrid I, f. 0116r 169
Figura 5.36: Distancia entre dientes y longitud del diente. Códice de Madrid I, f. 0118v..... 169
Figura 5.37: Ruedas con dientes de sierra. Códice de Madrid I, f. 0005r 170
Figura 5.38: Detalle de engrane helicoidal. Códice Atlántico, f. 1103r..... 170
Figura 5.39: Dientes cilíndricos antifricción. Códice Atlántico, f. 0091r 171
Figura 5.40: Dientes cilíndricos antifricción. Detalle ampliado. Códice Atlántico, f. 0091r 171
Figura 5.41: Dos ruedas que engranan exteriormente. Códice de Madrid I, f. 0015v (detalle)..... 172
Figura 5.42: Tres ruedas que engranan exteriormente. Códice de Madrid I, f. 0015v (detalle)..... 172
Figura 5.43: Rueda engranando interiormente. Códice de Madrid I, f. 0015v (detalle) 173
Figura 5.44: Engrane de 4 ruedas, tres de ellas interiormente. Códice de Madrid I, f. 0015v (detalle).. 173
Figura 5.45: Engrane de 5 ruedas, 4 de ellas exteriormente. Códice de Madrid I, f. 0026v (detalle) 174
Figura 5.46: Cremallera..... 175
Figura 5.47: Mecanismo cremallera-piñón. 175
Figura 5.48: Gato mecánico. Códice Atlántico, f. 0998r..... 176
Figura 5.49: Tornillo, rosca y plano inclinado 177
Figura 5.50: Partes de un tornillo 177
Figura 5.51: Rosca a derecha o izquierda (fig. de izq.) y roscas sencilla y doble (fig. der.)..... 178
Figura 5.52: Diámetro y longitud del tornillo. 178
Figura 5.53: Paso y avance de un tornillo. 179
Figura 5.54: Utilidad del tornillo como elemento de unión 179
Figura 5.55: Utilidad del husillo, convierte el movimiento giratorio en lineal. 180
Figura 5.56: Tornillo y plano inclinado. Códice de Madrid I, f. 0086v 181
Figura 5.57: Potencia del tornillo. Códice de Madrid I, f. 0121r 182
Figura 5.58: Mecanismo para medir la fuerza de un tornillo. Códice de Madrid I, f. 0004v..... 182

Figura 5.59: Máquina de roscar automática. Ms. B, f. 0070v.....	183
Figura 5.60: Máquina de roscar simplificada. Códice de Madrid I, f. 0091v.....	183
Figura 5.61: Tornillo de roscas invertidas. Códice de Madrid I, f. 0058r.....	184
Figura 5.62: Secuencia formada por varios tornillos de rosca invertida Códice de Madrid I, f. 0057v.....	185
Figura 5.63: Uso del tornillo como diferencial. Códice de Madrid I, f. 0057v.....	185
Figura 5.64: Tornillo sinfín.....	186
Figura 5.65: Mecanismo sinfín-piñón.....	186
Figura 5.66: Tornillo sinfín circular.Códice de Madrid I, f. 0070r.....	187
Figura 5.67: Tornillo sinfín cóncavo. Códice de Madrid I, f. 0019r.....	187
Figura 5.68: Tornillo sinfín que engrana con una rueda dentada (engranaje helicoidal). Códice de Madrid I, f. 0017v.....	188
Figura 5.69: Tornillo sinfín que engrana con una cremallera circular. Ms. B, f. 0072r.....	189
Figura 5.70: Descripción de la leva.....	190
Figura 5.71: Seguidores radiales (izq.) y seguidor oscilante (der.) en una leva.....	190
Figura 5.72: Diferentes perfiles de leva.....	190
Figura 5.73: Leva como transmisor de movimiento giratorio en lineal alterno.....	191
Figura 5.74: Martillo accionado por leva. Códice de Madrid I, f. 0006v (detalle).....	192
Figura 5.75: Mecanismo “stack-freed”. Ms. M, f. 0081r.....	193
Figura 5.76: Escape de péndulo silencioso con leva sinusoidal. Códice de Madrid I, f. 0008r.....	194
Figura 5.77: Descripción de las fuerzas y distancias en la palanca.....	195
Figura 5.78: Desplazamientos de la potencia y de la resistencia en la palanca.....	196
Figura 5.79: Palanca de primer grado.....	198
Figura 5.80: Palanca de segundo grado.....	198
Figura 5.81: Palanca de tercer grado.....	198
Figura 5.82: Palanca.Códice de Madrid I, f. 0023r.....	199
Figura 5.83: Partes de una excéntrica.....	200
Figura 5.84: Trayectoria del eje excéntrico.....	200
Figura 5.85: Molino de mano.....	201
Figura 5.86: Mecanismo excéntrica-palanca-biela.....	201
Figura 5.87: Mecanismo excéntrica-biela.....	202
Figura 5.88: Descripción de la manivela.....	203
Figura 5.89: De la excéntrica a la manivela.....	203
Figura 5.90: Descripción de la biela.....	204
Figura 5.91: Biela: conversión del movimiento giratorio en lineal alternativo.....	204
Figura 5.92: Partes de un cigüeñal.....	206
Figura 5.93: Conversión del movimiento giratorio del cigüeñal en lineal alternativo.....	207
Figura 5.94: Cigüeñal Códice de Madrid I, f. 0086r (detalle).....	207
Figura 5.95: Cuña.....	209
Figura 5.96: Estudio de las fuerzas que ejerce una cuña.....	209
Figura 5.97: Cuña como hacha.....	210
Figura 5.98: Estudio de la cuña. Códice de Madrid I, f. 0047r.....	211
Figura 5.99: Puntas de lanzas y flechas. Códice Atlántico, f. 144r (detalle).....	212
Figura 5.100: Descripción de una rampa.....	213
Figura 5.101: Rampa de acceso para reducir esfuerzos.....	214
Figura 5.102: Rampa como guía.....	214
Figura 5.103: Escaleras.Códice Atlántico, f. 0045ar (detalle).....	215
Figura 5.104: Trinquete.....	216
Figura 5.105: Uñeta actuando de freno en el trinquete.....	216
Figura 5.106: Gato de trinquete. Transforma el movimiento oscilante en lineal discontinuo.....	218
Figura 5.107: Freno de mano. Trinquete como limitador del sentido de giro.....	218
Figura 5.108: Trinquete con uñeta inclinada. Códice de Madrid I, f. 0097r (detalle).....	219
Figura 5.109: Trinquete con uñeta vertical. Códice de Madrid I, f. 0116v (detalle).....	219
Figura 5.110: Trinquete con uñeta horizontal. Códice de Madrid I, f. 0117r (detalle).....	220
Figura 5.111: Varios tipos de articulaciones. Códice de Madrid I, f. 0100v.....	221
Figura 5.112: Línea de desgaste. Códice de Madrid I, f. 0132v (detalle).....	221
Figura 5.113: Desgaste del eje. Códice de Madrid I, f. 0119r (detalle).....	222
Figura 5.114: Desgaste del apoyo. Códice de Madrid I, f. 0118r (detalle).....	222
Figura 5.115: Lubricación automática para ejes. Códice de Madrid I, f. 0118r (detalle).....	223
Figura 5.116: Rodamientos ajustables.....	223
Figura 5.117: Cojinetes de disco y rodillo para ejes horizontales. Códice de Madrid I, f. 0012v (detalle).....	224
Figura 5.118: Eje horizontal descansando sobre un solo rodillo. Códice de Madrid I, f. 0012v (detalle).....	224
Figura 5.119: Eje apoyado en tres rodillos. Códice de Madrid I, f. 0012v (detalle).....	225
Figura 5.120: Eje apoyado en tres secciones de disco. Códice de Madrid I, f. 0012v (detalle).....	225

Figura 5.121: Rodamientos de rodillos móviles con forma de cono truncado. Código de Madrid I, f. 0101v (detalle).....	226
Figura 5.122: Rodamiento de bolas para ejes verticales. Código de Madrid I, f. 0101v (detalle).....	227
Figura 5.123: Rodamiento de bolas. Código de Madrid I, f. 0020v (detalle).....	228
Figura 5.124: Gato de tornillo con rodamiento antifricción Código de Madrid I, f. 0026r (detalle).....	229
Figura 5.125: Juntas tipo cuña. Código de Madrid I, f. 0062r (detalle).....	229
Figura 5.126: Juntas rotativas. Código de Madrid I, f. 0062r (detalle).....	230
Figura 5.127: Uniones semiarticuladas. Código de Madrid I, f. 0172r.....	231
Figura 5.128: Bisagras para puertas. Código de Madrid I, f. 0096v.....	232
Figura 5.129: Bisagras para armazones desmontables. Código Atlántico, f. 0095r.....	233
Figura 5.130: Bisagras para puertas. Código de Madrid I, f. 0025v.....	234
Figura 5.131: Ganchos automáticos con contrapesos. Código de Madrid I, f. 0009v (detalle).....	235
Figura 5.132: Pinzas de seguridad con liberación automática. Código de Madrid I, f. 0022r (detalle)....	236
Figura 5.133: Gancho automático para martinete. Código Atlántico, f. 1018v.....	238
Figura 5.134: Volantes, estudio del movimiento continuo rotativo. Código de Madrid I, f. 0114r.....	239
Figura 5.135: Volantes y cigüeñal. Código de Madrid I, f. 0086r (detalle).....	240
Figura 5.136: Detalles de diferentes tipos de muelles. Código de Madrid I, f. 0085r (detalle).....	241
Figura 5.137: Muelle y husillo en forma de cono. Código de Madrid I, f. 0085r (detalle).....	242
Figura 5.138: Muelle, piñón cónico y engranaje helicoidal. Código de Madrid I, f. 0016r (detalle).....	242
Figura 5.139: Muelle, piñón cónico y engranaje helicoidal. Código de Madrid I, f. 0045r (detalle).....	243
Figura 5.140: Cerradura. Posición cerrada (fig. superior) y posición abierta (fig. inferior). Código de Madrid I, f. 0099v (detalle).....	244
Figura 5.141: Cerradura de palanca y resorte con llave. Código de Madrid I, f. 0050r (detalle).....	245
Figura 5.142: Detonador automático para armas de fuego. Código de Madrid I, f. 0018v (detalle).....	245
Figura 5.143: Freno accionado por muelle circular. Código de Madrid I, f. 0010r (detalle).....	246
Figura 5.144: Máquina para fabricar muelles. Código de Madrid I, f. 0014v (detalle).....	246
Figura 5.145: Mecanismo de cuerda de un reloj accionado por ballestas. Código Atlántico, f. 0863r ...	247
Figura 5.146: Motor de resorte. Código de Madrid I, f. 0014r (detalle superior del folio).....	247
Figura 5.147: Motor de resorte. Código de Madrid I, f. 0014r (detalle inferior del folio).....	248
Figura 5.148: Sistemas de transmisión por cuerdas. Código de Madrid I, f. 0023r.....	249
Figura 5.149: Sistemas de transmisión por medio de barras y cuerdas. Código de Madrid I, f. 0031r (detalle).....	250
Figura 5.150: Sistemas de transmisión por correas. Código de Madrid I, f. 0030v (detalle).....	251
Figura 5.151: Diferentes tipos de cadenas. Código de Madrid I, f. 0010r (detalle).....	252
Figura 5.152: Cadena desmontable. Código de Madrid I, f. 0010r (detalle).....	253
Figura 5.153: Detalle de cadena tipo "bicicleta" en mecanismo automático de pedernal-disparador de arma de fuego. Código Atlántico, f. 0158r.....	254
Figura 5.154: Engrane: ejes paralelos. Código de Madrid I, f. 0013r (detalle).....	256
Figura 5.155: Engrane: ejes perpendiculares. Código de Madrid I, f. 0015v (detalle).....	256
Figura 5.156: Engrane: ejes inclinados. Código de Madrid I, f. 0015v (detalle).....	257
Figura 5.157: En el dibujo inferior engrane entre tres ruedas dentadas coaxiales.....	258
Figura 5.158: Piñones semidentados y corona. Código de Madrid I, f. 0017r (detalle).....	259
Figura 5.159: Ruedas semidentadas y piñones. Código de Madrid I, f. 0019v (detalle).....	260
Figura 5.160: Ruedas semidentadas y piñones. Código de Madrid I, f. 0011v (detalle).....	261
Figura 5.161: Ruedas semidentadas y sector circular. Código de Madrid I, f. 0011r (detalle).....	262
Figura 5.162: Mecanismo para convertir un movimiento giratorio continuo en lineal. Código Atlántico, f. 0998r (posiblemente no fue dibujado por Leonardo).....	263
Figura 5.163: Engranaje y árbol de levas. Código de Madrid I, f. 0027r (detalle).....	264
Figura 5.164: Rueda dentada, piñón y cremallera. Código de Madrid I, f. 0028r.....	265
Figura 5.165: Mecanismo para convertir un movimiento giratorio continuo en lineal alternativo. Código de Madrid I, f. 0002r.....	266
Figura 5.166: Sistema doble de barras articulado. Código de Madrid I, f. 0123v.....	267

Capítulo 6. Leonardo da Vinci: INGENIERO HIDRÁULICO

Figura 6.1: Sistema de portón de cierre de canal. Código Atlántico, f. 0656r.....	270
Figura 6.2: Desvío del curso del río Arno alrededor de Pisa. Código de Madrid II, f. 0052v y f. 0053r.....	271
Figura 6.3: Canal de Florencia al mar. Código de Madrid II, f. 0022v y f. 0023r.....	272
Figura 6.4: Canal de Florencia al mar. Código de Madrid II, f. 0010v.....	273
Figura 6.5: Grúa excavadora de canal. Código Atlántico, f. 0003r.....	274
Figura 6.6: Grúa excavadora de canal. Código Atlántico, f. 0004r.....	274

Figura 6.7:	Draga. Manuscrito E de Francia, f. 0075v	275
Figura 6.8:	Excavación del túnel de Serravalle. Códice de Madrid I, f. 0110v	276
Figura 6.9:	Excavación del túnel de Serravalle. Códice de Madrid I, f. 0111r	277
Figura 6.10:	Escafandra. Códice Atlántico, f. 0909v (detalle)	278
Figura 6.11:	Escafandra y tubo respirador. Códice Arundel, f. 0024v	279
Figura 6.12:	Estudio hidrodinámico. Manuscrito G de Francia, f. 0050v	280
Figura 6.13:	Dinámica de los barcos. Códice de Madrid II, f. 0035r	281
Figura 6.14:	Estudio del movimiento de las olas del mar. Códice de Madrid II, f. 0024r (detalle)	282
Figura 6.15:	Estudio del movimiento de las olas del mar. Códice de Madrid II, f. 0064r (detalle)	282
Figura 6.16:	Estudio experimental sobre la caída del agua para mover ruedas de molino. Códice de Madrid I	283
Figura 6.17:	Estudio experimental sobre la caída del agua para mover ruedas de molino. Códice de Madrid I, f. 0151r y f. 0152r	283
Figura 6.18:	Turbina hidráulica. Códice de Madrid I, f. 0022v	285
Figura 6.19:	Rueda hidráulica y tornillo de Arquímedes. Códice Atlántico, f. 0026v	286
Figura 6.20:	Conductos de agua en madera. Códice de Madrid I, f. 0025v	287
Figura 6.21:	Imposibilidad del movimiento perpetuo accidental. Códice de Madrid I, f. 0151r (detalle)	288
Figura 6.22:	Imposibilidad del movimiento perpetuo accidental. Códice de Madrid I, f. 0145r	289
Figura 6.23:	Cálculos de los canales que llevan el agua hasta los molinos y la fuerza que realiza para moverlos. Códice de Madrid I, f. 0151v	291
Figura 6.24:	Canal de San Cristóforo. Códice Atlántico, f. 1097r	292
Figura 6.25:	Máquinas para elevar el agua. Códice Atlántico, f. 1069r	293
Figura 6.26:	Rueda hidráulica y tornillo de Arquímedes. Códice Atlántico, f. 1069r (detalle)	294
Figura 6.27:	Máquinas para elevar el agua y dispositivo de respiración submarina. Códice Atlántico, f. 1069r (detalle)	294
Figura 6.28:	Bomba hidráulica doble. Códice Atlántico, f. 0020r (detalle)	295
Figura 6.29:	Diferentes formas de elevar el agua. Códice Atlántico, f. 0156r (detalle)	296
Figura 6.30:	Máquinas para elevar el agua. Códice Atlántico, f. 0006r (detalle)	297

Capítulo 7. Leonardo da Vinci: INGENIERO CIVIL

Figura 7.1:	Cabrestantes. Códice Atlántico, f. 1083r	299
Figura 7.2:	Máquinas elevadoras. Códice Atlántico, f. 0138r	300
Figura 7.3:	Grúa rotativa. Códice Atlántico, f. 0965r	301
Figura 7.4:	Andamios móviles con grúa giratoria. Códice Atlántico, f. 0808v	302
Figura 7.5:	Banco de trabajo para el aserrado de piedras. Códice Atlántico, f. 0002r	303
Figura 7.6:	Máquina para pulir espejos cóncavos. Códice Atlántico, f. 0017v	304
Figura 7.7:	Prensa de estampación. Códice Atlántico, f. 0029r (detalle)	305
Figura 7.8:	Máquina para estirar duelas metálicas. Códice Atlántico, f. 0010r	306
Figura 7.9:	Máquina para fabricar limas. Códice Atlántico, f. 0024r	307
Figura 7.10:	Asadores automáticos. Códice Atlántico, f. 0021r	308
Figura 7.11:	Máquina de desbarbado. Códice Atlántico, f. 1105r (detalle)	309
Figura 7.12:	Máquina de cardado. Códice Atlántico, f. 0106r	310
Figura 7.13:	Máquina para fabricar cuerdas. Códice Atlántico, f. 0012r	310
Figura 7.14:	Máquina de hilar accionada por manivela con uso de aleta. Códice Atlántico, f. 1090v	311

Capítulo 8. Leonardo da Vinci: INGENIERO AERONÁUTICO

Figura 8.1:	Primeros estudios de máquina voladora. Galería de los Uffizi (Florence), f. 447E	314
Figura 8.2:	Dédalo. Paneles que decoran la base del campanario de Giotto. Es la torre campanario de la iglesia Santa María del Fiore, Catedral de Florencia	314
Figura 8.3:	Estudio de pájaros en vuelo. Códice Atlántico, f. 0845r	317
Figura 8.4:	Hombre volador y estructura alada. Códice Atlántico, ff. 0166r y 0166v	318
Figura 8.5:	Detalle ampliado del hombre volador. Códice Atlántico, f. 0166r (detalle)	318
Figura 8.6:	Estudio del mecanismo accionador de ala mecánica tomando como referencia una libélula. Códice Atlántico, f. 1051v	319
Figura 8.7:	Experimento para probar si la fuerza humana era capaz de batir un ala mecánica con 200 libras de peso. Manuscrito B de Francia, f. 0088v	320
Figura 8.8:	Ala mecánica. Códice Atlántico, f. 0858r	321
Figura 8.9:	Estudio de varias alas mecánicas. Códice Atlántico, f. 0846v	322
Figura 8.10:	Estudio de alas mecánicas. Códice Atlántico, f. 0070br	322

Figura 8.11: Estudio de ala mecánica. Códice Atlántico, f. 0844r.....	323
Figura 8.12: Dispositivos con alas mecánicas. Códice Atlántico, f. 1058v	324
Figura 8.13: Hombre en paracaídas. Códice Atlántico, f. 1058v (detalle).....	325
Figura 8.14: Tornillo aéreo. Manuscrito B de Francia, f. 0083v (detalle)	326
Figura 8.15: Ornitóptero. Manuscrito B de Francia, f. 0080r.....	327
Figura 8.16: Máquina voladora. Códice Atlántico, f. 0860r.....	328
Figura 8.17: Dispositivos de propulsión para máquina voladora. Códice Atlántico, f. 0755r.....	329
Figura 8.18: Estudio ergonómico de máquina voladora. Códice Atlántico, f. 0843r.....	330
Figura 8.19: Máquina voladora. Códice Atlántico, f. 0824v	331
Figura 8.20: Artefacto volador con piloto. Códice Atlántico, f. 0873r	332
Figura 8.21: Pilotos accionando mecanismo de propulsión para máquina voladora. Códice Atlántico, f. 0897r.....	333
Figura 8.22: Folio 1006v y detalle ampliado de máquina voladora junto a unas escaleras. Códice Atlántico, f. 1006v	334
Figura 8.23: Ala delta. Códice de Madrid I, f. 0064r	335

Capítulo 9. El automóvil de Leonardo

Figura 9.1: El automóvil de Leonardo. Códice Atlántico, f. 0812r (296va).....	343
Figura 9.2: Folio 17va (4va). Códice Atlántico.....	344
Figura 9.3: Folio 114r (40rb). Códice Atlántico.....	345
Figura 9.4: Folio 868r (316ra). Códice Atlántico.....	346
Figura 9.5: Detalle ampliado (sup-der). Folio 868r (316ra). Códice Atlántico.....	346
Figura 9.6: Detalle ampliado (sup-izq.). Folio 868r (316ra). Códice Atlántico.....	347
Figura 9.7: Folio 878r (320ra). Códice Atlántico.....	348
Figura 9.8: Folio 878v (320va). Códice Atlántico.....	348
Figura 9.9: Folio 926r (339ra). Códice Atlántico.....	349
Figura 9.10: Folio 956r (347rb).Códice Atlántico.....	350
Figura 9.11: Folio 956v (347vb). Códice Atlántico.....	351
Figura 9.12: Folio 4085 Ar.Galería de los Uffizi (Florenca), GDR.....	352
Figura 9.13: Folio 446 Er.Galería de los Uffizi (Florenca), GDR.....	353
Figura 9.14: Folio 446 Ev.Galería de los Uffizi (Florenca), GDR.....	354
Figura 9.15: Folio 447 Ev. Galería de los Uffizi (Florenca), GDR.....	355
Figura 9.16: Folio 0v., Códice Madrid I.....	356
Figura 9.17: Folio 4r. Códice Madrid I	357
Figura 9.18: Folio 16r. Códice Madrid I	358
Figura 9.19: Folio 24r. Códice Madrid I	359
Figura 9.20: Folio 45r.Códice Madrid I.....	360
Figura 9.21: Folio 85r.Códice Madrid I	361
Figura 9.22: Folio 117r. Códice Madrid I.....	362
Figura 9.23: Interpretación del “automóvil” de Leonardo por Guido Semenza. ARCHION, Archivo di storia della scienza (Roma), Vol. IX, Nº 1 Marzo de 1928	363
Figura 9.24: “Vita di Leonardo”.Publicado en 1936 por Gerolamo Calvi.....	364
Figura 9.25: Publicaciones de Uccelli. En “La Lettura” (1936) y en “Raccolta Vinciana”(1934-1939).....	365
Figura 9.26: Publicación de Jotti. Artículo titulado “Leonardo e l’automobile” en 1938.	366
Figura 9.27: Canestrini. Diferentes publicaciones en 1939.	367
Figura 9.28: Publicación de Mario Loria. Actas del Simposio Internacional de la Historia de la Ciencia. Vinci, Florenca (1969)	368
Figura 9.29: Publicaciones en las que interviene Carlo Pedretti.(1975 - 1996).....	369
Figura 9.30: Publicación de Enrico Gigli.(1979).....	370
Figura 9.31: Publicaciones de Augusto Marinoni.(1983 - 1987).....	371
Figura 9.32: Publicación de Mark E. Rosheim. (2001).....	372
Figura 9.33: Publicación de Taddei y Zanon. Le Macchine di Leonardo.	372
Figura 9.34: Análisis diferenciado por partes del folio.Códice Atlántico. f. 812 r	374
Figura 9.35: Recuadro A. Vista en perspectiva del automóvil de Leonardo. Códice Atlántico. f. 812 r (detalle)	375
Figura 9.36: Recuadro B. Vista en planta del automóvil de Leonardo. Códice Atlántico. f. 812 r (detalle)	375
Figura 9.37: El modelo digital superpuesto sobre el diseño en planta de recuadro B	376
Figura 9.38: Recuadro 1. Boceto de engranaje de cremallera.Códice Atlántico. f. 812 r (detalle).....	376
Figura 9.39: El modelo digital superpuesto. El diseño del recuadro 1 coincide perfectamente con él.	377
Figura 9.40: Recuadro 2. Mecanismo auxiliar.Códice Atlántico. f. 812 r (detalle)	377
Figura 9.41: El modelo digital superpuesto.....	378

Figura 9.42:	Recuadro 3. Freno.Código Atlántico. f. 812 r (detalle).....	378
Figura 9.43:	El modelo virtual ofrece una interpretación al boceto diseñado por Leonardo.....	379
Figura 9.44:	El soporte con el freno implementado.....	379
Figura 9.45:	La cuerda fijada a la anilla del soporte sirve para desbloquear el freno e iniciar el movimiento del automóvil.....	379
Figura 9.46:	Recuadro 4. Eje de rotación y brazos curvos.Código Atlántico. f. 812 r (detalle)	380
Figura 9.47:	El modelo digital se superpone perfectamente.....	380
Figura 9.48:	Recuadro 5. Pétalo de la rueda de levas.Código Atlántico. f. 812 r (detalle).....	380
Figura 9.49:	En el recuadro 5 se observó sólo un eje de fijación de las levas. En el modelo virtual aparece fijo con dos ejes para conferirle mayor estabilidad.	381
Figura 9.50:	Recuadro 6. Tensor auxiliar.Código Atlántico. f. 812 r (detalle).....	382
Figura 9.51:	Recuadro 7. Boceto del eje de rotación.Código Atlántico. f. 812 r (detalle).....	382
Figura 9.52:	Vistas principales del automóvil. Imagen de síntesis. Imagen generada por ordenador (3dsmax2015). Fuente: elaboración propia.....	383
Figura 9.53:	Vista en perspectiva del automóvil. Modelo alámbrico. Imagen de síntesis. Imagen generada por ordenador (3dsmax2015). Fuente: elaboración propia.....	384
Figura 9.54:	Vista en perspectiva del automóvil. Modelo realista. Imagen de síntesis. Imagen generada por ordenador (3dsmax2015). Fuente: elaboración propia.....	384
Figura 9.55:	Vista explosionada del conjunto. Imagen de síntesis. Imagen generada por ordenador (3dsmax2015). Fuente: web L'Automobile.....	385
Figura 9.56:	Ballestas.Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.....	386
Figura 9.57:	Chasis.Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.	386
Figura 9.58:	Dirección.Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.....	386
Figura 9.60:	Transmisión. Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.	387
Figura 9.61:	Ejes y ruedas. Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.	387
Figura 9.63:	Los muelles en espiral, dispuestos bajo el carro,.....	388
Figura 9.64:	La energía liberada por los muelles hace girar las ruedas dentadas en la dirección horizontal indicada por las flechas rojas. Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.	389
Figura 9.65:	Las dos grandes ruedas horizontales son las encargadas de hacer girar las pequeñas ruedas angulares que simultáneamente transmiten la potencia a las ruedas y controla el sistema de escape. Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.	389
Figura 9.66:	De las grandes ruedas horizontales a las pequeñas ruedas angulares y de ahí a los engranajes inferiores tipo jaula que hacen girar las ruedas en el sentido indicado por las flechas rojas. Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.	390
Figura 9.67:	El dispositivo de transmisión en el lado izquierdo del vagón impulsa a.....	390
Figura 9.68:	El movimiento rotativo de la rueda de levas que gira simultáneamente con el engranaje horizontal izquierdo hace que los pétalos golpeen a un brazo curvo de madera (centrado sobre el chasis) produciendo en éste un movimiento alternativo (flechas azules y verdes). Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.	391
Figura 9.69:	Cada pétalo de la rueda de levas golpea el extremo de un brazo curvo de madera (flecha verde), mientras que el tensor de retorno (flecha roja) lo hace volver a su posición original.Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.	391
Figura 9.70:	La continua rotación del perno central causada por el movimiento oscilatorio del brazo curvo al ser golpeado rítmicamente por cada uno de los pétalos de la rueda de levas se transmite a la rueda trasera (timón) determinando de esta forma la trayectoria del automóvil. Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.....	392
Figura 9.71:	Posibles trayectorias del automóvil. Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.	392
Figura 9.72:	Si sobre la rueda horizontal izquierda no va dispuesto ningún.....	393
Figura 9.73:	Sobre la rueda de levas situada sobre la rueda horizontal izquierda.....	394
Figura 9.74:	Sobre la rueda de levas situada sobre la rueda horizontal izquierda se observa ahora cómo se han fijado los ocho pétalos. El automóvil se mueve ahora siguiendo una curva más pronunciada que en el caso anterior. Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.....	394
Figura 9.75:	El pétalo situado sobre la rueda dentada horizontal derecha.....	395
Figura 9.76:	<i>El sistema auxiliar en el lado derecho del automóvil mantiene.....</i>	395
Figura 9.77:	En la figura finalmente se observa cómo se incorpora un freno a distancia.....	396

Índice de TABLAS

Capítulo 1. Estado del arte

Tabla 1.1.	Manuscritos de Leonardo que conservan su estructura original, lugar de depósito y signatura original de la institución donde se conservan	9
Tabla 1.2:	Manuscritos de Leonardo que conservan su estructura ordenados de menor a mayor tamaño, indicando nº de folios que lo componen así como su datación	10
Tabla 1.3:	Manuscritos de Leonardo de carácter técnico ordenados en orden cronológico.	11
Tabla 1.4:	Manuscritos de Leonardo considerados cuadernos de trabajo ordenados en orden cronológico.....	12
Tabla 1.5:	Manuscritos de Leonardo. Colecciones misceláneas, con indicación del lugar de depósito,nº de folios y datación.....	17
Tabla 1.6.	Manuscritos de Leonardo. Colecciones misceláneas, ordenadas de menor a mayor tamaño, indicando nº de folios que lo componen así como su datación.	15
Tabla 1.7:	Manuscritos de Leonardo. Hojas sueltas, con indicación del lugar de depósito,nº de folios y datación.....	17

Capítulo 2. Vida y Códices de Leonardo.....20

Tabla 2.1.	Principales hitos en la biografía de Leonardo.....	30
-------------------	--	----

Apéndice B. TABLAS BASE DE DATOS..... 409

Tabla B.1:	Listado de correspondencias de temas de mecánica práctica entre el Códice de Madrid I y el Códice Atlántico.	412
Tabla B.2:	Listado de correspondencias de temas de mecánica práctica entre el Códice de Madrid I y el Manuscrito A de Francia.	413
Tabla B.3:	Listado de correspondencias de temas de mecánica práctica entre el Códice de Madrid I y los Códices Forster I, II y III.....	414
Tabla B.4:	Listado de correspondencias entre el Códice de Madrid I y el Manuscrito H de Francia.....	415
Tabla B.5:	Relación de folios del Códice Atlántico donde Leonardo hace referencia a estudios, bocetos o anotaciones relacionadas con la arquitectura y el urbanismo. ..	417
Tabla B.6:	Relación de folios del Códice Arundel donde Leonardo hace referencia a estudios, bocetos o anotaciones relacionadas con la arquitectura y el urbanismo.....	417
Tabla B.7:	Relación de folios del Códice Forster donde Leonardo hace referencia a estudios, bocetos o anotaciones relacionadas con la arquitectura y el urbanismo.....	418
Tabla B.8:	Relación de folios de los Manuscritos de Francia donde Leonardo hace referencia a estudios, bocetos o anotaciones relacionadas con la arquitectura y el urbanismo.	419
Tabla B.9:	Relación de folios de los Códices de Madrid donde Leonardo hace referencia a estudios, bocetos o anotaciones relacionadas con la arquitectura y el urbanismo.....	420
Tabla B.10:	Relación de folios del Códice Trivulziano donde Leonardo hace referencia a estudios, bocetos o anotaciones relacionadas con la arquitectura y el urbanismo. ..	420
Tabla B.11:	Relación de folios de la Colección Windsor donde Leonardo hace referencia a estudios, bocetos o anotaciones relacionadas con la arquitectura y el urbanismo. ..	421

ÍNDICE GENERAL

Abreviaturas

BNE	Biblioteca Nacional de España
CAr	Códice Arundel
CA	Códice Atlántico
CF1	Códice Forster I
CF2	Códice Forster II
CF3	Códice Forster III
CFB	Códice sobre el vuelo de los pájaros (<i>Codex on the Flight of Birds</i>)
CL	Códice Leicester
CT	Códice Trivulziano
CM1	Códice de Madrid I
CM1	Códice de Madrid 2
e-Leo	<i>Archivio digitale di storia della tecnica e della scienza. Biblioteca Leonardiana.</i> (http://www.leonardodigitale.com/)
MsA	Manuscrito A
MsB	Manuscrito B
MsC	Manuscrito C
MsD	Manuscrito D
MsE	Manuscrito E
MsF	Manuscrito F
MsG	Manuscrito G
MsH	Manuscrito H
MsI	Manuscrito I
MsK	Manuscrito K
MsL	Manuscrito L
MsM	Manuscrito M
WC	Colección Windsor (<i>Windsor Collection</i>)
WC_AS	Colección Windsor. Estudios Anatómicos. (<i>Windsor Collection. Anatomical Studies</i>)

Referencias a un folio concreto de un manuscrito.

Una de las formas que hemos usado para abreviar a la hora de referencia un folio en particular de cada manuscrito de Leonardo, ha sido la siguiente:

CM1_0018r	Folio 18 recto del Códice de Madrid I
CA_1023v	Folio 1023 verso del Códice Atlántico

Grafía de Leonardo

\wedge	A	=	a	11	=	1
\downarrow	B	=	b	52	=	2
\supset		=	c	ξ	=	3
\wp	P	=	d	P	=	4
v	E	=	e	E	=	5
f		=	f	6	=	6
δ		=	g	$\langle \rangle$	=	7
d		=	h	8	=	8
11		=	i	e	=	9
K		=	k	0	=	0
g		=	l			
m	M	=	m			
N		=	n			
o		=	o			
q		=	p			
P		=	q			
v	R	=	r			
s	I	=	s			
t	t	=	t			
u		=	u			
\checkmark		=	v			
x		=	x			
Y		=	y			
ξ	ξ	=	z			

Capítulo 1

Estado del Arte

*La constancia no está en empezar
sino en perseverar
(Leonardo da Vinci)*

1.1. Antecedentes de la investigación.

“*Ser o no ser...ingeniero...esa es la cuestión*”. Quiero comenzar parafraseando al genial dramaturgo inglés *William Shakespeare*, para poner el acento en el tema central que aborda la presente Tesis Doctoral, es decir la faceta más ingenieril de Leonardo da Vinci.

Tratar de juzgar, analizar, ni tan siquiera ser capaces de vislumbrar por un segundo, o comprender como un pro-hombre como Leonardo, sin haber recibido la formación clásica de la época (no sabía latín), a caballo entre dos siglos maravillosos (1452-1519), en pleno apogeo del Renacimiento italiano, llegó a acumular tan ingente cantidad de conocimientos, que le permitió dominar y desenvolverse con soltura en la mayoría de las disciplinas artísticas, filosóficas y técnicas de su época; es sin duda, una ardua tarea que pocos especialistas se atreven a acometer.

Como todo doctorando que se precie, una de las lecturas obligadas al iniciar una Tesis Doctoral es el famoso libro de *Umberto Eco* “*Cómo realizar una Tesis Doctoral*”. Vaya por delante, mi admiración al escritor y mis disculpas por haber incumplido sistemáticamente, una a una, todas sus recomendaciones. No acotar el estudio sobre Leonardo y abordarlo en su totalidad ha sido francamente una maravillosa locura. Consultar una vasta literatura sobre Leonardo en otros idiomas, en su mayoría italiano, bastante en inglés y alguna que otra en alemán y francés; ha resultado agotador a la par que ha ralentizado considerablemente la investigación. Evidentemente esta Tesis Doctoral no se comprende si no es por la inmensa admiración y respeto que tenemos hacia la figura de Leonardo da Vinci.

En 2019 se va a conmemorar el quinto centenario de la muerte de Leonardo, y de un tiempo a esta parte, en la última década se ha multiplicado exponencialmente todo tipo de publicaciones dedicadas a la figura del maestro. Por supuesto novelas de ficción como “*El código Da Vinci*” de *Dan Brown* han contribuido a esta leonardomanía.

¿Quién no conoce al genial pintor? Sus obras: “*La Gioconda*” y “*La Última Cena*”, por mencionar algunas, son universalmente conocidas y citadas por los especialistas de arte como algunas de las mejores obras de todos los tiempos. Sin embargo, Leonardo, tan sólo realizó apenas, poco más de 30 obras (un elenco de obras muy reducido para ser un pintor tan celebrado). Conocemos al pintor y sin embargo 500 años después de su muerte todavía existe un halo de misterio y genialidad en Leonardo que todo el mundo quiere conocer.

Como ya hemos comentado apenas 30 obras lo encumbraron al altar de los dioses. Sin embargo, una faceta menos conocida de Leonardo, por el público en general, es que nos dejó un vasto legado manuscrito, en forma de cuadernos o apuntes, donde iba recopilando, anotando, dibujando y reflexionado sobre absolutamente todas las disciplinas del saber de su época. Cerca de 6.000 folios manuscritos, con escritura especular o invertida, dispersos entre las Bibliotecas más prestigiosas del mundo, tan sólo el Códice Hammer de Leonardo es propiedad privada de Bill Gates.

Leonardo aspiraba al conocimiento total, globalizante, pero no aspiraba a llegar a él por el camino del estudio de la revelación, como los escolásticos y los teólogos de los siglos precedentes, ni tampoco por el del razonamiento intelectual que bebe exclusivamente del saber de los autores anteriores. No fue escolástico ni se confió a ciegas a la autoridad de los autores clásicos, como hicieron muchos hombres del Renacimiento. Él mismo se definía como un *"uomo senza lettere"*, porque, efectivamente, era iletrado. Ignoraba el latín como hemos comentado. Su educación había sido otra: de niño le enseñaron simplemente a leer y escribir y a echar cuentas. Pero el latín, única vía de acceso en esos momentos a los estudios humanistas, lo aprendió, y por sus propios medios, siendo ya un hombre maduro; y lo mismo le ocurrió con las matemáticas, que estudió tarde, cuando las encontró necesarias para seguir avanzando. Sólo admitía como verdaderos métodos científicos la observación de la naturaleza y la experimentación. El conocimiento de los escritores antiguos tenía su utilidad como base, pero no como objetivo final.

Leonardo comprendió y utilizó el auténtico método experimental un siglo antes de que Francis Bacon filosofase sobre él, y antes de que Galileo lo pusiese en práctica. Leonardo no escribió tratados metodológicos, pero en sus cuadernos de apuntes nos dejó esparcidas sus ideas. Dice que las matemáticas, la geometría y la aritmética, pueden llegar a la certeza absoluta dentro de su propio ámbito, pues manejan conceptos mentales ideales de valor universal. En cambio, la verdadera ciencia (refiriéndose a las ciencias empíricas), se basa en la observación; si pudiera aplicarse a ella el razonamiento matemático podría lograrse mayor grado de certeza, siendo hoy en día, uno de los pasos fundamentales del método científico. *"No hay certeza en la ciencia si no se puede aplicar una de las ciencias matemáticas"*.

En sus apuntes, Leonardo dejó constancia de la importancia que concede al método en la investigación (adelantándose a autores de la Modernidad tales como Descartes) y los preceptos que establece en su método en nada difieren de las modernas definiciones que hoy utilizamos para hablar del método científico. Podemos ver en estos textos una clara definición de los procesos de inducción y deducción que hoy explicamos en nuestras clases de Física o Filosofía.

"Al abordar un problema científico, dispongo primero diversos experimentos, ya que pretendo determinar el problema de acuerdo con la experiencia, mostrando luego por qué los cuerpos se ven obligados a actuar de ese modo. Ese es el método que hay que seguir en todas las investigaciones sobre los fenómenos de la Naturaleza"

"Hemos de consultar a la experiencia en una diversidad de casos y circunstancias hasta que podamos extraer de ellos una regla general que en ellos se contenga. ¿Para qué son útiles estas reglas? Nos conducen a ulteriores investigaciones sobre la Naturaleza y a las creaciones artísticas. Nos impiden engañarnos a nosotros mismos o a los demás prometiéndonos resultados que no se pueden conseguir".

Hay una serie de incógnitas que rodean la figura de Leonardo:

La primera sería por qué no publicó en vida su obra. El mismo lo manifestó en numerosas ocasiones, e incluso ayudó a ilustrar el tratado *De divina proportione* de su amigo Luca Pacioli. Pocos maestros pueden vanagloriarse de haber tenido un artista de la fuerza y genio de Leonardo para ilustrar sus libros. Todo un lujo, y sin embargo él mismo

no fue capaz de publicar. Si a esto añadimos que el uso de la imprenta en su época ya estaba generalizado y que supuso una verdadera revolución de la difusión del conocimiento, equiparable a Internet en la era digital de nuestro siglo XXI que nos ha tocado vivir. Todavía se comprende menos, si pensamos además en la longevidad de Leonardo, llegó a vivir 67 años, que para la esperanza media de vida de la época no está nada mal.

La segunda incógnita sería por qué escribía de forma invertida, de derecha a izquierda, dificultando enormemente la lectura de sus manuscritos, por no decir la comprensión de las ideas de Leonardo y por supuesto imposibilitando cualquier tipo de reproducción legible ulterior.

Una tercera incógnita: que habría pasado si se hubieran difundido las ideas de Leonardo en su época. Las investigaciones de Leonardo sobre Anatomía, Óptica, Hidráulica y Mecánica podrían haber acelerado el curso de los tiempos y haber llegado antes a teorías e invenciones que Leonardo apuntaba entre sus manuscritos.

Una cuarta incógnita: el desorden de sus escritos. Salvo honrosas excepciones los manuscritos de Leonardo son un caos compositivo, una gran cantidad de información desordenada que toca todo tipo de disciplinas. Imposible seguir un hilo conductor. La misma naturaleza del método de Leonardo, de tomar apuntes, de plasmar por escrito y dibujar todo tipo de observación u ocurrencia, le llevaba a tener una serie de cuadernillos en donde en cada folio se pueden entremezclar temas de índoles muy diferentes, no facilitando para nada la comprensión de sus escritos.

Evidentemente a la muerte de Leonardo se produjo la dispersión de sus manuscritos que acrecentó todavía más el halo de misterio y genialidad que siempre le han perseguido. El fabuloso hallazgo de los Códices de Madrid I y II en la Biblioteca Nacional de España a finales de la década de los 60 del siglo pasado, escritos del puño y letra de Leonardo, han reavivado las ansias de conocer más la figura de Leonardo. A diferencia de lo que nos tenía acostumbrado en sus manuscritos, el *Códice Madrid I* es un verdadero tratado de *estática* y *mecánica*, contiene los mejores y más contundentes dibujos, a tinta negra. Son detalladísimos esquemas de diversos *mecanismos* y *artilugios*, como *tornillos sin fin*, *cadena de tracción*, *máquinas textiles*, *maquinaria de relojería*, *armas*, *cerraduras*, etc. Los diseños ocupan en ocasiones la casi totalidad de la página, y las diversas piezas están numeradas con letras del alfabeto con las correspondientes explicaciones en el texto que les acompaña. También hay una parte teórica con mayor densidad de texto, y dibujos que no pasan de ser rápidos apuntes sobre diversos temas como *la gravedad*.

Una quinta incógnita: por qué autores de reputado prestigio, historiadores de la ciencia y de la tecnología, no se atreven a meter por la puerta grande, en la lista de grandes ingenieros de la historia, a Leonardo da Vinci. Parece como si le estuvieran haciendo un favor que no se merece. Por citar algunos ejemplos, gran parte del famoso libro de “*Los ingenieros del Renacimiento*” está dedicado a la vida de Leonardo da Vinci, su carrera de ingeniero, su lado técnico, y su “método”, según Bertrand Gille, no existe. Como señala el autor, es inexistente porque Leonardo está dotado de una curiosidad inmensa que desgraciadamente lo lleva a dispersarse, lo cual le impide especializarse en ciertos sectores, y por ende, a erigir los pilares de una investigación metódica. Además, Bertrand Gille indica que, aun si Leonardo Da Vinci lega un número amplio de dibujos a la posteridad, su aporte a nivel de innovaciones técnicas fue mínimo, dado que no brindaba soluciones prácticas viables, pero quedaba de una manera u otra fijado en el espíritu de su tiempo orientado hacia el análisis y la reproducción literal de los dibujos anteriores. (GILLE, 1978)

George Basalla, catedrático emérito de historia de la técnica en la Universidad de Delaware, publicó “*La evolución de la tecnología*”, si extraemos un párrafo de entre sus páginas:

*La más famosa colección de máquinas visionarias del Renacimiento no se reveló al público hasta finales del siglo XIX. Estuvo oculta entre los cuadernos personales no publicados de Leonardo da Vinci (1452-1519). Los dibujos de Leonardo contienen algunos de los mejores ejemplos de aparatos fantásticos nunca diseñados. Entre ellos figuran esbozos de máquinas voladoras (tanto propulsadas como de vuelo libre), paracaídas, tanques blindados, ballestas y catapultas gigantes, un pequeño navío de combate, pistolas con varios tambores, una máquina de vapor, y un cañón de vapor. También ofrecía planos de vapores de ruedas de palas, trajes de buceo, diversos buques de dragado y un vehículo autopropulsado mediante resortes. **Muchos de estos artefactos son imposibles tal como se presentan, y pocos, si acaso alguno, influyeron en el ulterior desarrollo tecnológico;** sin embargo permiten hacerse un inusual idea de la mente de un gran genio técnico y del tipo de exuberancia tecnológica que había de convertirse en uno de los rasgos distintivos de la civilización occidental. Que sepamos, las fantásticas creaciones de Leonardo fueron las primeras de este alcance y poder de inventiva conocidas en el mundo. Sus logros técnicos, que a menudo se representan erróneamente, merecen elogio por su verdadero valor; no como conjunto de proyectos de nuevas máquinas, o como profecías exactas de la forma de la tecnología del futuro, sino como exploraciones maravillosamente imaginativas y originales del potencial inherente de este empeño.*(BASALLA 2011).

Observamos cómo una vez más se cuestiona la figura de Leonardo como ingeniero o inventor poco más que de artefactos o artilugios imposibles. Pero qué hay de verdad en tales afirmaciones.

Gran parte de la presente tesis doctoral está dirigida a ordenar todos los temas de carácter ingenieril que Leonardo trató en sus manuscritos y de comprobar fehacientemente y documentalmente consultando las fuentes primarias (sus manuscritos) y los artículos y libros publicados de reconocidos y prestigiosos Leonardistas que abordan la cuestión. Hasta qué punto se puede considerar que Leonardo fuera un ingeniero del Renacimiento. Es posible que aunque sus manuscritos permanecieran ocultos durante muchos siglos y no se publicaran en su época, pudieran haber influido en posteriores ingenieros, inventos o innovaciones de épocas posteriores. Como resumen de lo que se pretende en la presente Tesis Doctoral enumero los objetivos que pretendemos.

1.2. Objetivos de la investigación.

El principal y primer objetivo de la investigación sobre Leonardo es reivindicar su figura como uno de los grandes ingenieros de todas las Historia. “*Ser o no ser...ingeniero...esa es la cuestión*”.

Identificar, analizar y ordenar los principales temas que Leonardo escribió y dibujó sobre Ingeniería Militar, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Hidráulica, Ingeniería Civil e Ingeniería Aeronáutica, dispersos por sus manuscritos.

Reflexionar sobre la figura del ingeniero hoy día.

Investigar y elaborar un modelo tridimensional en 3D del famoso automóvil de Leonardo, folio 812 recto del Códice Atlántico..

1.3. Metodología.

Una vez desarrollados los objetivos y los límites en la investigación, procedemos a describir la metodología seguida. La investigación es la actividad desarrollada por las personas para buscar soluciones a problemas mediante la utilización de procesos científicos. Estos procesos son los que nos van a permitir la metodología a seguir en el camino de la investigación.

Para la elaboración de esta Tesis hemos seguido el siguiente proceso:

1. Planteamiento del problema. En este apartado se ha elegido el campo de investigación, el método a seguir y las técnicas a emplear para intentar obtener un resultado adecuado.
2. Planeación. Se ha establecido unos objetivos generales previos que permiten sentar las bases de la investigación: identificar, analizar, ordenar y clasificar todo lo relacionado con la ingeniería en los manuscritos de Leonardo.
3. Recopilación de datos. Se ha continuado con la labor de búsqueda de documentos y fuentes bibliográficas relativas a todo lo publicado de relativa importancia sobre el aspecto más ingenieril de los manuscritos de Leonardo.
4. Traducción de los datos, de diferentes lenguas, principalmente del italiano al español. Traducción también al inglés y viceversa.
5. Paralelamente se ha ido creando una base de datos ordenada por manuscritos, donde los registros son cada uno de los folios de los mismos.
6. Explicación e interpretación. A continuación hemos procedido a una labor de aportaciones que nos permita obtener conclusiones adecuadas al cumplimiento de los objetivos previos.

1.4. Fuentes.

1.4.1. Fuentes directas o primarias. Producción manuscrita de Leonardo.

Leonardo da Vinci es sin duda el artista del Renacimiento que dejó el legado manuscrito más extenso de todos los que se conocen hasta la fecha. Múltiples razones justifican tal cantidad desmesurada de escritos, entre ellos cabría destacar su afán de perfeccionismo, que le impidió rematar la mayoría de los proyectos en los que se involucraba y su método de trabajo obsesionado con una minuciosa observación de la naturaleza. Muy ilustrador al respecto es el siguiente párrafo que dejó escrito en el encabezamiento del folio 1 recto del Códice Arundel:

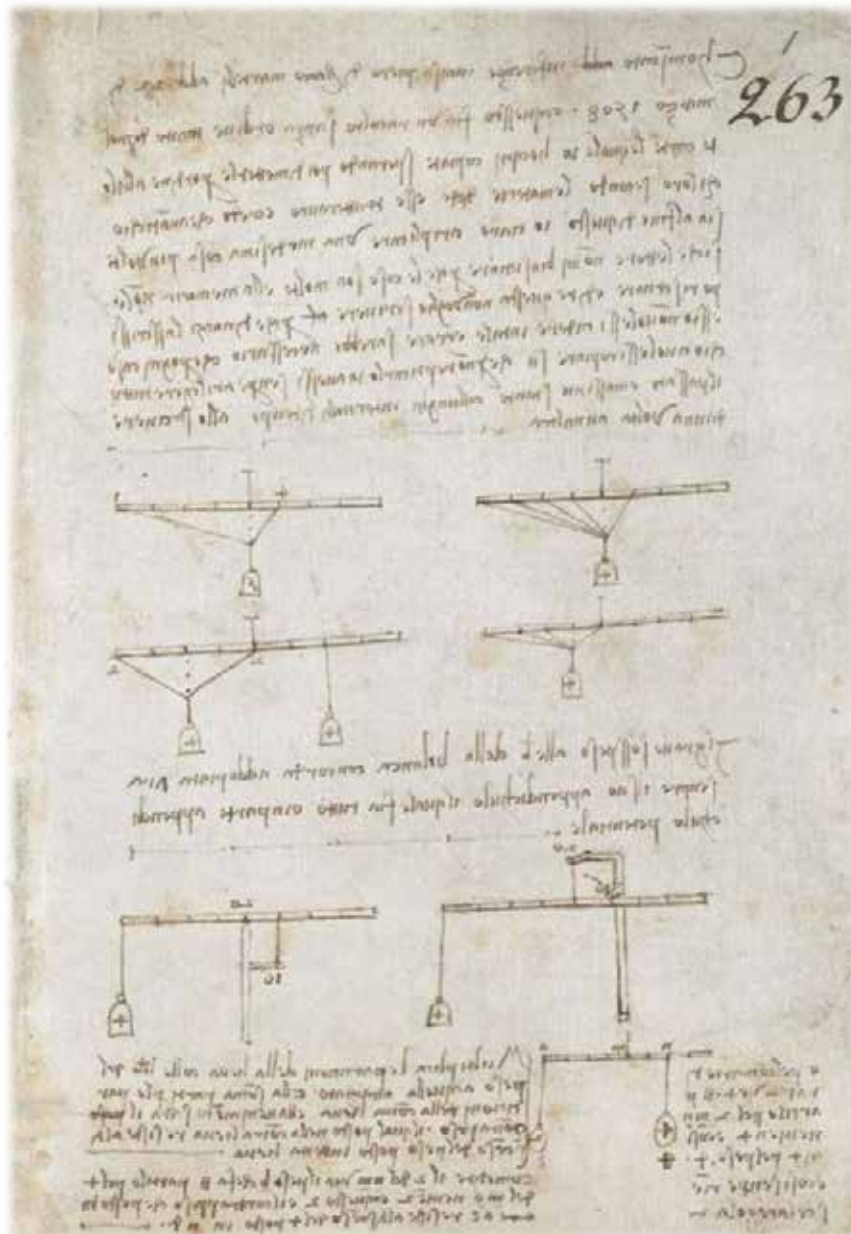


Figura 1.1: Justificación del caos compositivo del cuaderno.
British Library (Londres), Códice Arundel, f. 0001r

Cominciato in Firenze, in casa Piero di Braccio Martelli, addì 22 di marzo 1508. E questo fia un raccolto senza ordine, tratto di molte carte le quale io ho qui copiate, sperando poi di metterle per ordine alli lochi loro, secondo le materie di che esse tratteranno; e credo che avanti ch'io sia al fine di questo, io ci arò a replicare una medesima cosa piu volte; sì che, lettore, non mi biasimare, perché le cose son molte, e la memoria non le pò riservare e dire: questa non voglio scrivere, perché dinanzi la scrissi. E s'io non volessi cadere in tale errore, sarebbe necessario che per ogni caso ch'io ci volessi copiare su, che per non reprecarlo, io avessi senpre a rilegere tutto il passato, e massime stanto con lunghi intervalli di tempo allo scrivere, da una volta a un'altra.

Comenzado en Florencia en casa de Piero di Braccio Martelli, a 22 de marzo de 1508. Este cuaderno será una colección sin orden alguno, elaborado a partir de muchas hojas sueltas, a las cuales yo he de copiar aquí, esperando distribuirlas correctamente más delante de acuerdo con las materias en ellas tratadas. Creo que antes de que haya culminado en su día este trabajo, habré repetido una misma cosa varias veces, por lo cual, lector, no me critiques porque se trata de muchas cosas y la memoria no puede retenerlas todas. Y si yo dijese: «No quiero escribir esto porque antes ya lo he dicho», por aquello de evitar tal desacierto, entonces sería preciso que cada vez que yo quisiese copiar algo, tuviese siempre que releer todo lo anterior para no duplicarlo, dado sobre todo los intervalos de tiempo que median entre uno y otro acto de escritura. Londres, British Library. (CAr_0001r)

Leonardo al comienzo de su cuaderno, además de datarlo, expone claramente a un hipotético lector (dando a entender su firme propósito de publicar sus escritos en un futuro) las circunstancias que le llevan a exponer sus ideas y dibujos de una forma tan desordenada y sobre todo justificando el motivo de sus repeticiones. El fragmento no puede ser más ilustrador de la forma de trabajar de Leonardo, era consciente plenamente de su forma de actuar tan caótica, repetitiva e intermitente. Una autocrítica sin duda certera que cualquier investigador o curioso puede constatar nada más adentrándose un poco en sus manuscritos.

Se cree que de toda la obra autógrafa de Leonardo tan sólo ha llegado a nuestros días el 40% de su producción total teniendo en cuenta los cálculos en función de los datos y las firmas atribuidas a sus primeros herederos Melzi y Leoni.

Absolutamente todo el material vinciano del que se tiene constancia en la actualidad se puede clasificar ateniéndonos a la forma en la que se nos presenta hoy día todos sus manuscritos:

- Manuscritos que conservan su estructura original
- Colecciones misceláneas reorganizadas tras la muerte del autor.
- Hojas sueltas.

A continuación se pasa a enumerar cada uno de los manuscritos de los que se tiene constancia (tanto si se conservan hoy día como si están extraviados) perteneciente a cada una de las modalidades.

1.4.1.1. Manuscritos que conservan su estructura original.

Es decir son manuscritos tal cual los diseñó originalmente Leonardo. Por este motivo de ellos se pueden sacar conclusiones más acertadas sobre la propia personalidad, método de trabajo y proceso creativo del autor. En total son 20 cuadernos descritos en la tabla 1.1. En realidad el número puede variar dependiendo de los autores vicianos que han tratado el tema ya que algunos de ellos son facticios, es decir, están formados por dos o más piezas y otros han sufrido una desmembración o amputación.

De los manuscritos facticios se encuentran los siguientes ejemplares:

Ms. C de Francia, el cual en su día estuvo unido al libro *W*, hoy perdido

Ms. H de Francia, que consta de tres sectores

Ms. I de Francia, que consta de dos sectores

Ms. K de Francia, que consta de tres sectores

Codex Forster I, que consta de dos sectores

Codex Forster II, que consta de dos sectores

Codex Madrid II, que consta de dos sectores

Los manuscritos desmembrados o que han sufrido alguna mutilación son:

Ms. A de Francia

Ms. B de Francia

Ms. E de Francia

En el caso de los códices *A* y *B*, decir que fragmentos del mismo fueron sustraídos por Libri. Estos fragmentos fueron adquiridos por lord Ashburnham, de aquí viene el nombre tal y como se le conoce. El *Ms. E* de Francia sufrió la misma mutilación pero en este caso el cuaderno sustraído no se conserva en la actualidad.

El listado de los cuadernos, con indicación de su lugar de depósito y firmas originales de la institución donde se conservan, es la siguiente:

Nº	Nombre del manuscrito y signatura original del lugar donde se custodia	Abreviatura usada en la tesis
ESPAÑA		
Madrid, Biblioteca Nacional de España (BNE)		
1	<i>Codex Madrid I</i> (Mss. 8937)	CM1
2	<i>Codex Madrid II</i> (Mss. 8936)	CM2
ESTADOS UNIDOS		
Seattle, colección privada		
3	<i>Codex Leicester / Hammer / Bill Gates</i>	CL
FRANCIA		
París, Institut de France		
4	<i>A</i> (Ms. 2172) + <i>Ashburnham II</i> (Ms. 2185) / (BN 2038)	MsA
5	<i>B</i> (Ms. 2173) + <i>Ashburnham I</i> (Ms. 2184) / (BN 2037)	MsB
6	<i>C</i> (Ms. 2174)	MsC
7	<i>D</i> (Ms. 2175)	MsD
8	<i>E</i> (Ms. 2176)	MsE
9	<i>F</i> (Ms. 2177)	MsF

10	G (Ms.2178)	MsG
11	H (Ms.2179)	MsH
12	I (Ms. 2180)	Msl
13	K (Ms. 2181)	MsK
14	L (Ms. 2182)	MsL
15	M (Ms.2183)	MsM
GRAN BRETAÑA		
Londres, Victoria and Albert Museum		
16	<i>Codex Forster I</i>	CF1
17	<i>Codex Forster II</i>	CF2
18	<i>Codex Forster III</i>	CF3
ITALIA		
Milán, Castello Sforzesco. Biblioteca Trivulziana		
19	<i>Codex Trivulzianus</i> (Ms. N2162)	CT
Turín, Biblioteca Reale		
20	<i>Codice sul volo degli uccelli</i>	CFB

Tabla 1.1. Manuscritos de Leonardo que conservan su estructura original, lugar de depósito y signatura original de la institución donde se conservan.

Fuente: El imaginario de Leonardo. (VV.AA. 2012)

Alguno de los manuscritos de Leonardo conservan su encuadernación original y el tamaño de ellos varía desde el más pequeño que sería el *Codex Forster III* (94 x 65 mm) hasta el más grande que sería el *Ms. B + Ashburnham I* (231 x 167 mm). La mayoría de los cuadernos pequeños conservados se corresponden con el término *libricino* o *librettino* empleado en la época. Según testimonian algunas fuentes Leonardo solía llevar colgado del cinto una minúscula libreta, para ir anotando o dibujando cuanto sucedía a su alrededor o bien para plasmar sus ideas justo en el momento que se le ocurrían.

En la siguiente tabla se muestra una clasificación de los cuadernos de Leonardo ordenados de menor a mayor, indicando el total de folios que lo componen así como su datación:

Nº	Nombre del manuscrito	Dimensiones	Nº de folios	Datación
18	<i>Codex Forster III</i>	94 x 65 mm	88	c. 1493
17	<i>Codex Forster II</i>	95 x 70 mm	159	
	<i>Codex Forster II¹</i>		1 – 63	c. 1495 – 1497?
	<i>Codex Forster II²</i>		64 – 159	c. 1495 – 1497
13	<i>K</i> (Ms.2181)	96 x 65 mm	128	
	<i>K¹</i>		1 – 48	c. 1503 – 1504 – 1505?
	<i>K²</i>		49 – 80	c. 1503 – 1504 – 1505?
	<i>K³</i>		81 – 128	c. 1506 – 1507 – 1508?
15	<i>M</i> (Ms.2183)	96 x 67 mm	74	c. 1499 – 1500
12	<i>I</i> (Ms. 2180)	100 X 75 mm	139	
	<i>I¹</i>		1 – 48	c. 1497 – 1499
	<i>I²</i>		49 – 139	c. 1497
14	<i>L</i> (Ms. 2182)	109 x 72 mm	94	c. 1497 – 1502 – 1504?
11	<i>H</i> (Ms.2179)	128 x 90 mm	142	
	<i>H¹</i>		1 – 48	1494 – marzo
	<i>H²</i>		48 – 94	1494 – enero y febrero
	<i>H³</i>		95 – 142	1493 – 1494
16	<i>Codex Forster I</i>	135 x 103 mm	55	
	<i>Codex Forster I¹</i>		1 – 40	1505
	<i>Codex Forster I²</i>		41 – 55	c. 1487 – 1490
10	<i>G</i> (Ms.2178)	139 x 97 mm	96 (faltan 7, 18 y 31)	1510 – 1511 y 1515
9	<i>F</i> (Ms. 2177)	145 x 100 mm	95	1508

8	<i>E</i> (Ms. 2176)	150 x 105 mm	96 (faltan 80-96)	1513 – 1514
19	<i>Codex Trivulzianus</i>	195 x 135 mm	55 (<i>olim</i> 62)	c. 1487 – 1490
2	<i>Codex Madrid II</i>	210 x 145 mm	158 (posible pérdida de 3 ff. + 62 bis)	
	<i>Codex Madrid II¹</i>		1 – 140 + 62 <i>bis</i>	1503 – 1505
	<i>Codex Madrid II²</i>		141 – 158	1492 – 1493
4	<i>A + Ashburnham II</i>	212 x 147 mm	114	
	<i>A</i>		1 – 80 (faltan 54, 65-80)	1492
	<i>Ashburnham II</i>		81 – 114	1492
20	<i>Codice sul volo degli uccelli</i>	213 x 153 mm	18	1505
1	<i>Codex Madrid I</i>	215 x 145 mm	192 (se conservan 184)	c. 1492 – 1497 1500?
7	<i>D</i> (Ms. 2175)	220 x 158 mm	10	1508
5	<i>B + Ashburnham I</i>	231 x 167 mm	100	
	<i>B</i>		90 ff. (faltan 3, 84-87)	c. 1487 – 1490
	<i>Ashburnham I</i>		91 – 100	c. 1487 – 1490
3	<i>Codex Leicester / Hammer / Bill Gates</i>	290 x 220 mm	36	c. 1506 – 1509?
6	<i>C</i> (Ms. 2174)	310 x 222 mm	28	1490 – 1491

Tabla 1.2: Manuscritos de Leonardo que conservan su estructura ordenados de menor a mayor tamaño, indicando nº de folios que lo componen así como su datación.

Fuente: El imaginario de Leonardo. (VV.AA. 2012)

Del cuadro anterior se puede obtener una conclusión inmediata: el predominio del formato pequeño. Seis unidades miden unos 100 mm de altura y otras seis no superan los 200 mm. Todos estos cuadernos que han conservado su estructura original se podrían clasificar en dos grandes grupos en función de la finalidad perseguida por su autor:

- Tratados técnicos
- Cuadernos de trabajos

Tratados técnicos:

El desarrollo de los conocimientos científicos originó en Italia el nacimiento de un tipo de libro muy característico por su forma de presentación y su belleza artística. A título de ejemplo, pueden ser citados los manuscritos de Francesco di Giorgio Martini. Leonardo conoció personalmente a este ingeniero y también sus escritos.

Tales obras iban destinadas a un público especializado y tenían como objetivo la difusión de los principios teóricos formulados y de los resultados prácticos obtenidos. A lo largo de su vida, Leonardo proyectó componer diversos tratados sobre pintura, anatomía, hidráulica, mecánica, aeronáutica, estática y dinámica, campos específicos en los que descollaba por la originalidad de sus aportaciones. Sin embargo, este reto personal no cuajó. Como otras muchas de sus actividades, tales compilaciones de distintos saberes quedaron en ciernes. A falta de versiones definitivas de sus libros, tenemos los borradores de trabajos preparatorios. En tales casos, los manuscritos se caracterizan por unos cuidados dibujos que constituyen el núcleo de su pensamiento teórico y unas exposiciones complementarias que glosan la imagen con una intencionalidad pedagógica de cara al lector. La calidad técnica del producto en el plano escriturario e icónico es grande. Su extraordinario sentido del espacio queda manifiesto en cada una de sus páginas a través de la armónica distribución de la materia tratada. Las piezas

que se pueden adscribir a este grupo no son muchas. A continuación se mencionan en orden cronológico progresivo:

Nº	Nombre del manuscrito	Dimensiones	Datación
6	C (Ms. 2174)	310 x 222 mm	1490 – 1491
1	<i>Codex Madrid I (Mss. 8937)</i>	215 x 145 mm	1492 – 1497 1500?
16	<i>Codex Forster I'</i>	135 x 103 mm	1505
20	<i>Codice sul volo degli uccelli</i>	213 x 153 mm	1505
3	<i>Codex Leicester / Hammer / Bill Gates</i>	290 x 220 mm	c. 1506 – 1509?

Tabla 1.3: Manuscritos de Leonardo de carácter técnico ordenados en orden cronológico.

Fuente: El imaginario de Leonardo. (VV.AA. 2012)

Una vez más los tamaños no ofrecen datos concluyentes, aunque se aprecia un predominio de formatos relativamente grandes con el fin de facilitar la presentación del discurso expositivo, solo el manuscrito *Forster I* se aparta de esta tendencia. Las fechas de composición indican que redacta estos trabajos en el período de madurez intelectual. Los dos primeros tratados se inscriben en la etapa de su primera estancia en Milán (1482-1499) y los tres restantes durante el segundo período florentino (1503-1506). El material contenido en los manuscritos estaría preparado para ser dado a conocer a un círculo íntimo o bien sería un borrador pendiente de ser convertido en una edición definitiva, bien manual o impresa, máxime dada la dificultad que generaba su escritura especular.

En principio, la idea del autor era realizar en cada caso una obra dedicada a un tema monográfico, sin embargo, suele ser frecuente la inclusión de datos o dibujos sin relación alguna con el asunto principal tratado. En el cuadro quedan registrados los *realia*, pero sabemos que confeccionó borradores de otras obras a través de sus propias palabras y testimonios indirectos.

Cuadernos de trabajo:

Los testimonios que constituyen el segundo grupo de los cuadernos vincianos son muy distintos de los anteriores, dedicados a la exposición de temas monográficos y concebidos para su circulación en los medios apropiados. Aquí se incluye el resto de la producción conocida de esta modalidad, ordenada según un criterio cronológico progresivo:

Nº	Nombre del manuscrito	Dimensiones	Datación
5	B (Ms. 2173) + <i>Ashburnham I</i>	231 x 167 mm	c. 1487 – 1490 c. 1487 – 1490
16	<i>Codex Forster I</i> <i>Codex Forster P</i>	135 x 103 mm	c. 1487 – 1490
19	<i>Codex Trivulzianus</i>	195 x 135 mm	c. 1487 – 1490
4	A (Ms. 2172) + <i>Ashburnham II</i>	212 x 147 mm	1492 1492
2	<i>Codex Madrid II</i> <i>Codex Madrid IP</i>	210 x 145 mm	1492 – 1493
18	<i>Codex Forster III</i>	94 x 65 mm	c. 1493
11	H (Ms. 2179) <i>H^β</i> <i>H^γ</i> <i>H^δ</i>	128 x 90 mm	1493 – 1494 1494 – enero y febrero 1494 – marzo
17	<i>Codex Forster II</i> <i>Codex Forster II'</i> <i>Codex Forster IP</i>	95 x 70 mm	c. 1495 – 1497? c. 1495 – 1497
12	I (Ms. 2180) <i>P</i>	100 X 75 mm	c. 1497

	f		c. 1497 – 1499
14	L (Ms. 2182)	109 x 72 mm	c. 1497 – 1502 – 1504?
15	M (Ms. 2183)	96 x 67 mm	c. 1499 – 1500
13	K (Ms. 2181) K ¹ K ²	96 x 65 mm	c. 1503 – 1504 – 1505? c. 1503 – 1504 – 1505?
2	<i>Codex Madrid II</i> <i>Codex Madrid II</i> ¹	210 x 145 mm	1503 – 1505
16	<i>Codex Forster I</i> ¹		1505
13	K (Ms. 2181) K ³	96 x 65 mm	c. 1506 – 1507 – 1508?
7	D (Ms. 2175)	220 x 158 mm	1508
9	F (Ms. 2177)	145 x 100 mm	1508
10	G (Ms. 2178)	139 x 97 mm	1510 – 1511 y 1515
8	E (Ms. 2176)	150 x 105 mm	1513 – 1514

Tabla 1.4: Manuscritos de Leonardo considerados cuadernos de trabajo ordenados en orden cronológico. Fuente: El imaginario de Leonardo. (VV.AA. 2012)

Como se puede comprobar, predominan las piezas de pequeño tamaño. Tal particularidad se explica por la función desempeñada por estos manuscritos. En realidad, cada ejemplar podría ser denominado un *zibaldone*, de acuerdo con la tipología italiana, esto es, un cartapacio o libro de notas misceláneo en cuanto al contenido y descuidado en lo que respecta a la forma. Desde el punto de vista de su datación, resulta evidente que la mayoría de estos cuadernos fueron elaborados durante la primera estancia de Leonardo en Milán (1482-1499), período fecundo en todos los órdenes. Durante su segunda etapa florentina (1503-1506) seguirá trabajando en algunos cuadernos, tales como los códices *K*, *Madrid II* y *Forster I*, en parte empezados con anterioridad. Por último, las contribuciones más tardías, *K*, *D*, *F*, *G* y *E* serán fruto, en su mayor parte, de la actividad en Milán durante el período 1506-1513. A partir del traslado a Roma se observa una disminución de su labor como autor científico. En los tres años finales de su vida, dado su estado físico, desarrolló sobre todo una labor de organización del ingente material producido. El testimonio de Antonio de Beatis (1474-1521) es muy esclarecedor y fiable a este respecto. Tras mencionar la parálisis sufrida por el maestro en el lado derecho del cuerpo y describir el tipo de actividad que entonces podía ejercer, manifiesta que Leonardo había compuesto una “*infinità di volumi, et tucti in lingua vulgare, quali, se vengono in luce, saranno profiqui et molto delectevoli*”. Por desgracia, la difusión auspiciada de los textos no se produjo. Ciertamente, la distribución cronológica propuesta del patrimonio autógrafa de Leonardo tiene un valor relativo por haberse perdido una gran parte de su producción.

1.4.1.2. Colecciones misceláneas.

La producción gráfica de Leonardo fue colosal por su gran cantidad de manuscritos, universal por la variedad de temas tratados, y variopinta por los diferentes formatos utilizados. Sin duda alguna, los cuadernos fueron el modelo preferido; ahora bien, también se sirvió en numerosas ocasiones de hojas sueltas o fragmentos de papel independientes, al hilo de las circunstancias y en función del espacio necesario para la plasmación de sus dibujos. Por tanto, al cómputo anterior habría que añadir los innumerables testimonios manuscritos realizados por Leonardo sobre cualquier soporte que estuviese a su alcance, con independencia del tamaño, calidad o estado. El escultor Pompeo Leoni, temiendo por la pérdida y dispersión de este material que obraba en su poder, procedió a organizarlo a modo de colecciones misceláneas con el propósito de crear unos álbumes que aglutinasen estos *membra disiecta*.

Los textos y dibujos que componen estas tres colecciones fueron elaborados a lo largo de la vida de Leonardo. En raras ocasiones hay alguna mención cronológica. La temática tratada, los

nombres propios mencionados y el análisis paleográfico son los únicos elementos auxiliares para fechar algunas contribuciones suyas.

Códice Atlántico – Codex Atlanticus:

Uno de los productos así confeccionados es el manuscrito hoy llamado *Codex Atlanticus*, volumen facticio denominado de este modo por su gran formato. Sus dimensiones eran 645 x 435 mm, constaba de 401 folios y comprendía más de un millar de dibujos y textos de dimensiones y temas variados, elaborados por Leonardo entre 1478 y 1518. Leoni fue pegando en las hojas en blanco del soporte las piezas originales. Cuando el folio había sido utilizado por ambas caras, practicó un orificio o una especie de ventana en la superficie sustentante con el fin de que se pudiese ver tanto el recto como el verso de la hoja o del trozo de papel con los autógrafos vinciánicos. Durante algún tiempo se conjeturó que este trabajo del escultor milanés habría supuesto una desmembración de primitivos cuadernos, hecho que explicaría en parte las pérdidas constatadas de unidades exentas en la producción vinciánica. Esta hipótesis se ha descartado en la actualidad por ausencia de rasgos codicológicos que así lo demuestren y, sobre todo, gracias al examen practicado a estas piezas tras la operación de restauración a que han sido sometidas. Quizá Leoni pudo cortar dibujos en algún caso y distribuirlos según su temática entre los dos álbumes por él formados, pero no procedió a deshacer de manera sistemática cuadernos completos. Cuando el recopilador terminó esta tarea, acuñó un título facticio para la colección: *Dibujos de máquinas y de las artes secretas y otras cosas de Leonardo da Vinci, recopilados por Pompeo Leoni*. Modernamente (1962-1970) se ha procedido a reorganizar todo el material original en 12 volúmenes. Esta operación ha originado un total de 1.119 folios. Existe una edición facsimilar.

Colección Windsor – Windsor Collection:

El segundo álbum confeccionado por Leoni constituye hoy la *Windsor Collection*. Como en el caso anterior, cuando el recopilador terminó su tarea, escribió el siguiente título: *Dibujos de Leonardo da Vinci restaurados por Pompeo Leoni*. Este conjunto fue catalogado posteriormente en la sede depositaria, el Windsor Castle, como folios 12275-12727 y 19000-19152, respectivamente. El primer grupo de esta colección (ff. 12275- 12727) estaba formada por dibujos y textos de asuntos varios. La segunda parte comprendía todos los testimonios que trataban de anatomía y fueron encuadernados en tres volúmenes: A (ff. 19000-19017), B (ff. 19018- 19059) y C (ff. 19060-19152). Esta serie de dibujos leonardescos —unos doscientos—, impresionantes por su calidad y perfección técnica, son el resultado de muchos años de observación y estudio del natural. Su afán científico le llevó a diseccionar unos treinta cadáveres de seres humanos, una práctica todavía poco común.

De este magnífico fondo existe una edición facsimilar. Siguiendo el esquema de catalogación ideado por Pedretti, se ha procedido a desmontar el sistema establecido en su día por Leoni y crear una solución técnica que favorezca la conservación y permita una mejor contemplación de los originales. Las hojas han quedado organizadas por temas y fechas. En definitiva, debemos agradecer al escultor milanés Leoni todo su interés y esfuerzo en pro de la catalogación y salvaguarda de un patrimonio cultural inestimable.

Códice Arundel - Codex Arundel:

Existe una tercera colección miscelánea, depositada en la British Library. Generalmente es conocida bajo el nombre de *Codex Arundel*. Está formada por fascículos y no por hojas sueltas. Aunque los folios son de varios tamaños, miden de media unos 220 x 160 mm.

GRAN BRETAÑA		
Nº	Nombre del manuscrito y signatura original del lugar donde se custodia	Abreviatura usada en la tesis
Londres, Windsor Castle		
21	<i>The Windsor Collection</i>	WC
	<i>Temas varios (ff. 12275 – 12727)</i>	WCm
	<i>Temas de anatomía (mss. A, B y C)</i> A (ff. 19000 – 19017) B (ff. 19018 – 19059) C (ff. 19060 – 19152)	WCA WCB WCC
Londres, British Library		
22	<i>Codex Arundel</i>	CAr
ITALIA		
Milán .Biblioteca Ambrosiana.		
23	<i>Codex Atlánticus</i>	CA

Tabla 1.5. Manuscritos de Leonardo. Colecciones misceláneas, con indicación del lugar de depósito y signatura original de la institución donde se conservan.

Fuente: El imaginario de Leonardo. (VV.AA. 2012)

Nº	Nombre del manuscrito	Dimensiones	Nº de folios	Datación
22	<i>Codex Arundel</i>	c. 220 x 160 mm	283	c. 1480 – 1518
21	<i>The Windsor Collection</i>	Dimensiones varias	234 / 604	c. 1478 – 1518
	<i>Temas varios</i>		451	
	<i>Temas de anatomía</i>		153	
	A		18	
	B		42	
	C		93	
23	<i>Codex Atlánticus</i>	Dimensiones varias	401 / 1.119	c. 1478 – 1518

Tabla 1.6. Manuscritos de Leonardo. Colecciones misceláneas, ordenadas de menor a mayor tamaño, indicando nº de folios que lo componen así como su datación.

Fuente: El imaginario de Leonardo. (VV.AA. 2012)

1.4.1.3. Hojas sueltas.

Se podría decir que el 99,99 % de la obra conocida manuscrita de Leonardo se ha descrito ya en los párrafos precedentes. No obstante en honor a la rigurosidad científica en el siguiente apartado se pasa a enumerar los distintos fragmentos, bocetos y dibujos que están dispersos por diferentes instituciones europeas principalmente y un dibujo aislado en Estados Unidos. Se trata en la mayoría de los casos de folios aislados que dan fe del naufragio que sufrió toda la producción escrita de Leonardo, de muy difícil identificación y datación. A continuación se pasa a enumerar las principales piezas en la siguiente tabla:

Nº	Nombre del manuscrito	Nº de folios	Datación
ALEMANIA			
Múnich, Pinakothek			
24	<i>Fragmentos de dibujos de máquinas</i>	2	c. 1490-92
Weimar, Colección del Gran Duque en su origen (se desconoce su actual paradero)			
25	<i>Boceto de un niño con un cordero y otros niños</i>	1	c. 1499-1500
Weimar, Schloss-Museum			
26	<i>Folio con notas perteneciente en origen al ms. de Anatomía B</i>	1	c. 1506-1508
ESTADOS UNIDOS			
Nueva York, Metropolitan Museum			
27	<i>Dibujo de una alegoría con anotaciones</i>	1	1495-96
FRANCIA			

Bayona, Musée Bonnat			
28	<i>Boceto de Bernardo Bandini Baroncelli ejecutado, con notas</i>	1	1479
29	<i>Fragmento de máquinas y notas sobre pintura</i>	1	1491-1493
30	<i>Fragmento de una alegoría con notas</i>	1	c. 1493-1494
Nantes, Bibliothèque municipale			
31	<i>Fragmento con anotaciones perteneciente originariamente al Codex Atlanticus, f. 71r-b.</i>	1	1504
París, École des Beaux Arts			
32	<i>Dibujo de figuras y armas con notas</i>	1	1483
París, Musée du Louvre (coll. Vallardi)			
33	<i>Dibujo de armas con notas</i>	1	c. 1483
París, Musée du Louvre			
34	<i>Dibujo de la Adoración de los Reyes Magos. Boceto de un higrómetro</i>	1	c. 1480
GRAN BRETAÑA			
Londres, British Library. Print Room			
35	<i>Dibujo sobre la Adoración de los Reyes Magos y notas. Alegoría en el verso</i>	1	c. 1480
36	<i>Dibujos de máquinas bélicas con notas</i>	1	c. 1483
37	<i>Bocetos para el cartón de Burlington House</i>	1	c. 1506-08
38	<i>Dibujo anatómico con</i>	1	c. 1508
Oxford, Library of Christ Church			
39	<i>Dibujo alegórico con notas</i>	1	c. 1485-87
40	<i>Un folio con notas de mecánica y con un boceto de la Batalla de Anghiari</i>	1	c. 1503-04
ITALIA			
Florenia, Biblioteca Medicea Laurenziana ms. 361 (olim Ashburnham)			
41	<i>Marginalia sobre siete folios del ms. Trattato di architettura civile e militare de Francesco di Giorgio</i>	7	c. 1506-07
Florenia, Galleria degli Uffizi			
41	<i>Dibujos con anotaciones y fechas</i>	2	1473 y 1478
Milán, Biblioteca Ambrosiana			
42	<i>Dibujo de anatomía y texto</i>	1	c. 1508
43	<i>Un folio con notas sobre pintura y vuelo de los pájaros. En el verso dibujo de un discípulo</i>	1	c. 1510-11
44	<i>Tres dibujos de un "putto" y dos caricaturas</i>	1	?
Módena, Archivio Palatino			
45	<i>Carta no autógrafa de Leonardo</i>	1	1507
Turín, Biblioteca Reale			
46	<i>Dibujo de máquinas bélicas</i>	1	c. 1483
47	<i>Dibujo alegórico con notas</i>	1	c. 1483-1485
48	<i>Dos folios con dibujos sobre proporciones</i>	1	c. 1489-1490
Venecia, Gallerie dell'Accademia			
49	<i>Dibujos de armas con notas (r-v)</i>	1	c. 1483
50	<i>Dos folios de dibujos sobre proporciones</i>	1	c. 1490-91
51	<i>Boceto sobre el La Última Cena con los nombres de los apóstoles</i>	1	c. 1494-1495
52	<i>Dos bocetos para la Batalla de Anghiari y en los versos notas sobre mecánica</i>	2	c. 1499-1500 c. 1495-1497
53	<i>Un folio con una nota sobre astronomía y en el verso un boceto del Niño Jesús del cuadro de Santa Ana del Louvre</i>	1	c. 1510-1511
54	<i>Un folio sobre mecánica con un boceto de una iglesia en el verso</i>	1	c. 1510-1515
55	<i>Dibujo de un jinete a caballo</i>	1	?

SUIZA			
Basilea, Universität Basel (coll. Geigy-Hagenbach)			
56	Un folio con notas de geometría y bocetos de arquitectura, perteneciente en origen al Codex Atlanticus, f. 13r-v	1	c. 1517-18
Ginebra, collection Stefan Zweig (olim coll. Morrison)			
57	Un dibujo de máquinas con notas	1	c. 1487-1490
Nº	Nombre del manuscrito	Nº de folios	Datación

Tabla 1.7: Manuscritos de Leonardo. Hojas sueltas, con indicación del lugar de depósito, nº de folios y datación Fuente: El imaginario de Leonardo. (VV.AA. 2012)

1.4.2. Fuentes indirectas o secundarias.

Se engloban las principales fuentes de consulta que carecen del carácter primario anteriormente comentado, considerando como tales la *bibliografía*.

La editorial Leonardo3 con sede en Milán es una de las más importantes y de mayor prestigio en Leonardo da Vinci. Cuenta con pocas publicaciones pero todas ellas de autores reconocidos internacionalmente y que han utilizado técnicas actuales para obtener nuevos datos y conclusiones de los trabajos de Leonardo. Entre los autores hemos consultado a Carlo Pedretti, que está considerado hoy en día como uno de los mayores expertos vivos sobre la vida y obra de Leonardo, Mario Taddei y Edoardo Zanon, que han sido durante muchos años colaboradores del profesor Pedretti. (PEDRETTI, 1999) (TADDEI y ZANON, 2000).

La biografía de la Tesis incluye un amplio abanico de publicaciones tanto descriptivas como críticas, cuyo alcance conceptual puede destapar muchas de las claves teóricas que inciden en los hechos investigados. Todas las publicaciones empleadas aportan, bien un marco de conocimiento necesario como antecedente de la investigación, o una reflexión sobre los objetos y fenómenos investigados.

Resulta interesante como la gran mayoría de tratados y códices se encuentran digitalizados, y por lo tanto de acceso público. Al tratarse de una digitalización original se han considerado como fuentes fidedignas. (página web **e-Leo** entre otras).

Todas las referencias bibliográficas han quedado reflejadas en el apéndice A de la Tesis Doctoral.

1.5. Contenido de la Tesis.

El resultado del desarrollo de la investigación y el posterior proceso de redacción de la Tesis la hemos plasmado en los siguientes capítulos.

Capítulo 1. Estado del Arte.

En este capítulo hemos desarrollado los objetivos, los antecedentes de la investigación, la metodología seguida, las fuentes bibliográficas, el contenido y las aportaciones de la Tesis. Hemos intentado redactar de una forma clara y precisa.

Capítulo 2. Vida y Códices de Leonardo.

No se trata de reescribir la biografía de Leonardo por enésima vez. Hemos tratado de aproximarnos a los principales acontecimientos de su vida de la mano de la redacción de Bruno Nardini “Leonardo da Vinci contado a los niños”.(NARDINI, 1974) Se efectúa una descripción de los Códices y Manuscritos haciendo especial hincapié en el proceso de dispersión de los mismos a lo largo de la historia, pasando por distintos propietarios y recorriendo diferentes países.

Capítulo 3. Leonardo: ser o no ser ingeniero.

El objetivo de este capítulo es analizar la vida de Leonardo desde el punto de vista de sus logros como Ingeniero. Analizar y describir los conocimientos científicos que poseía Leonardo. Circunscribir la ingeniería en el Renacimiento y reflexionar sobre la Ingeniería en la actualidad.

Capítulo 4. Leonardo INGENIERO MILITAR.

En este capítulo hemos descrito los principales diseños militares que Leonardo realizó a lo largo de sus manuscritos.

Capítulo 5. Leonardo INGENIERO MECÁNICO.

En este capítulo hemos tratado de ordenar y clasificar las máquinas y mecanismos que Leonardo realizó a lo largo de sus manuscritos.

Capítulo 6. Leonardo INGENIERO HIDRÁULICO.

En este capítulo hemos descrito los principales diseños hidráulicos que Leonardo realizó a lo largo de sus manuscritos.

Capítulo 7. Leonardo INGENIERO CIVIL.

En este capítulo hemos descrito los principales diseños civiles que Leonardo realizó a lo largo de sus manuscritos. Más que obras de ingeniería civil, que podría estar enmarcadas en la propia ingeniería hidráulica (grúas excavadoras de canales, túneles, etc.), hemos dado cabida en este capítulo a toda aquella maquinaria que Leonardo diseñó en sus manuscritos de marcado carácter civil (máquinas para elevar pesos, maquinaria textil, etc.).

Capítulo 8. Leonardo INGENIERO AERONÁUTICO.

Todo lo relacionado con la realización del “sueño de volar” de Leonardo ha tenido cabida en este capítulo. Desde el estudio del vuelo de los pájaros, hasta el diseño de alas mecánicas, el famoso ornitóptero, etc.

Capítulo 9. El automóvil de Leonardo (Códice Atlántico, f. 812 r).

En este capítulo además de realizar una infografía en 3D del automóvil se ha procedido a una investigación de todo lo publicado sobre el automóvil de Leonardo a lo largo de la historia, y como ha ido evolucionando las diferentes interpretaciones del mismo.

Capítulo 10. Conclusiones y cumplimiento de los objetivos.

Es requisito que todo trabajo de investigación y tras seguir la metodología establecida, que se obtengan una serie de conclusiones. Éstas se encuentran expuestas en este capítulo junto a una descripción en relación al cumplimiento de los objetivos propuestos al inicio de la Tesis.

Apéndice A

En el apéndice A se recoge tanto la bibliografía usada durante la fase de investigación y consulta de documentación como la que finalmente se ha citado en la propia tesis.

Apéndice B

Tablas que hemos recopilado con información relevante de los folios de los manuscritos de Leonardo tanto de carácter ingenieril como arquitectónico.

Apéndice C

En el apéndice C definimos la terminología técnica, tal cual la usó Leonardo en sus manuscritos. La búsqueda concretamente se ha realizado en los Códices de Madrid I y II, así como en el Códice Atlántico. La herramienta de búsqueda empleada ha sido la que la propia página **e-Leo** pone a disposición de cualquier investigador. La traducción del italiano al español se ha llevado a cabo por el propio doctorando.

Capítulo 2

Vida y Códices de Leonardo

*La ciencia más útil es aquella
cuyo fruto es el más comunicable
(Leonardo da Vinci)*

2.1. Introducción.

Sin duda alguna, el texto más difundido y extenso sobre el ilustre florentino se debe a la pluma de Giorgio Vasari, autor de una obra que constituye una cantera de datos sobre los artistas italianos que destacaron en las Bellas Artes y la Arquitectura. Es un escritor de estilo ameno y cargado de resabios retóricos. Su inclinación por los aspectos anecdóticos y tópicos le resta valor a muchas de sus informaciones, las cuales no siempre son fidedignas. A veces peca de parcialidad y subjetivismo.

A pesar de alguna que otra invención, Vasari constituye una fuente de notable valor por la abundancia de datos y por su capacidad de observación. Esta biografía fue la primera que discurrió por vía impresa.

Giovanni Paolo Lomazzo, quien fue un admirador incondicional de Leonardo, llegó a conocer a su discípulo y albacea testamentario Francesco Melzi, quien le permitió examinar la producción vinciana en su poder.

PRINCIPALES FUENTES BIOGRÁFICAS ANTIGUAS (S. XVI)

Notitiae manuscritas

Antonio Billi c. 1516-1525

Anónimo Gaddiano c. 1540

Vitae impresas

Paolo Giovio c. 1528 1.ª ed. 1796

Giorgio Vasari 1.ª ed. 1550

2.ª ed. 1568 Incluye un grabado con el retrato de Leonardo. Presenta cambios notables en el texto.

Giovanni Paolo Lomazzo, Trattato dell'arte della pittura 1584, p. 58.

Giovanni Paolo Lomazzo, Idea del tempio della pittura 1590

Giovanni Paolo Lomazzo, Della forma delle muse 1591.

Este material biográfico evidencia el carácter polifacético de Leonardo. Los autores, según su lugar de procedencia y sus intereses, ponían el acento en distintos aspectos de su personalidad. En un primer momento fue considerado un pintor eximio y se le comparaba con Apeles de manera tópica, luego con Protógenes, un artista muy admirado del siglo IV a.C. por

su minuciosidad, lentitud en el trabajo y el exquisito acabado con el que culminaba sus obras. En una tercera etapa fue ganando terreno su valoración como filósofo y científico. Poco a poco se percibe el desarrollo de una corriente crítica de signo negativo, la cual se sustanciaba en denunciar la incapacidad del maestro para terminar algunos de sus encargos, su obsesivo perfeccionismo, su escasa producción o sus especulaciones científicas, consideradas por algunos fantasiosas, quiméricas o simplemente heterodoxas.

En nuestro siglo, la novela *El código da Vinci*, publicada en el año 2003, constituye un capítulo más de una visión deformadora y ahistórica del protagonista, aunque bien es verdad que se trata de una obra de ficción. Sin duda alguna, para el público en general el nombre de Leonardo origina hoy una asociación de ideas heteróclitas y, en su mayoría, falsas. La causa de este fenómeno hay que buscarla en la explotación de una fantasía injustificada, en un exceso de retórica y en un afán de consumismo indiscriminado.

De todos los libros consultados que tratan la vida y obra de Leonardo nos ha parecido interesante reproducir íntegramente el relato “*Leonardo da Vinci contado a los niños*” de *Bruno Nardini*, publicado en octubre de 1974 en el suplemento de “*El correo de la UNESCO*”, con motivo de un reportaje especial dedicado íntegramente al descubrimiento de los *Códices de Madrid*. Dicho relato, aunque mezcla fábula con realidad, expone fielmente los principales acontecimientos en la vida de Leonardo y nos transporta a su época.

2.2. Biografía de Leonardo da Vinci.

Tal y como hemos comentado en la introducción del capítulo pasamos a reproducir íntegramente la biografía que sintetizó de forma magistral Bruno Nardini sobre Leonardo.

Tumbado en la hierba, detrás de la casa de su abuelo, el pequeño Leonardo seguía con la mirada el vuelo de un milano que daba vueltas en torno a la torre del castillo de Vinci. Recostado junto a él, su tío Francisco le explicaba que para efectuar ese vuelo, llamado de "circunvolución", el ave aprovechaba el más leve viento. Pero el muchacho se había dormido.

Era una tarde de mayo, la tierra olía a heno y los grillos cantaban escondidos entre la hierba. Leonardo tuvo un sueño: se hallaba todavía en su cuna que la abuela Lucía había sacado al prado alejándose después. El milano, describiendo una espiral, descendía rápidamente del cielo y caía sobre él, pero no lo apresaba entre sus garras ni lo mordía con su pico curvo, sino que, agitando las alas, trataba de abrirle la boca con su cola bifurcada y, cuando lo hubo logrado, golpeaba la cola sobre sus labios y su lengua.

Leonardo se despertó gritando de miedo y se encontró sentado sobre la hierba junto a su tío Francisco.

-¿Qué te pasa?- le preguntó éste.

-El milano... balbució el muchacho, aún no convencido de que estuviera despierto-. Tío, soñé con el milano.

Muchos años después, en Milán, cuando se hallaba estudiando el mecanismo del vuelo de los pájaros, Leonardo escribiría que aquél era el primer recuerdo de su infancia y que el ave rapaz era para él como un mensajero del destino.

¡Y qué misterioso y esplendente fue el destino de Leonardo!

Nació en Vinci, una aldea pobre de Toscana, cerca de Florencia y junto al río Arno. No tuvo una madre como los demás niños sino una madrastra. No tuvo un padre afectuoso sino un abuelo adusto. Su único compañero verdadero y su maestro fue su tío Francisco, diecisiete años mayor que él.

Leonardo nació el 15 de abril de 1452. Había terminado el Medioevo, la época de las casas torreadas y de las comunas libres, y comenzaba la de las "signorías", el gobierno de los más ricos y de los más fuertes, en tanto que las incómodas torres daban paso a la construcción de suntuosos palacios.

Leonardo llegó a Florencia en un birlocho, llevado por su padre, Pedro de Vinci, quien había decidido trasladarse definitivamente a la ciudad para ejercer el 'cargo de notario' como todos sus antepasados. Junto al niño iba también la joven esposa de Pedro, de nombre Albiera, que hacía para Leonardo las veces de madre.

No ha llegado hasta nosotros ningún documento o testimonio sobre esa primera estancia de Leonardo en Florencia. Lo único que sabemos es que su padre le envió a una escuela de música y de gramática. La música consistía en aprender a tocar la flauta y la gramática en aprender a

escribir. En 1465 murió "mamá" Albiera y Pedro contrajo matrimonio con una mujer llamada Francisca. Leonardo tenía trece años y ya sabía cuál sería su carrera cuando fuera mayor. No sería notario como su padre o el abuelo Antonio. Sería pintor.

Pedro descubrió por casualidad esta secreta vocación de su hijo. Un día entró en la habitación del muchacho y vio un montón de papeles enrollados. Eran dibujos. "No son malos dijo a sí mismo en realidad son más bien buenos." Sin pérdida de tiempo se puso bajo el brazo el rollo de papeles y fue a mostrárselos a Andrea di Cione, llamado Del Verrocchio.

-Mire, maestro –le dijo-. He encontrado estos dibujos de mi hijo. ¿Qué le parecen?

Verrocchio los miró uno por uno, con creciente interés, y finalmente preguntó:

-¿Cuántos años tiene el muchacho?

-Diecisiete.

-Bien. Tráigamelo. Vendrá a vivir conmigo y yo haré de él un gran pintor.

Al día siguiente, acompañado de su padre, el joven Leonardo se dirigió al taller de Verrocchio donde entró como aprendiz. No tuvo miedo ni se sintió perdido. A decir verdad, no se encontró solo cara a cara con un maestro severo. Un grupo de alumnos lo acogió con ruidosas muestras de simpatía. Eran muchachos de su edad, destinados ellos también a ser un día, más o menos famosos. Los mayores eran Sandro di Mariano Filipepi, conocido más tarde como Sandro Botticelli, y Pedro Vannucci, llamado el Perugino. Entre los más jóvenes se distinguían Lorenzo di Credi, Francisco Botticini y Francisco di Simone.

En el inmenso taller lleno de yesos y de bloques de mármol, con mesas en las que se amontonaban pinceles y colores, y en un ambiente de trabajo- febril y de creación permanente, Leonardo se sentía feliz junto a sus compañeros. Realizaba de buen grado las tareas más humildes como barrer el suelo, lavar los platos, machacar las tierras de color, preparar los colores, limpiar los pinceles, servir de modelo para una estatua de David que esculpía el maestro. Pero sobre todo miraba, observaba, imitaba para aprender pronto y bien. Poco después se le asignó la tarea de preparar el estuco para los frescos, luego la de trasladar al muro los dibujos realizados sobre cartulinas y, finalmente, se le permitió tomar los pinceles para dar los últimos toques a las obras de su maestro.

Un día Verrocchio encomendó a Leonardo que pintara la cabeza de un ángel en un gran cuadro que representaba el Bautismo de Jesús. Una vez terminada la cabeza, observó el maestro que el otro ángel, que él mismo había pintado previamente, no tenía comparación con el de su joven discípulo. Entonces, según algunos de sus biógrafos, Verrocchio quebró sus pinceles como para indicar que a partir de ese momento no volvería a pintar.

A ese periodo corresponden numerosos estudios de Leonardo sobre la figura del caballo. En realidad, Verrocchio se hallaba por entonces modelando el monumento ecuestre del condotiero Bartolomé Colleoni, que le había encomendado la República de Venecia. Sus compañeros del

taller observaban con asombro cómo el joven Leonardo dibujaba frecuentemente con la mano izquierda y escribía siempre de derecha a izquierda (escritura de espejo), como suele creerse que escriben los magos.

Un día –tenía entonces 22 años-, Leonardo decidió abandonar el estudio de Verrocchio e ingresar en un gremio de pintores de Florencia, la Compañía de San Lucas, convirtiéndose así en profesional independiente. Lorenzo el Magnífico le pidió que dibujara una Virgen o Madonna, otros le encomendaron una Anunciación, luego un San Jerónimo y una Adoración de los Magos. Su padre le encargó que pintara para un campesino de Vinci un trozo de madera redonda y áspera, que serviría de rueda. Leonardo no rechazaba ninguno de esos pedidos y todo lo hacía en serio, incluso la decoración de la rueda, de la que hizo una especie de monstruo fantástico. Pero siempre se proponía alcanzar una perfección cada vez mayor, lo cual le obligaba a detenerse y dejar inconclusos sus trabajos. Tal fue el drama secreto de toda su vida.

Leonardo no era solamente pintor, sino también escultor. Había modelado algunas cabezas, las escenas de un Vía Crucis, y posteriormente un caballo de proporciones gigantescas. Además era músico: tocaba la flauta y la lira y, según refieren sus contemporáneos, "cantaba divinamente".

En Vinci había aprendido con su tío Francisco las propiedades de las plantas: era, pues, herborista y botánico. En Florencia había conocido a algunos médicos célebres y se había dedicado a estudiar anatomía: por la noche solía retirarse al depósito de cadáveres del hospital para efectuar disecciones y dibujar los diversos órganos del cuerpo humano. Observaba el curso de los ríos y proyectaba canales navegables. Leía libros de historia y sobre el arte de la guerra e inventaba nuevas armas. Contemplaba los edificios, como el Duomo o catedral de Florencia, para la cual Verrocchio había construido una inmensa esfera de madera como remate de la famosa cúpula de Brunelleschi, y concebía aparatos extraordinarios para levantar y transportar pesos enormes. Miraba el vuelo de los pájaros y soñaba con inventar una máquina capaz de transportar al hombre por los aires.

Escrutaba el fondo del mar e inmediatamente imaginaba la máscara y el equipo que debían llevar los buceadores. Veía cómo trabajaban los hombres y meditaba sobre las máquinas que podrían aliviar su esfuerzo, anticipándose a la cibernética de hoy.

Leía las obras de los filósofos antiguos y adquiría una sapiencia natural y profunda que entusiasmaba a cuantos le escuchaban. Era pobre pero se las arreglaba, gracias a la generosidad de sus admiradores, para vivir como un príncipe. Era hermoso, alto, fuerte –podía torcer con sus manos una herradura- y al mismo tiempo elegante, delicado y refinado. Pero sobre todo era bueno, sin arrogancia, y estaba siempre dispuesto a ayudar a los demás. Amaba y admiraba la vida, descubriendo en cada cosa su aspecto más bello o más noble.

Era un amante de la naturaleza; hoy día se le consideraría un ecólogo. Planeó una ciudad ideal, llena de espacios verdes, atravesada por canales y con calles que pasarían por encima y por debajo de las casas. Amaba a los animales: si encontraba un pájaro enjaulado, lo compraba para ponerlo en libertad. Reconocía por doquier la "maravilla

del Universo" y la presencia de su Creador o "Primer Motor", como él lo definía.

Leonardo era, sin duda alguna, un hombre del futuro: el primero y el más convencido ciudadano del mundo.

A los treinta años se trasladó a Milán, a la corte de Ludovico Sforza (llamado "el Moro"), quien había pedido a Lorenzo el Magnífico que le recomendará un escultor para que construyera un monumento a la memoria de su padre Francisco Sforza.

De su arribo a la capital de Lombardia y de su primer encuentro con Ludovico nos ha quedado una carta extraordinaria que el artista envió al Duque de Milán poco después de su llegada. En ella enumera Leonardo todas las cosas que era capaz de hacer, ante todo máquinas para la guerra. Luego afirmaba que sabía de escultura, arquitectura y pintura más que cualquier otra persona y desafiaba al Duque a someterlo a prueba. El riesgo era grande: Ludovico habría podido hacerlo encarcelar acusándolo de ser un visionario insolente, pero en lugar de ello lo mandó llamar, lo escuchó y le encomendó la realización del monumento a su padre, nombrándolo además "ingeniero ducal".

Fue en Milán donde Leonardo reveló otra pasión secreta: la de organizador de espectáculos o, para emplear una expresión moderna, la de director de escena. La "Fiesta del Paraíso", celebrada con ocasión de las bodas de Juan Galeazzo Sforza con Isabel de Aragón, y la "Justa", para las de Ludovico el Moro con Beatriz de Este, fueron memorables y aún queda recuerdo de ellas.

En la primera podían verse siete planetas girando en un cielo estrellado, en medio de música y canciones, mientras que el carro del Sol, tirado por caballos humeantes (extraordinario ejemplo de la técnica de la automatización), atravesaba la escena. En la segunda, un caballo vivo, cubierto con escamas de oro, presentaba una cabeza de carnero y una cola en forma de serpiente.

Del periodo de Milán nos han quedado obras célebres como La Virgen de las rocas, de la que existen dos versiones: una, pintada íntegramente por Leonardo, que se conserva en París, y otra, realizada en colaboración con De Prédís, que se halla en Londres. Pintó luego una Madonna para el rey de Hungría, Matías Corvino; el retrato de una muchacha con un armiño en los brazos, un retrato de perfil (posiblemente de Beatriz de Este) y, finalmente, La Última Cena, maravillosa y trágica al mismo tiempo por su rápida deterioración.

Ludovico le había encomendado pintar el Cenáculo en la pared del refectorio del convento de Santa Maria delle Grazie. Leonardo comenzó inmediatamente su trabajo. Detenía a la gente en la calle para grabar en su memoria las características de un rostro o de un gesto y estudiaba día y noche a sus personajes, hasta que terminó el boceto con sus más mínimos detalles. A diferencia de todos los artistas que anteriormente habían pintado la Última Cena como una reunión triste antes de que comenzara la Pasión, Leonardo se había propuesto representar el momento en que Jesús dice: "Uno de vosotros me ha de entregar". Los rostros y las actitudes de los Apóstoles debían expresar estupor, asombro, indignación, incredulidad, horror, mientras Jesús, inmóvil en el centro, parecería aislado de todos y ajeno a los sentimientos de sus discípulos.

Pero Leonardo, "el científico" Leonardo, quiso experimentar un nuevo tipo de material formado por tres capas distintas de encausto. Al final, cuando ya había terminado su fresco y mientras todo Milán se agolpaba en el refectorio para admirar la obra maestra, el artista se dio cuenta de que las diferentes capas de encausto no soportaban en la misma medida la temperatura exterior y comprendió que su obra no duraría mucho tiempo. Y, en efecto, 50 años más tarde estaba ya muy deteriorada.

Terminada apenas la famosa pintura, Leonardo tuvo que escapar a Venecia. Las tropas francesas de Luis XII, al mando de Juan Jacobo Trivulzio, habían entrado en Milán tras la huida de Ludovico el Moro. Unos arqueros gascones encontraron en un patio un inmenso caballo de arcilla. No sabían que se trataba del modelo para el monumento a Francisco Sforza, listo para ser fundido en bronce. Tampoco sabían que era obra de Leonardo y mucho menos quién era Leonardo. Y tomándolo como blanco para un concurso de tiro, se divirtieron deshaciéndolo con sus flechas.

Pronto pasó Leonardo de Venecia a Florencia. Volvía a su ciudad, después de casi veinte años de ausencia, precedido por la fama de su obra. Los Siervos de María, de la Iglesia de los servitas de la Anunciación, le dieron alojamiento y Leonardo les ofreció pintar para el altar mayor un cuadro que representara a Santa Ana con la Virgen.

Pero todos le pedían algo y las instituciones de todo tipo querían contar con él como consejero. El Secretario de la República Florentina, Nicolás Maquiavelo, le pidió inmediatamente que desviara el curso del río Arno, que desemboca en el mar cerca de Pisa, a fin de provocar el hambre entre los pisanos, que se hallaban en guerra con los florentinos.

Y Leonardo, que tenía como lema "No me canso de servir", seguía accediendo a cuanto le pedían. Pero los Hermanos de la Anunciación se impacientaban. El artista se recluyó en una habitación del convento y en menos de un mes el boceto estuvo terminado. Durante tres días los habitantes de Florencia desfilaron como en una procesión ante aquel dibujo. Entre ellos se encontraban el Gonfalonero Vitalicio de la República, Pedro Soderini, y un joven escultor que acababa de volver de Roma donde había esculpido una extraordinaria Piedad. Se llamaba Miguel Ángel Buonarroti.

Según sus biógrafos, la rivalidad surgida entre Leonardo y Miguel Ángel fue muy viva. Comenzó cuando Soderini concedió al joven Buonarroti un bloque de mármol que se encontraba desde hacía más de 60 años tras la catedral y al que Leonardo había también echado el ojo. Mientras Miguel Ángel esculpía aquel mármol de donde iba a surgir su famoso David, Leonardo se marchaba a Roma en el séquito de César Borgia y con el título de "arquitecto e ingeniero general".

De regreso a Florencia fue nombrado miembro del Consejo elegido para discutir el emplazamiento del David, cosa que no fue del agrado de Miguel Ángel; no faltaron pues las palabras duras y ofensivas. Y cuando Soderini adjudicó a Leonardo una pared de la gran Sala del Consejo del Palazzo Vecchio para que pintara sobre ella una batalla, Miguel Ángel solicitó y obtuvo la otra pared para plasmar su propia concepción del mismo tema. Así comenzó una incruenta y civilizada contienda entre ambos. Florencia entera seguía con interés el trabajo de los dos grandes

artistas, cada uno de los cuales, más que superar al otro, trataba de superarse a sí mismo.

Los bocetos de Leonardo, sobre la batalla de Anghiari, y los de Miguel Ángel, sobre un episodio de la batalla de Cascina, fueron expuestos al público en lugares y en momentos diferentes. Ellos representaron en la esfera del arte, como diría después Benvenuto Cellini, "la escuela del mundo".

Mientras tanto, Leonardo pintaba el retrato de una mujer hermosa y triste: Monna Lisa, esposa del patricio florentino Zanabi del Giocondo, la famosa Gioconda.

Terminados los bocetos, Leonardo comenzó inmediatamente el fresco del Palazzo Vecchio. Pero nuevamente le tentó el demonio de la técnica haciéndole descubrir en un libro de Plinio la fórmula de un encausto especial empleado por los romanos: se trataba de un empaste a base de resinas y de colofonia (resultante de la destilación de la trementina), que se hacía secar al calor de una llama y que daba a los colores un brillo de esmalte.

Leonardo hizo la prueba muchas veces y siempre con éxito, por lo cual decidió emplear dicho encausto en la realización de su Batalla de Anghiari. Pero cuando había avanzado considerablemente en su trabajo y, pintada ya toda la parte inferior del fresco, estaba empezando la superior, la llama demasiado distante no lograba ya fijar el color. Fue una noche trágica para Leonardo: al darse cuenta de que la pintura comenzaba a chorrear, añadió leña al inmenso brasero que colgaba de una polea. Pero era demasiado tarde: la llama no conseguía fijar los colores y, debido a su excesiva proximidad al muro, quemaba la pintura ya seca. En el espacio de una hora quedó destruida la obra maestra de Leonardo de Vinci.

Con la muerte en el alma se refugió en casa de un amigo, en Fiésolle. Pero allí le esperaba otra decepción. Tras muchos años de estudio, había construido una misteriosa "máquina para volar". Todo estaba listo para la gran prueba que debía realizarse en el monte Ceceri (que en italiano significa cisne). Pero el "hombre-cisne", un ayudante de Leonardo, no alzó el vuelo y, después de recorrer unos pocos metros suspendido en el aire, se precipitó en un bosque cercano. Así terminaba un sueño ambicioso acariciado durante mucho tiempo. Leonardo abandonó Florencia y regresó a Milán.

Luis XII, rey de Francia, quería tenerlo a su servicio, y Carlos de Amboise, lugarteniente del rey y gobernador de Milán, le honró con sus favores. Leonardo recobró ánimos, encontró amigos, comenzó de nuevo sus investigaciones científicas y pintó para el soberano francés algunas Madonnas que se han perdido. Pero los acontecimientos políticos le obligaron a partir. El hijo de Ludovico el Moro volvía a Milán apoyado por la caballería suiza, y los franceses hubieron de retirarse al otro lado de los Alpes. Leonardo se refugió en Vaprio d'Adda, en casa de su joven discípulo Francisco Melzi. Mientras tanto, había muerto en Roma el Papa Julio II y el cardenal Juan de Médicis, hijo de Lorenzo el Magnífico, fue elegido sumo pontífice con el nombre de León X.

Uno a uno, todos los artistas de Italia se trasladaron a Roma, entre ellos Leonardo. Julián de Médicis, el hijo menor de Lorenzo, lo alojó en

su palacio y le encomendó varios trabajos: el retrato de una mujer, algunas investigaciones sobre la reflexión de los espejos, el saneamiento de los pantanos de Pontini.

Pero Francia, tras la muerte de Luis XII, se preparaba a reconquistar Lombardía, que era aliada del Papa. El joven Francisco I cruzó los Alpes y derrotó a sus adversarios en Marignano. Leonardo había partido de Roma con el séquito de Julián de Médicis, que mandaba las fuerzas papales. Enfermo, Julián se detuvo en Florencia, donde murió, pero Leonardo siguió con el ejército hasta Piacenza. El Papa, para contrarrestar la derrota, fue a Bolonia a entrevistarse con el rey de Francia y, enterado de que el soberano se interesaba por el arte, quiso que lo acompañaran los artistas más notables e hizo llamar, entre otros, a Leonardo.

Cuando le fue presentado al rey, éste avanzó para abrazarlo y, ante el asombro de todos, le llamó: "Mon père". Dos días después, ante la insistencia del soberano, Leonardo aceptaba la invitación para trasladarse a Francia, a Amboise, donde Su Majestad ponía a su disposición el castillo de Clos-Lucé.

Así comenzaba el largo crepúsculo de la vida de Leonardo. Con la ayuda de su fiel discípulo. Francisco Melzi, el artista ordenó sus escritos, sus investigaciones y sus dibujos con el fin de componer una suma o gran obra enciclopédica que abarcara todos sus conocimientos sobre las épocas antigua y medieval y sobre la suya propia.

Francisco I no le encomendó obras de pintura, contentándose con gozar de su compañía y escucharle. Benvenuto Cellini escribiría más tarde: "He oído al rey decir que no creía que hubiera en el mundo otro hombre que supiese tanto como Leonardo... y que era un gran filósofo".

Con miras a realizar algo que agradara al rey, Leonardo concibió una admirable canalización del río Loira, trazó los planos de un castillo destinado a residencia real, dirigió un gran espectáculo artístico en el que, en un momento dado, un león mecánico aparecía rugiendo en el escenario y luego, al pronunciarse el nombre del rey, se abría el pecho con las garras haciendo brotar una cascada de lirios de Francia.

En la calma de la pequeña ciudad de Amboise, Leonardo revivía mentalmente su atareada existencia y escribía en su cuaderno de notas: "Una vida bien empleada es una larga vida".

Un milano volaba sobre el castillo de Cloux, en Amboise. Era la primavera, el 2 de mayo de 1519. En la penumbra de su alcoba el gran artista agonizaba. Tuvo la impresión de que el rey iba a visitarlo, de que ya había llegado al patio y, sin embargo, nadie se acercaba a su lecho. Quería llamar a alguien pero no lo lograba. Al fin salió de sus labios un sonido ronco y confuso. Melzi fue hacia él, le hizo reclinarsse sobre los almohadones y colocó sobre sus hombros la hermosa capa que llevaba cuando Francisco I salió a su encuentro. Y en el delirio de la muerte le pareció que el rey entraba en la habitación, que se aproximaba a él y que lo abrazaba sollozando.

Leonardo, conmovido, cerró los ojos.

La leyenda –porque de una leyenda se trata- ha quedado inmortalizada en cuadros de diversos pintores y, sobre todo, en un célebre dibujo de Ingres.

Pero si Leonardo no murió entre los brazos del rey fue únicamente debido a que el soberano de Francia se hallaba lejos de Amboise, en Saint-Germain-en-Laye. De otro modo se hubiera precipitado como un hijo a la cabecera del artista, y la leyenda se habría convertido en realidad. (NARDINI, 1974)

A continuación pasamos a ilustrar en una tabla de forma muy sintética una breve biografía de Leonardo da Vinci y cronología de algunos acontecimientos de la época.

1452	Leonardo nace el 5 de abril de 1452 en el pequeño pueblo de Vinci situado en la orilla derecha del río Arno, entre Florencia y Pisa. Su padre fue el notario Ser Piero da Vinci; su madre, Caterina, pertenecía a la clase baja, por lo que no se casaron. Leonardo fue pues hijo ilegítimo.
1453	La ciudad de Constantinopla, que había sido hasta entonces la capital oriental del cristianismo, pasa a dominio de los otomanos.
1455	Gutenberg publica la Biblia por primera vez en una imprenta.
1469	Su padre envía a Leonardo a Florencia, para ser aprendiz en el taller de Andrea Verrocchio. En aquel taller se trabajaba mayormente al servicio de Lorenzo Médicis, conocido como Lorenzo I el Magnífico. Además de la pintura y la escultura, se realizaban toda clase de trabajos artesanales: orfebrería, montaje de objetos mecánicos, construcción de instrumentos musicales, elaboración y utilización de toda clase de herramientas... Más tarde Leonardo se valdría de esos conocimientos en sus inventos.
1472	Con veinte años figura en la Cofradía de Pintores de Florencia.
1473-75	Participó en la confección del cuadro <i>El Bautismo de Cristo</i> de Verrocchio. Leonardo pintó un ángel del lado izquierdo y una parte del paisaje.
1476	Leonardo y otros artistas del taller de Verrocchio fueron acusados anónimamente de sodomía. La denuncia no pudo ser probada y el tribunal los declaró no culpables.
1482	Leonardo va a trabajar a Milán bajo las órdenes de Ludovico Sforza conocido por el sobrenombre de <i>El Moro</i> y permanece allí hasta prácticamente la caída del mismo. Antes de dirigirse a Milán, Leonardo le envió una carta autolaudatoria, en la cual subraya su habilidad para la construcción de cañones, catapultas, barcos de guerra y otros aparatos de ingeniería militar. Sin embargo, el Moro tenía más interés por convertir a Milán en una hermosa ciudad al estilo de Florencia, por lo que Leonardo trabajó fundamentalmente como artista.
1483	Nace Martín Lutero
1484	Por encargo de Ludovico Sforza prepara los primeros diseños de lo que había de ser el caballo gigante de 26 pies de altura que habría de construir en bronce en honor de Francisco Sforza, padre de Ludovico. En esta época pinta el famoso cuadro <i>La Virgen de las Rocas</i> .
1488	Realiza diseños de arquitectura, estudiando la estructura de iglesias con cúpula.
1489	Primeros dibujos de anatomía. Dibujos de cráneos.
1491-97	En esta época escribió el Códice de Madrid I, que hoy se encuentra en la Biblioteca Nacional de Madrid, y que ha sido de especial atención y análisis en la presente Tesis por su valor ingenieril.
1492	Los Reyes Católicos finalizan la reconquista con la toma de Granada. Cristobal Colón llega a América.
1493	Se expone en Milán el modelo en yeso del caballo.
1495-98	Leonardo pinta <i>La Última Cena</i> en el refectorio del convento de Santa María della Grazie de Milán.

1499	En vísperas de la caída de Ludovico el Moro, Leonardo deja Milán y hasta mediados del año siguiente se instala en Mantua y Venecia, para volver finalmente a Florencia.
1502	César Borgia envía una carta a Leonardo nombrándolo su arquitecto e ingeniero militar general. Junto a Borgia y Maquiavelo realiza un importante viaje a la Romaña.
1503	Leonardo vuelve a Florencia.
1503-5	Época que corresponde a la elaboración del Códice Madrid II.
1504	Muere Ser Piero da Vinci, padre de Leonardo. Comienza a pintar la <i>Mona Lisa</i> (Gioconda) cuadro que terminaría al año siguiente.
1506	Vuelve a Milán, al servicio de Charles d'Amboise jefe de las tropas francesas. En los años siguientes dedica la mayor parte de su tiempo al estudio de la mecánica, óptica, anatomía y la matemática. En cuanto a la ingeniería, prepara el plan para el drenaje de la zona pantanosa de Pontine, que más tarde sería llevado a la práctica.
1507-8	Oscila entre Milán y Florencia para quedarse finalmente en Milán. Miguel Ángel inicia su trabajo en la Capilla Sixtina.
1510-12	Trabaja con el profesor de anatomía Marcantonio della Torre y concluye sus trabajos de anatomía.
1512	Dibuja su autorretrato, a la edad de sesenta años.
1513-16	Tras una breve estancia en Florencia, se dirige a Roma; allí tiene a su disposición un estudio en el Belvedere del Vaticano. Durante estos años pinta el cuadro <i>San Juan Bautista</i> .
1516	Se dirige a Francia en compañía de sus alumnos Salai y Melzi. Bajo la protección de su admirador Francisco I de Francia vive en el castillo de Amboise, escribiendo sus notas y llevando a cabo sus experimentos científicos.
1519	Muere en el castillo de Amboise el 2 de mayo de 1519. Ese mismo año Magallanes y Elcano inician el viaje que daría la primera vuelta al mundo. El Papa condena a Lutero.

Tabla 2.1: Principales hitos en la biografía de Leonardo.

Fuente: (IRIONDO 1997)

2.3. Descripción y contenido de los Códices de Leonardo.

2.3.1. El Códice Atlántico.

El Códice Atlántico (Milán, Biblioteca Ambrosiana) que conserva la encuadernación original del siglo XVI es con sus 401 hojas, la más extraordinaria y extensa colección leonardiana que se conozca. Es el más famoso de los Códices leonardianos y actualmente se encuentra en la Biblioteca Ambrosiana de Milán y permanece allí desde que en el año 1637 Galeazzo Arconati la donó. Su nombre deriva del gran formato de sus páginas, semejante al de un atlas (65 cm x 44 cm). Su aspecto era el de un auténtico código, es decir, un libro preparado por el autor para ser llenado de dibujos y notas. Se trata, en realidad, de una miscelánea de hojas y fragmentos reunidos en un volumen por el escultor Pompeo Leoni del s. XVI, que tuvo una discutible restauración entre los años sesenta y setenta del siglo XX.

El material del Códice Atlántico abarca toda la carrera de Leonardo, a lo largo de un periodo de más de 40 años, desde 1478, cuando tenía 26 años, hasta 1519 en que falleció. En él se encuentra la más rica documentación de sus contribuciones a las ciencias mecánica y matemática, la astronomía, la geografía, la física, la botánica, la química, la anatomía y el urbanismo (NAVONI, 2012). En él se encuentran la mayor parte de los proyectos de tipo militar en los que participó. Recoge también sus pensamientos a través de fábulas y reflexiones filosóficas. Son 1.119 folios sueltos donde se pueden encontrar más de 1.700 dibujos. En el año 1968 el Códice se encuadernó en 12 grandes volúmenes para evitar que se perdieran los folios sueltos. Esta encuadernación se realizó en la abadía de Grottaferra, cerca de Roma, pero debido al inconveniente que presentaba la encuadernación para su investigación, consulta y exposición al público, en el año 2008 se procedió a desencuadernar dichos volúmenes (NAVONI, 2012). De esta forma se dejó cada folio suelto y se incluyeron dentro de un marco protector que permite su consulta y exposición.

Incluye además anotaciones sobre los aspectos teóricos y prácticos de la pintura y de la escultura, sobre óptica, perspectiva, teoría de la luz y de la sombra, así como sobre los materiales utilizados por el artista, además de numerosos estudios, como los realizados para la Adoración de los Magos, la Leda, la Batalla de Anghiari y proyectos para los monumentos de Francesco Sforza y Gian Giacomo Trivulzio, incluso para construcción de autómatas.

Efectivamente después de la azarosa singladura que realizó el Códice Atlántico desde que Leonardo falleciera en 1519 y donara sus manuscritos, como si fueran un tesoro que había de preservar y proteger a toda costa- a su fiel discípulo y amigo Francesco Melzi. Ciento dieciocho años más tarde, como ya hemos comentado el marqués Galeazzo Arconati, ilustre representante de la alta aristocracia milanese, compró por 300 escudos el Códice Atlántico a Polidoro Calchi (heredero de Pompeo Leoni).

Este hecho representó un punto de inflexión en la turbulenta historia del Códice Atlántico. El marqués de Arconati, en un acto de gran visión de futuro cultural y exquisita filantropía, donó, el 22 de enero de 1637, la preciosa colección de escritos y dibujos de Leonardo a la Biblioteca Ambrosiana, que desde 1609 había abierto sus puertas al mundo de la cultura, las ciencias y las artes gracias la intuición de su fundador, el cardenal Federico Borromeo. Después de más de un siglo de vicisitudes, lo que se había convertido en el Códice Atlántico quedó por fin fuera del alcance de los especuladores para quedar reservado a los especialistas. De ese modo, no tuvo que sufrir las turbulentas disputas entre las familias nobles ni la codicia de los marchantes de arte faltos de escrúpulos, así como tampoco el descuido ni un mayor proceso de dispersión, quedando a salvo para el estudio de sucesivas generaciones de eruditos en los austeros salones de la Biblioteca Ambrosiana.

La elección del marqués de Arconati bien merece una reflexión. La Biblioteca Ambrosiana no era una biblioteca corriente, pues el cardenal Federico La había enriquecido

con preciosos manuscritos en todas las lenguas y de todas las culturas (latín, griego, arameo, hebreo, árabe), y con miles de libros impresos raros y muy buscados. En 1618, el fundador creó una galería de arte junto a la biblioteca que alberga importantes obras, como el boceto de Rafael para *La escuela de Atenas*, *Cesto con frutas* de Caravaggio, *Adoración de los Magos* de Ticiano, así como miles de dibujos y grabados. La Ambrosiana ya era considerada desde sus orígenes como una institución cultural de gran importancia, profundamente enraizada en la ciudad de Milán, como una biblioteca “cívica” y galería de arte por igual, en una época en la que no prodigaban este tipo de instituciones públicas. Dirigida por eclesiásticos consagrados por entero al estudio y la promoción de la cultura, con una gran independencia de la alternancia del poder político. Milán acabó por considerar a la Ambrosiana la institución cultural milanesa por excelencia.

En estos últimos cuatro siglos la Biblioteca Ambrosiana no ha parado de crecer, gracias a las innumerables donaciones recibidas. En este contexto es en el que se debe situar, entender e interpretar el gesto del marqués de Arconati. La decisión de donar el Códice Atlántico de Leonardo a la Ambrosiana es la primera prueba de entender tan ilustre institución, no sólo desde el punto de vista cronológico sino también fundacional. Es, por ello, un gesto paradigmático, ejemplar y de indudable importancia histórica tanto para los estudios de Leonardo, como para la cultura milanesa. De este modo, los folios de Leonardo “descansaron” a salvo, durante aproximadamente un siglo y medio en la Biblioteca Ambrosiana, hasta la llamada “tormenta napoleónica” a finales del siglo XVIII.

En efecto, el 15 de mayo de 1796 Napoleón entró triunfante en Milán e impuso un pesado tributo de guerra sobre toda Lombardía; además, con el pretexto de proteger lo que se definió como “monumentos de las ciencias y las artes” en las tierras conquistadas, puso en marcha un metódico programa para trasladar todas estas obras a Francia, botín de guerra, en resumidas cuentas.

El 24 de mayo, ni siquiera 10 días después de su entrada en la ciudad, el comisionado de guerra y ministro de Cultura de Napoleón apareció en la Biblioteca Ambrosiana con una lista detallada de las obras de las que se tenía que incautar; evidentemente, se sabía dónde estaban las obras más valiosas (por ejemplo, el famoso manuscrito perteneciente a Petrarca, con las obras de Virgilio). Pero lo que encabezaba la lista era la obra maestra absoluta conservada en la Ambrosiana, el Códice Atlántico o, para ser más precisos, “*le carton des ouvrages de Leonardo d’Avinci*” (“la caja con las obras de Leonardo d’Avinci”). El poco conocimiento de la lengua italiana había alterado curiosamente, en la lista del comisionado de guerra de Napoleón, el nombre con el que Leonardo era y es conocido en todo el mundo.

El viaje a París fue largo y laborioso. Las cajas con las obras de la Ambrosiana no llegaron hasta el 25 de noviembre, justo seis meses después de la incautación. Los escritos de Leonardo se habían embalado en dos cajas diferentes; una de ellas, con el Códice Atlántico, iba destinada a la Biblioteca Nacional de Francia, en tanto que la otra, con 12 códices menores de carácter científico, pero igualmente obras manuscritas del propio Da Vinci, acabó en el Instituto de Francia.

Un nuevo capítulo de la historia del código se escribió tras la caída de Napoleón y la Restauración del congreso de Viena de 1815 que debía rediseñar o, mejor dicho, reconstruir la Europa tras Bonaparte. Pero los temas de los que se trató en Viena no eran sólo de carácter político, sino también de la restitución de las obras artísticas robadas en todos los países conquistados. Con dicho objeto se enviaron a París comisionados de las potencias vencedoras para reclamar las obras expoliadas.

Así tras 19 años en territorio francés se consiguió que el Códice Atlántico regresara a la Ambrosiana, donde permaneció hasta la década de 1960. Sin embargo, no se consiguió encontrar los 12 pequeños códices restantes que estaban en el inventario, simplemente porque

habían acabado en el Instituto de Francia. Son los manuscritos de Francia de Leonardo que comentamos en el apartado correspondiente.

En 1960 se planteó llevar a cabo una restauración a fondo del tesoro de da Vinci, en primer lugar para protegerlo mejor, teniendo en cuenta el hecho de que ya había sido víctima de un robo sensacional en 1968, que se resolvió de forma satisfactoria con la recuperación de los pocos folios robados. El problema que planteaba la colección era la innumerable serie de folios que no estaban unidos entre sí y que, por tanto, se podían sacar fácilmente.

Se tomó por ello la decisión drástica de encuadernar los más de mil folios del Códice Atlántico en 12 volúmenes. La operación se realizó haciendo uso de los mejores métodos de restauración conocidos en aquella época, en la abadía de Grottaferrata, cerca de Roma, en el laboratorio de los monjes basilianos. Incluso el transporte del códice tuvo dimensiones épicas, en automóvil y con escolta policial desde Milán hasta el corazón del Lazio. La restauración en sí, tal como cabía esperar, originó un intenso debate entre los especialistas, con innumerables posturas contrapuestas. En primer lugar, se decidió conservar el orden de los folios tal como los había dispuesto Pompeo Leoni en el siglo XVIII, una distribución que, como ya hemos visto, era totalmente al azar pero que ya se había convertido en la canónica, incluso en la manera de citar los folios, y conveniente, por tanto, para facilitar las referencias y comparaciones entre los estudios antiguos y los modernos. Pero el problema real suscitado por los eruditos fue que la naturaleza original del códice se había alterado al haber sido “bloqueado”, por decirlo de algún modo, en 12 volúmenes. Esto implicaba, en primer lugar, un considerable esfuerzo para cualquier estudio comparativo de los distintos folios; de hecho, debido al desorden en que los había dispuesto Pompeo Leoni, podía ocurrir que los temas homogéneos (por ejemplo, estudios sobre óptica o mecánica) estuvieran dispersos en diferentes volúmenes, o en uno, pero muy separados unos de otros.

Todo esto tenía, además, un efecto negativo en las posibilidades de exhibir o utilizar el tesoro. Esto se puso en evidencia en la gran exposición sobre la Ambrosiana y Leonardo (L’Ambrosiana e Leonardo) organizada en 1998, justo un año después de la reapertura de la biblioteca y la galería de arte tras los trabajos de restauración llevados a cabo durante la década de 1990. De hecho, tan sólo se expusieron 12 dibujos, dado que cada volumen solamente se podía abrir por una página en su correspondiente vitrina. Era evidente que, en esas condiciones, la disponibilidad del Códice Atlántico quedaba severamente limitada: un gran tesoro condenado a quedar escondido.

Sobre la base de todas estas consideraciones y con ocasión del cuarto centenario de la Ambrosiana (1609-2009), el Colegio de Doctores, bajo la presidencia de prefecto Franco Buzzi, concibió un proyecto para intervenir en el precioso códice de da Vinci que permitiría una mejor protección y conservación y que, al mismo tiempo, facilitaría la evaluación y presentación de la obra.

De este modo, a inicios de 2009, tras haber consultado con los mejores expertos en el campo de la restauración y después de recabar las opiniones de los más reputados especialistas en Leonardo, la Ambrosiana se embarcó en una operación única que bien podría definirse como histórica por derecho propio. El primer paso del proceso consistió en el desencuadernado de los 12 volúmenes con objeto de “liberar” por fin los más de 1.000 folios de aquella especie de jaula en la que habían estado encerrados durante más de 40 años. A continuación, se insertó cada uno de los folios en un marco protector especial que permite su consulta, pero que evita al mismo tiempo cualquier maniobra invasiva de los preciosos manuscritos de Leonardo. Esta operación tiene una triple ventaja: de carácter conservador, científico y cultural (de exposición).

Desde el punto de vista de conservación de la obra, no hay duda de que cualquiera que necesite consultar un folio específico del códice no necesita hojear entre docenas de otros, el único método de consulta posible antes de 2009, lo que sometía a los manuscritos de Leonardo

a movimientos y tensiones peligrosas. Además, y con el expreso propósito de evitar tales riesgos, durante décadas el Códice Atlántico había sido excluido de consulta, incluso por parte de los especialistas, a los que tan sólo se les proporcionaba facsímiles.

Sin embargo, en la actualidad, y ésta es una ventaja de carácter científico, es posible acceder a varios folios al mismo tiempo, sin necesidad de hojear varios volúmenes. Es posible, de un modo totalmente seguro, realizar comparaciones entre folios que, hasta hace poco, se encontraban en distintos volúmenes pero en lugares que impedían realizar cualquier tipo de comparación. Esta es, pues una operación muy meritoria por la cual la comunidad científica mundial debe estar agradecida a la Ambrosiana.

Pero también el público en general debe estarlo por la decisión de encuadernar el Códice Atlántico, y ésta es la tercera ventaja de la operación: la de carácter cultural y de exposición. De hecho, como ya se ha mencionado, la exhibición del Códice Atlántico organizada por la Ambrosiana en 1998 se había visto forzada a mostrar sólo 12 folios de los 12 volúmenes, tras lo cual el código fue devuelto a la llamada “cámara del tesoro” de la biblioteca, de nuevo fuera del alcance del público. Pero ahora, gracias a la nueva e inteligente libertad adquirida por los folios de Leonardo, el tesoro por excelencia de la Ambrosiana, legendario por su nombre pero desconocido en la práctica, no está ni enterrado ni en desuso, tal y como ha quedado de manifiesto en las numerosas exposiciones sobre diversos temas que se han sucedido en Milán, en otros lugares de Italia y en el extranjero, y con la exposición de folios que nunca antes se habían mostrado en público en general.

2.3.2. Colección Windsor.

Dicha colección es propiedad de la casa real británica desde 1690 y muy probablemente se tratase del mismo libro de 234 hojas que ya figuraba en el inventario de las propiedades de Leoni redactado en 1609. Actualmente la colección Windsor está ampliada puesto que en 1613 se la añadió un apéndice. Los herederos de Leoni en 1630 vendieron el libro en España a Lord Arundel.

Se podría decir que la colección Windsor trata temas muy diversos, manteniendo la encuadernación original, organizados por Leoni llegando a montar alrededor de 600 dibujos de formatos y temas diversos realizados por Leonardo entre 1478 y 1518.

Sin duda la parte más importante del código es su sección primera de Anatomía formada por alrededor de 200 dibujos en los que se puede observar todo el trabajo que sobre el cuerpo humano realizó Leonardo diseccionando cadáveres a lo largo de 30 años. La siguiente sección de la colección trata los Paisajes, entre los que se cuentan los magníficos Diluvios de Leonardo, también aparecen Caballos y otros animales, en los que se pueden contemplar los estudios para las Adoraciones juveniles, para los monumentos de Sforza y Trivulzio y para la Batalla de Anghiari. La tercera sección está formada por figuras, perfiles, caricaturas e incluye, entre otros, los estudios para la Virgen de las Rocas y el hermosísimo conjunto de 15 hojas para la Última Cena. Por último, nos encontramos con las “hojas misceláneas” que la conforman un material diverso, apareciendo en esta sección, jeroglíficos, emblemas y alegorías.

A finales del siglo XX se comenzó a desmontar el Códice. Dicho desmontaje concluyó en 1994 con la colocación de cada hoja entre dos planchas de polimetilmetacrilato (PMMA), material muy usado en los expositores por su mayor transparencia y dureza que los plásticos favoreciendo aún más su visión y su conservación. Se procedió igualmente a la organización de las hojas por temas y cronología, siguiendo el esquema de catalogación adoptado por Carlo Pedretti para su publicación en facsímil.

2.3.3. Códice Arundel.

También este códice (Londres, British Museum) es una colección miscelánea, aunque no de hojas dispersas o fragmentos, sino de fascículos, con un total de 238 hojas de distintos formatos, de 21 cm x 15 cm básicamente. La historia de este manuscrito es oscura: no aparece descrito en el inventario de Leoni, aunque es probable que lord Arundel lo comprara en España en los años treinta del siglo XVII y se mantuviera en su poder hasta 1642. El códice fue donado por los herederos del lord Arundel a la Royal Society de Londres en 1666, y entre 1831 y 1832 pasó a pertenecer al British Museum.

La matemática es el tema dominante de este manuscrito. Por algunas notas de compras y otros apuntes, que a menudo aparecen fechados, se puede reconstruir la cronología de las hojas: las 30 primeras corresponden a 1509, mientras que las siguientes se pueden situar entre 1478 y 1518. Algunas hojas sueltas presentan dibujos y temas ingeniosos, como un equipo con máscara y tubos para respirar bajo el agua.

2.3.4. Manuscritos de Francia.

Se trata de 12 códices de distinto formato, números de páginas, encuadernación, cronología y contenido, que se conservan en el Institut de France de París. En 1795 Napoleón hizo que fueran trasladados de la Biblioteca Ambrosiana de Milán a esta institución francesa. La signatura A-M, de finales del siglo XVIII, se debe al abad Giovan Battista Ventura. De formato reducido, a veces incluso de bolsillo, estos cuadernos de apuntes con dibujos y notas conservan la forma y las características originales de la compilación leonardina, incluido el hábito de comenzar el libro por el final (Leonardo era zurdo y escribía de derecha a izquierda) y la aparición de hojas colocadas al revés.

De los 12 códices, el Manuscrito A (1490-1492) y el Manuscrito B (el más antiguo de los códices leonardinos conocidos, correspondiente a 1487-1489) sufrieron el mencionado robo de Guglielmo Libri: estaban integrados por los códices denominados Ashburnham 2038 y 2037 (compuestos por Libri con las hojas sustraídas y vendidas a lord Ashburnham, retornaron al Institut de France en 1891).

En el Manuscrito B aparece una serie de dibujos de máquinas voladoras, un submarino e incluso un “tornillo aéreo” que anticipaba la invención del helicóptero. El Manuscrito E (códice tardío, con anotaciones de 1513-1514) es también importante y fue asimismo extraído por Libri del último fascículo, que se perdió posteriormente. La sección principal trata de física mecánica, disciplina a la que Leonardo aportó contribuciones definitivas. El Manuscrito F (1508), en el que el tema del agua tiene un papel preponderante, es uno de los que se han mantenido prácticamente intactas desde su origen. En el Manuscrito L (1497-1504) se hallan los apuntes referentes al Última Cena. El Manuscrito M (1499-1500) es el testimonio de un momento importante en la vida de Leonardo, cuando se aproxima a algunos autores clásicos, como Euclides, cuyas enseñanzas influyen decisivamente en sus observaciones sobre geometría, que ocupan un espacio relevante en este códice.

2.3.5. Códices Forster.

Son tres códices (Victoria and Albert Museum, Londres) de reducidas dimensiones, como una libreta de bolsillo, y muy diferentes entre sí, tanto por los temas tratados (geometría, hidráulica y física, pero también composiciones literarias, notas sobre la Última Cena, proyectos arquitectónicos y diversos apuntes de carácter práctico) como por su datación (abarca desde 1487 a 1505). Los tres manuscritos corrieron la misma suerte, pasando de Leoni al conde Lytton, para ser posteriormente heredados por John Forster, quien, al morir en 1876, los legó al museo londinense.

2.3.6. Códice sobre el vuelo de los pájaros.

De pequeño formato (Turín, Biblioteca Reale; 21 cm x 15 cm), formaba parte del manuscrito B, del cual los sustrajo Guglielmo Libri, que lo desmembró y vendió cinco de sus hojas en Inglaterra. El resto del códice, al que ya sólo le quedaban 13 hojas, fue adquirido en 1867 por el conde Giacomo Manzini di Lugo y vendido por sus herederos al príncipe ruso Teodoro Sabachnikoff, quien, tras haber recuperado una de las cinco horas que faltaban, se encargó de su primera edición impresa. En 1893 Sabachnikoff donó el manuscrito a la familia Saboya. Tras ser instalado en la Biblioteca Reale de Turín, entre 1903 y 1920 se le reintegraron las cuatro hojas que le faltaban y fue encuadernado en 1967. Se trata, como indica el nombre del manuscrito, de estudios sobre el vuelo de los pájaros relacionados con los intentos de construir una máquina voladora. La fecha que aparece en el códice, 1505, es la del proyecto para aquella máquina. Pensada inicialmente para funcionar con el batir de alas utilizando los músculos humanos como fuente de energía, en esta fecha se empieza a concebir una especie de aeroplano sin motor que funciona con las corrientes de aire.

2.3.7. Códice Trivulziano.

Con un formato de 20,5 cm x 14 cm, (Milán, Biblioteca del castillo de los Sforza), este códice de 62 hojas, de las que actualmente faltan varias, había sido signado por Francesco Melzi con la sigla F. Tras pasar a ser propiedad de Leoni y posteriormente de Arconati, aparece descrito en el acto de donación a la Biblioteca Ambrosiana (1637), si bien volvió a poder de Arconati a cambio del volumen más tarde conocido como Manuscrito D. A partir de ese momento, se pierde el rastro de este códice hasta que vuelve a aparecer en manos de Gaetano Caccia, quien, en 1750, se lo cedió al príncipe Trivulzio. Junto al fondo trivulziano, pasó en 1935 a la Biblioteca del castillo de los Sforza. Tras ser encuadernado con algunos fascículos colocados al revés, sus páginas han vuelto a ser numeradas con tinta roja para evitar la confusión en el orden de las hojas. Este manuscrito, uno de los más antiguos que se conocen de Leonardo, se remonta a 1487-1490.

2.3.8. Códice Leicester (ex Hammer).

Conservado en Seattle, en la colección Bill Gates, se trata de 18 hojas dobles (con anverso y reverso, cuyo tamaño medio es de 29 cm x 22 cm) que Leonardo compiló a pluma entre 1506 y 1508, añadiendo fragmentos hasta 1510. Trabajaba en una hoja doble cada vez, colocando luego cada una en el interior de las otras, como si se tratara de un libro. Surge así, por tanto, una especie de repertorio móvil, abierto a reconsideraciones y reflexiones. Sin embargo, es probable que Leonardo decidiera que las hojas se cosieran juntas para crear un libro, de modo que el manuscrito se puede definir como un códice en toda regla.

Tras adquirirlo Armand Hammer en 1980, el códice ha sido desmontado y actualmente se presenta en hojas sueltas, como cuando Leonardo lo estaba compilando.

En 1994 fue adquirido por Bill Gates, y permanece, por tanto, en Estados Unidos. Los estudios sobre aguas, ilustrados por dibujos fascinantes de corrientes, saltos y remolinos, constituyen el tema central de este manuscrito.

2.3.9. Códices de Madrid.

Se denominan así los dos volúmenes que fueron objeto de un hallazgo espectacular y casual en la Biblioteca Nacional de Madrid en 1966 y que se dieron a conocer a través de su publicación facsímil en 1973.

Parece que se trata de los dos libros pertenecientes a don Juan Espina, llegados probablemente a sus manos a través de la herencia de Leoni. A la muerte de Espina los dos volúmenes debieron de pasar a la Corona de España y, por tanto, a la Biblioteca Real, donde

aparecen catalogados en el inventario de 1831-1833. Sin embargo, en su traslado (1830), junto con otros manuscritos, del palacio a la Biblioteca Real, se produjo una transcripción errónea de la signatura que dificultó su recuperación hasta 1966.

En el Códice de Madrid II (que en su mayor parte se remonta a 1503-1505) destacan las notas referentes a la Batalla de Anghiari y las relacionadas con la perspectiva y con la óptica, que Melzi utilizó para recopilar el Tratado de pintura.

El último gran descubrimiento: los Códices de Madrid:

En el invierno de 1964-1965, en un estante de la Biblioteca Nacional de Madrid se encontraron dos manuscritos de Leonardo. En realidad, el descubrimiento era el fruto de una larga búsqueda. Los dos valiosos hallazgos se habían perdido por culpa de un error de archivo cometido un siglo antes. Estaban en España desde el siglo XVII en manos del noble Juan de Espina quien, a su muerte en 1642, se los legó al rey de España. Del Palacio Real pasaron a la Biblioteca Real, que más tarde se convirtió en la Biblioteca Nacional. En los siguientes apartados se comenta con más detenimiento cómo llegaron los Códices de Madrid hasta España.

Con su publicación en 1974, el mundo, particularmente científico y el de los expertos, se conmocionó por esta valiosa fuente de material inédito sobre Leonardo. Es la prueba de que sobre Leonardo siempre hay algo nuevo por descubrir y que las novedades pueden ser desconcertantes. Los dos códices, llamados Madrid I y Madrid II, presentan casi setecientas páginas de nuevos proyectos y escritos de Leonardo relacionados con temas como arquitectura, geometría, música, mecánica, navegación, y mucho más, cuyo valor histórico-cultural es incalculable. Queriendo hacer un símil banal, si Bill Gates compró en 1994 el (decididamente más pequeño) Códice Hammer por un valor de cerca de un millón de dólares por página (hacen un total de treinta y seis), el valor, en 2010, de los códices de Madrid no debería ser calculado en menos de mil millones de dólares.

Universalmente han sido reconocidas como de crucial importancia las últimas páginas del Códice Madrid II, ya que presentan el proyecto del gran monumento a Francesco Sforza. Demuestran que Leonardo estaba realmente preparado para realizar la más grande fundición de la historia en una única colada: le frenó la caída del Ducado de Milán bajo dominio francés.

El que deja más desconcertado, incluso al público más distraído, es el Códice de Madrid I: cientos de hojas sobre mecánica, dibujadas y paginadas de manera impecable, hacen que las hojas del famoso Códice Atlántico parezcan meros bocetos.

El Códice Madrid I es un tratado de mecánica, pero lo que realmente importa es que lo era en las intenciones de Leonardo ya que no fue encuadernado tras su muerte (como sucede con la miscelánea del Códice Atlántico). De hecho, fue paginado por Leonardo y nos ha llegado prácticamente intacto, excepto por dieciséis páginas (ocho hojas) que fueron arrancadas y parecen que se han perdido. Puede definirse como el primer y más completo tratado de la historia de la mecánica renacentista. No hay comparación posible con la capacidad gráfico-descriptiva e ingenieril de los contemporáneos de Leonardo, que parecen “medievales” con respecto a los dibujos del maestro, que todavía hoy son irreprochables. El cuidado de la paginación de las hojas y de los dibujos técnico-mecánicos presupone que Leonardo encuadernó esta obra pensando en una posible publicación, y diversos indicios hacen pensar en el proyecto de un tratado de mecánica dividido en cuatro partes o libros. Probablemente, si Leonardo lo hubiese terminado y lo hubiese impreso, habría dado tal impulso al desarrollo de la mecánica como para hacer que se adelantase al menos un siglo. Pero por desgracia nada del “Leonardo científico” fue publicado ni adecuadamente estudiado hasta finales del siglo XIX. De hecho, Leonardo no completó ningún libro destinado al público, ni se preocupó por imprimirlos, ya sea porque estaba demasiado inmerso en sus estudios o ya sea porque habría hecho falta mucho tiempo para trasladar sus innumerables

dibujos a las matrices de madera (xilografía). Por no hablar de que en aquel momento los impresores estaban ocupados con volúmenes de lenguaje en general “incomprensible” que el mismo Leonardo criticaba. Sus dibujos, por el contrario, son extremadamente claros y completos, y contienen estudios sobre los conceptos en los que se basa toda la mecánica moderna, es decir, las máquinas simples.

2.4.- Dispersión de los códices.

Para comprender mejor como se produjo la dispersión de los manuscritos Vincianos paso a reproducir íntegramente el artículo titulado “*La extraña aventura de los manuscritos de Leonardo*” que Paolo Galluzzi publicó en la revista El Correo de la Unesco en octubre de 1974 con motivo de la reciente publicación facsimilar de los Códices de Madrid. (GALLUZZI, 1974)

“Durante casi tres siglos, los innumerables testimonios que nos dejó Leonardo de sus trabajos científicos y técnicos permanecieron confundidos en un impenetrable farrago de papeles y de notas de lectura, tan caóticamente organizados y de tan difícil interpretación que hasta fines del siglo XVIII su fama de artista y de pintor primó notablemente sobre la consideración que merecía como filósofo y hombre de ciencia. El deplorable sino que padecieron, después de la muerte del maestro (1519), todos sus manuscritos impidió que la cultura europea se beneficiara de las ideas y de las audaces soluciones que Leonardo había expuesto.

Sabemos que dejó por testamento todos sus manuscritos a su fiel discípulo Francesco Melzi, que le había seguido en su incesante peregrinar hasta su mismo lecho de muerte. ¿Cómo se llegó entonces a la actual dispersión de los autógrafos leonardianos, otrora reunidos? Francesco Melzi conservó la preciosa herencia en su casa de Vaprlod'Adda. Al morir en 1570, su hijo y heredero, Orazio Melzi, arrinconó en un granero unas reliquias para él desprovistas de Interés. Lelio Gavardi, preceptor de la familia Melzi y colaborador y amigo del célebre impresor veneciano Aldo Manuclo, pudo así apoderarse fácilmente de 13 cuadernos de Leonardo y se los llevó a Florencia para ofrecérselos a Francisco de Médicis con la esperanza de obtener una suma de dinero considerable. Pero el increíble parecer de un consejero del Duque fue: «Nada de esto podría interesar a Vuestra Excelencia.» No pudiendo llevar a feliz término su proyecto, y viendo que se esfumaba su sueño de hacer fortuna, Gavardi pidió a su amigo Ambrogio Mazzenta, que partía a Milán, que devolviera los cuadernos a Orazio Melzi. Pero éste tampoco quiso recibirlos y, como puede leerse en las memorias de Mazzenta”, «se asombró de que me hubiera tomado tales molestias y me regaló los libros».

Es entonces cuando entra en escena Pompeo Leoni, de Arezzo, que iba a desempeñar un papel decisivo en la historia de los -manuscritos de Leonardo. Escultor en la corte de Felipe II.de España, Leoni mostró gran Interés por los manuscritos que conservaban los herederos de Francesco Melzi y, prometiendo protección y favores personales, consiguió que le cedieran una gran parte de ellos. Asimismo, logró obtener 10 de los 13 cuadernos que Orazio Melzi había regalado a Mazzenta. Entre 1582 y 1590, esto es en apenas ocho años, la herencia de Leonardo pasó casi totalmente a manos de un nuevo propietario.

Deseoso de presentar los documentos de un modo más atractivo, y aun siendo persona incompetente en la materia, Leoni no vaciló en desmembrar varios cuadernos para reagrupar sus páginas en forma de grandes volúmenes. Esta singular «restauración» modificó básicamente la disposición original de los

escritos de Leonardo, al borrar de golpe un testimonio inapreciable sobre el orden de composición, la cronología y el número inicial de los cuadernos, y al anticipar ulteriores pérdidas y dispersiones.

Nada nos permite creer que Leoni tuviera realmente la intención, declarada a Orazio Melzi, de ofrecer a Felipe II los manuscritos de Leonardo. Al parecer sólo le cedió unos pocos, quedándose con los demás, ya que un gran número de ellos pasó a manos de su yerno y heredero Polldoro Caichi, quien se dedicó abiertamente a comerciar con ellos. Hacia 1622, Caichi vendió al Conde Galeazzo Arconati, de Milán, el gran volumen de las artes secretas de Leonardo, compilado por Leoni, y que hoy conocemos con el nombre de Codex Atlanticus. En 1636, Arconati lo donó, junto con otros manuscritos leonardianos, a la Biblioteca Ambrosiana de Milán.

Otra parte de los documentos que poseía Leoni fueron a parar a Inglaterra. Thomas Howard, Conde de Arundel, consiguió adquirir el segundo gran volumen compilado por Leoni, que contenía todos los manuscritos de carácter artístico y que hoy conocemos con el nombre de Colección Windsor por haberse conservado en la Royal Windsor Library.

Thomas Howard adquirió otro manuscrito, el actual Códice Arundel 263, que más tarde fue donado por uno de sus herederos a la Royal Society inglesa. Cabe fechar las adquisiciones de Arundel entre 1630 y 1640.

En el siglo XVIII se produjeron nuevos «movimientos» de manuscritos de Leonardo. Hacia 1715 Lord Leicester adquirió el códice que lleva hoy su nombre y se lo llevó a Inglaterra. El Códice Trivulziano (famoso por la larga lista de palabras registradas por Leonardo) volvió hacia 1750 a la Biblioteca Ambrosiana de la que había sido retirado, después de la primitiva donación, por Arconati. A fines de ese siglo volvieron a entrar en circulación los códices que parecían haber encontrado un paradero definitivo. Napoleón Bonaparte, al entrar victorioso en Milán el 15 de mayo de 1796 y en cumplimiento de las órdenes del Directorio, organizó un saqueo sistemático de obras de arte y de cultura. El Códice Atlántico y los manuscritos de la Ambrosiana figuran entre las obras valiosas que fueron enviadas a París. El códice quedó depositado en la Biblioteca Nacional y los otros manuscritos fueron confiados al Instituto de Francia. Una vez terminada la aventura napoleónica, los gobiernos interesados obtuvieron la restitución de los tesoros que les habían sido arrebatados: el Códice Atlántico volvió a Milán pero el Instituto de Francia conservó los otros manuscritos.

En el siglo XIX las bibliotecas inglesas se enriquecieron con nuevos documentos de Leonardo. En 1876 John Forster donó al South Kensington Museum (que es hoy el Victoria and Albert Museum) tres cuadernos que hoy llevan el nombre del donador. Paralelamente a este noble gesto de generosidad hay un episodio desconcertante. Guglielmo Libri, bibliófilo, erudito y uno de los pioneros de la moderna historiografía científica, se interesó por Leonardo y proyectó incluso publicar todos sus escritos inéditos. Libri que entre otras cosas era conde tenía una curiosa debilidad. Así, no pudo resistir a la tentación de sustraer algunas páginas de los manuscritos mientras los consultaba en el Instituto de Francia. La suya no era la manía del estudioso que se considera único destinatario de los originales de un autor al que dedica todos sus desvelos. No, simplemente Libri tenía un talento particular para comerciar con estas reliquias. Y así fue como algunas páginas de los manuscritos de Leonardo fueron a parar a Inglaterra.

Poco después el pequeño código sobre el vuelo de los pájaros era comprado por 4.000 liras por el Conde Manzoni, quien más tarde lo cedió al ilustre leonardista Teodoro Sabatchnikof. Los responsables del Instituto de Francia sospecharon inmediatamente de Libri, que era la única persona que había tenido libre acceso a los manuscritos parisienses. Libri negó obstinadamente pero las pruebas contra él eran tan abrumadoras que fue condenado en rebeldía a diez años de reclusión. Las hojas que habían pasado a Inglaterra fueron devueltas al Instituto y Sabatchnikof entregó el Código sobre el vuelo de los pájaros a la Biblioteca de Turin, donde se conserva actualmente.

La aventura de los manuscritos leonardianos podría considerarse terminada si últimamente una noticia sensacional no hubiera conmovido al mundo de la cultura. En efecto, en 1967 se anunció oficialmente que en la Biblioteca Nacional de Madrid habían sido descubiertos dos códices de Leonardo que se consideraban perdidos. Pasado el primer momento de estupor surgió la pregunta de cómo habían ido a parar tales manuscritos a Madrid. Y una vez más pudo encontrarse el rastro esclarecedor. Se sabía que una parte del corpus leonardiano de Pompeo Leoni fue vendida en España después de su muerte. Uno de los compradores fue probablemente Juan de Espina, coleccionista madrileño. Entre 1620 y 1630, el Rey Carlos I de Inglaterra, entonces Príncipe de Gales, y luego el florentino Vincenzo Carducci, visitaron las colecciones de Espina, advirtiendo ambos entre los objetos de mayor valor dos libros «escritos y dibujados por el gran Leonardo de Vinci». Espina murió en 1642 legando al rey de España todos sus tesoros, entre ellos los dos libros de Leonardo que entraron a formar parte de la Biblioteca de Palacio cuyos fondos pasarían a constituir hacia 1830 el núcleo esencial de la recién creada Biblioteca Nacional de Madrid. Con toda probabilidad, los códices encontrados en 1967 son los dos manuscritos que pertenecieron a Juan de Espina.

En un catálogo de la Biblioteca Nacional de Madrid impreso en el siglo XIX se lee una referencia a los de Leonardo. Pero ninguno de los especialistas interesados pudo obtener información al respecto, ya que en la signatura indicada no figuraban autógrafos de Leonardo sino un código del De remedis de Petrarca y unas glosas al Digesto de Justiniano. A fines del siglo pasado el bibliófilo florentino Tammazo de Marins trató inútilmente de encontrar los manuscritos. En la Biblioteca Nacional de Madrid se los consideraba perdidos para siempre.

En el siglo XX varios estudiosos se dedicaron por su parte a una búsqueda sistemática y sin resultado. Fue en 1964 cuando el francés André Corbeau, eminente especialista en Leonardo de Vinci, afirmó su convicción de que los dos manuscritos se encontraban en la Biblioteca de Madrid y que sólo se trataba de un error del catálogo. Los responsables de la biblioteca procedieron a nuevas investigaciones. A principios de 1965 don Ramón Paz y Remolar, jefe de la Sección de Manuscritos de la Biblioteca Nacional madrileña, tuvo la inmensa sorpresa de encontrar en sus estantes los dos preciosos códices que en el catálogo figuraban con los números Aa 19 y 20, mientras que las signaturas correctas son Aa 119 y 120. La noticia del hallazgo corrió de boca en boca por los círculos culturales pero no fue confirmada oficialmente hasta 1967. La inmensa contribución de esos manuscritos al estudio de la obra de Leonardo es hoy accesible al lector de lengua española en una reproducción en facsímil publicada por Taurus Ediciones de Madrid con el título de Codex Madrid I y Madrid II.

Finalmente, cabe señalar una Iniciativa cuyos resultados no sería excesivo calificar de nuevo «hallazgo», aunque se trate de un código muy conocido, a saber, el Código Atlántico de la Biblioteca Ambrosiana de Milán. En 1962, por instigación del Cardenal Montini, entonces Arzobispo de Milán y hoy día el Papa Pablo VI, los responsables de la Biblioteca Ambrosiana emprendieron la restauración total del código, para lo cual lo enviaron a los especialistas del convento de Grottaferrata, cerca de Roma. No se trataba de proceder a trabajos de conservación sino más bien de poner remedio, en la medida de lo posible, a las mutilaciones perpetradas por Leoni quien, de la Inmensa masa de escritos y cuadernos de Leonardo, había reunido, de modo bastante arbitrario, lo que a su juicio se refería a la mecánica.

En efecto, el escultor aretino utilizó grandes hojas de un papel blanco bastante grueso (de formato Atlas 65 x 94 cm, de ahí su nombre de Código Atlántico). Las páginas originales de Leonardo eran de dimensiones más pequeñas y a menudo llevaban dibujos y escritos a toda página. Algunas de ellas estaban escritas por una sola cara y frecuentemente no tenían al dorso sino notas o croquis que Leoni consideró desprovistos de interés. Cuando se trataba de hojas que contenían dibujos o textos en ambas caras, los pegaba sobre el papel de soporte dejando en el mismo una abertura o «ventana» para que pudiera verse lo que había al dorso. Por último, en el caso de las páginas de formato mayor, las doblaba en dos, pegaba sobre el papel una de las mitades y abría una ventana para que se viera lo que había escrito en ella. Tal fue el bárbaro tratamiento que Leoni infligió a los manuscritos y que tuvo graves consecuencias: desaparición de un gran número de notas y croquis autógrafos al dorso de las páginas, ocultación de los márgenes de los folios pegados, en los que había escritos y detalles de los dibujos, lamentable pérdida definitiva de las partes que quedaban sueltas en las hojas de formato mayor dobladas por la mitad.

Fueron necesarios diez años de minucioso trabajo de los especialistas de Grottaferrata para que el Código Atlántico recobrar una nueva vida. Se emplearon para ello las técnicas más modernas. Por ejemplo, los originales fueron cuidadosamente «lavados» con sustancias especiales que les aseguran una mejor conservación. El Código Atlántico, totalmente restaurado, tiene ahora 1.068 páginas repartidas en 12 volúmenes encuadernados, y se ha emprendido inmediatamente su publicación en facsímil (como es de Imaginar, queda totalmente descartada la posibilidad de que el original pueda ser objeto de consultas). Han aparecido ya los primeros volúmenes y la Comisión Nacional Vinciana de Italia prosigue su publicación, basada en técnicas sumamente perfeccionadas y confiada a la Editorial Barbera de Florencia.

Así, el siglo XX habrá logrado poner fin al desmembramiento dramático de los manuscritos de Leonardo, restituyendo a la humanidad esos tesoros autógrafos que forman parte de su patrimonio cultural.”

Hasta aquí el texto original de Paolo Galuzzi en 1974 de una gran belleza literaria y rigor científico. Han pasado poco más de 40 años desde la publicación del artículo y lógicamente ha habido avances y nuevos descubrimientos sobre cómo se produjo la dispersión de los manuscritos de Leonardo.

A continuación reproduzco parte del artículo publicado por el PROFESOR Nicolas García Tapia titulado “Ingeniería del agua en los Códices de Leonardo y en los manuscritos españoles del s. XVI” donde se avanza un poco más sobre el discurrir de los manuscritos de Leonardo por España. (GARCIA TAPIA, 1996)

“Vamos a intentar resumir lo que se conoce sobre la historia de los manuscritos de Leonardo en España, aportando nuevos datos por nuestra parte, producto de investigaciones que aún tenemos en curso. (Corbeau, 1964; Reti, 1968; García Tapia, 1995).

Muerto Leonardo da Vinci en 1519, sus pertenencias y escritos pasaron a su discípulo preferido Francesco Melzi quien llevó los códices de su maestro a la villa de Vaprio de Adda, cerca de Milán, donde los conservó cuidadosamente.

Después de la muerte de Francesco Melzi, ocurrida en 1568, su tercer hijo Orazio, que era entonces el jefe de la familia, ignorante del valor y del interés de los libros escritos por Leonardo, los relegó al ático de la villa paterna, a la merced de posibles deterioros y robos. No es sorprendente que el preceptor de los hijos de Melzi, Lelio Gavardi, se apropiase de trece códices de Leonardo que intentó vender a buen precio a Francesco Maria de Medici, Gran Duque de Toscana, aunque no llegó a realizar la operación. Gavardi fue persuadido por su amigo Giovanni Ambrogio Mazenta para que se los diese, a fin de devolver a Orazio Melzi los trece libros robados, según cuenta en sus Memorias el propio Mazenta. Melzino aceptó la devolución de algo que según él le estorbaba, porque tenía "muchos más dibujos de Leonardo abandonados bajo los tejados de su casa".

Ambrogio Mazenta repartió entonces su botín entre sus otros dos hermanos: Guido, el mayor, recibió seis de ellos y Alessandro siete. Estos propagaron lo fácil que era hacerse con estas obras de Leonardo y la voz se corrió entre los avispados cazadores de objetos y manuscritos. Entre ellos sobresalió Pompeo Leoni, escultor áulico de Felipe II. Lo que ocurrió entonces nos interesa especialmente para comprender las causas de la posible relación entre la hidráulica de Leonardo y la de los códices españoles.

Pompeo Leoni y los manuscritos de Leonardo

Pompeo o Pompeyo, como se le llamaba en España, era hijo de Leone Leoni, famoso escultor de origen italiano al servicio de los Austrias españoles, para los que hizo notables obras de arte. Ya Leone tenía un especial interés por la obra de Leonardo y se había hecho con algunas cosas que le habían pertenecido. Pompeo Leoni, que estaba en Milán desde 1582 fundiendo las estatuas de bronce destinadas al retablo de El Escorial, se interesó por los manuscritos de Leonardo.

Según las Memorias de Mazenta, Pompeo Leoni, valiéndose de su calidad de enviado de Felipe II, prometió a Orazio Melzi "cargos, magistratura y puesto en el senado de Milán, si recuperaba los trece libros que había regalado, afín de donárselos al rey Felipe II, muy interesado en semejantes curiosidades".

Después de varias vicisitudes, Pompeo Leoni se hizo con siete de los libros en el año 1589 y con otros tres en 1603, que Orazio Melzi había conseguido que le devolviesen, alentado por las promesas de Leoni. A estos códices hay que añadir otros documentos en número no bien conocido, que, como veremos, también pasaron por las manos de Leoni y que llevó a España desde Milán. (Corbeau, 1964; Reti, 1968).

Llegado a este punto, es preciso aclarar una serie de cuestiones que no han recibido hasta ahora la debida atención por parte de los que se han ocupado de este tema:

En primer lugar, los historiadores destacan la afición coleccionista de Pompeo Leoni, al que atribuyen exclusivamente la responsabilidad de la adquisición de los códices de Leonardo, sin tener en cuenta el papel jugado por Felipe II. Sin embargo, Mazenta dejó bien claro que Leoni actuaba como enviado del rey de España y que los manuscritos eran para el monarca. Era impensable y muy peligroso que alguien se hiciese pasar por comisionado de Felipe II, sin ser cierto y, menos aún, prometer cargos en nombre del rey.

En segundo lugar, Leoni estaba endeudado en ese momento a causa de las estatuas que estaba realizando para El Escorial, que el rey todavía no había pagado, y difícilmente podía comprar unos costosos libros y dibujos de Leonardo.

En tercer lugar, revisando las cartas y otros documentos de Leoni enviados desde Milán sobre la obra del retablo de El Escorial, que se conservan en el Archivo de Simancas, he encontrado la prueba de que Pompeo Leoni actuaba en Milán como algo más que escultor del rey. En efecto, en una carta fechada el 14 de julio de 1589, que coincide con la época en la que Leoni obtiene los primeros libros de Leonardo de mano de Melzi, el escultor de Felipe II escribe por su propia mano:

"... También yo llevo a Su Majestad cosas de mucho valor y quisiera, como el vivir, que llegasen a su poder. Vuestra Merced será servido con el primero encomendarlo muchísimo al embajador de Génova, que tenga gran cuidado que se embarquen con gran consideración y cuidado..."

Se trataba de ocho cajas de las que no se dice el contenido, pero que eran más pequeñas e iban aparte de las grandes con las estatuas para El Escorial. Al contrario de las que iban destinadas a las obras de El Escorial, las misteriosas ocho cajas que Leoni encomendaba "como el vivir", se entregaron directamente al rey.

En cuarto lugar, como les había prometido Leoni, los Melzi recibieron cargos y honores después de la entrega de los manuscritos de Leonardo. En efecto, he podido comprobar en documentos del Archivo de Simancas que, a principios del siglo XVII, los Melzi tenían ya el título de caballeros. A un "caballero Melzi", como se le llama en los documentos, se le nombra teniente de caballería en 1616 con una alta renta, sin tener ningún mérito ni experiencia y al año siguiente abandonó deshonrosamente su puesto para no tener que enfrentarse al enemigo. Es indudable que Pompeo Leoni no tenía poder para nombrar caballeros a los Melzi, pero cumplió su promesa de que Felipe II les daría cargos y honores si entregaban los libros de Leonardo.

En definitiva, parece claro que Pompeo Leoni recogió gran parte de los documentos, dibujos y manuscritos de Leonardo que pertenecían a los Melzi por orden de Felipe II, y fueron enviados luego al propio monarca. Esta operación coincidía en los mismos años con la que se estaba llevando a cabo con los libros y manuscritos que pudieran estar disponibles para enriquecer las bibliotecas reales españolas y sobre todo la de El Escorial.

Por las manos de Pompeo Leoni, pero con destino a Felipe II, pasaron pues la mayoría de los códices de Leonardo. Previamente Leoni numeró los folios, al objeto de ordenar los escritos y los dibujos, llegando en algunos casos a recortar las figuras y pegarlas en forma de álbum. Este asunto fue analizado el historiador francés André Corbeau, uno de los que previno la existencia en

España de los dos códices de Leonardo, que efectivamente aparecieron después en la Biblioteca Nacional de Madrid. Según este investigador:

"... Pompeo Leoni habría poseído también (aparte de los diez ya mencionados) todos los manuscritos de Leonardo que se presentan bajo forma de volúmenes, sólo con la excepción de los manuscritos C y D del Institut de France y del conjunto de hojas que forma el códice A rundel del British Museum. " (Corbeau, 1964). A todos estos manuscritos que tuvo Leoni, hay que añadir otros actualmente desaparecidos que, como dijimos, son más que los que se conservan y que posiblemente también pasaron por las manos de Pompeo Leoni. Según Corbeau, "... treinta y cinco manuscritos de Leonardo da Vinci, poseídos por Pompeo Leoni, pueden contarse en la actualidad como desaparecidos". Con ello podemos tener una idea del importante conjunto de textos y dibujos leonardianos que llegó a adquirir Pompeo Leoni para Felipe II.

García Tapia examinó los inventarios de los libros que poseyó Pompeo Leoni, realizados después de su muerte y conservados en el Archivo de Protocolos de Madrid, y contabilizó en total diez y seis manuscritos de Leonardo. La explicación de esto es sencilla: Felipe II, siguiendo su costumbre, recompensaría a su escultor con una parte del botín conseguido, que son los diez y seis libros que aparecen en el inventario de los bienes de Leoni. El resto iría a parar a las bibliotecas del rey, principalmente a la de El Escorial, salvo algunos que podrían haber sido regalados a otros personajes de la Corte.

No se ha encontrado aún rastros de la existencia de tales libros de Leonardo aunque, dada la imprecisión con la que se hacían los inventarios, no sería de extrañar que estuviesen bajo unos epígrafes generales que no hagan posible su identificación. La pérdida de muchos de estos libros puede deberse a los incendios que han sufrido, tanto la biblioteca de El Escorial, como la del antiguo Alcázar de Madrid. En todo caso, la reciente aparición de los códices leonardianos en la Biblioteca Nacional de Madrid, ha abierto la esperanza de nuevos hallazgos.

La suerte del resto de los manuscritos de Leonardo se conoce algo mejor. Pompeo Leoni murió en el año 1608 y sus hijos legítimos Miguel Ángel y Juan Bautista heredaron sus bienes. La muerte de este último, ocurrida en 1615, abrió un período de litigios entre sus sucesores por la posesión de sus bienes que finalmente ganó en 1621 Polidoro Calchi, casado con una hija de Leoni. A partir de esta fecha comienza la venta y dispersión de los bienes que pertenecieron a Leoni, entre ellos los códices de Leonardo que, por complejos avatares que no vamos a examinar aquí, han pasado a los lugares donde ahora se encuentran. Sin embargo, nos interesa especialmente la suerte de los dos códices de la Biblioteca Nacional de Madrid, para lo que debemos hablar de un enigmático personaje llamado Juan de Espina Velasco.

Juan de Espina y sus códices de Leonardo

Entre los que adquirieron libros de Leonardo estaba un curioso coleccionista llamado Juan de Espina. De este extraño personaje se conocen sólo algunos datos proporcionados por sus coetáneos, entre los que se encuentra el célebre escritor Francisco de Quevedo. Juan de Espina nació antes de finalizar el siglo XVI y Quevedo le llama "caballero montañés de muy conocida calidad", lo que revela un posible origen de hidalgo cántabro. Realizó algunos servicios con las armas, aunque sus aficiones se dirigieron al estudio, singularmente de la música, reuniendo y tocando varios instrumentos. (Cotarelo, 1908).

Aparte de los instrumentos musicales, la fama de los tesoros que Espina guardaba en su casa de la calle San José de Madrid era tan grande, que excitaba la curiosidad de algunos aficionados que deseaban contemplarlos. En su domicilio se guardaban al parecer todo género de objetos extraños recogidos en diversas partes del mundo. Según algunos testigos, mecanismos secretos hacían aparecer barcos que se deslizaban sobre mares de azogue (mercurio), luces que iluminaban misteriosamente las habitaciones de la casa y autómatas que efectuaban los más curiosos movimientos. Juan de Espina se hacía servir la comida a través de tornos para no tener contacto con la servidumbre y la imaginación popular llegaba hasta hablar de robots que estaban a su servicio, incluso de extraños fenómenos y magia negra. Se decía que a Felipe IV, en una audiencia, le dio un considerable susto haciendo aparecer un imaginario león. Quizá por esta fama de mago, Juan de Espina tuvo problemas con la Inquisición de Sevilla.

Dejando aparte algunas descripciones literarias o fantásticas de la casa de Espina, nos detendremos brevemente en la de Viencio Carducho, pintor de origen italiano, que hace una valoración menos fantasiosa de las curiosidades de Juan de la Espina, a pesar de lo cual no puede por menos de concluir que en "muchas de ellas no pude alcanzar a entender del modo que se había obrado; y así admirado, suspendido el juicio, como lo hago de todo lo demás que ví, y lo firmo en Madrid en el dicho día, mes y año (10 de abril de 1628)."

En su libro titulado Diálogos de la pintura, Carducho alaba los dos códices de Leonardo que había visto en casa de Juan de Espina y dice que el príncipe de Gales, durante su estancia en Madrid, los había querido comprar a buen precio, pero que Espina rehusó porque pensaba donarlos al rey a su muerte. En ciertas cartas de Lord Arundel, se relatan también las gestiones, fracasadas, para adquirir y llevar a Inglaterra estos libros de Leonardo en poder de Espina.

Juan de Espina murió en Madrid en la noche del 30 al 31 de diciembre de 1642. En sus últimos momentos se comportó de forma tan original como lo había hecho a lo largo de su vida. Sintiendo próxima la muerte, se dirigió sólo y por su propio pie a la parroquia de San Martín donde pidió el viático e indicó el lugar donde encontrarían sus últimas voluntades. Cuando llegaron a su casa el escribano y los testigos, le encontraron ya muerto, tendido en su cama. En efecto, en su faldriquera, como había dicho, estaban sus disposiciones escritas de su propia mano.

Este documento se encuentra en el Archivo de Protocolos de Madrid. En el Espina escribe, entre otras cosas, que "al Rey Nuestro Señor se ha de llevar la silla grandiosa y todo cuanto está en la cuadra donde está la silla que son muchas cajas, grandes y pequeñas y muchas curiosidades sueltas de gran primor y sabiduría, y es menester grande cuidado para que no las hurten aún las personas de más confianza...".

De nuevo, como con el envío de Leoni a Felipe II, se llevaron al rey, esta vez a Felipe IV, cajas de contenido secreto que no había que tocar. Además de esto, Espina regaló al monarca la riquísima colección de instrumentos de música, sus cuadros, pinturas y dibujos, entre los que quizá se cuenten los de Leonardo, aunque no se especifican.

También lega a otros personajes de la Corte objetos curiosos. Por ejemplo, al marqués de Villanueva del Río le donó una arqueta que perteneció a don Rodrigo Calderón donde tuvo todas sus joyas hasta que le ajusticiaron, y dentro de ella guardaba Espina el cuchillo con el que le degollaron, el Cristo con el que

murió y la venda con la que le taparon los ojos. El resto, la casa y el mobiliario fueron a otras personas e instituciones benéficas y el dinero "para el primer pobre que pasara por la calle".

Se procedió de inmediato al inventario de los bienes de Juan de Espina, documento que se encuentra también en el mismo Archivo de Protocolos. Sin embargo, la lectura de este largo protocolo notarial produce una cierta decepción. Se trata de una descripción fría y tediosa de objetos de uso cotidiano de Juan de Espina y documentos de la subasta del inmueble, sin que se trasluzca de ellos nada que aliente la fantasía que inspiró a sus contemporáneos. Tampoco está el inventario de su biblioteca, ni se hace mención de los códices de Leonardo que poseyó. Sin duda todo ello fue directamente a poder del rey y se incorporó a las ricas colecciones palaciegas.

Es posible, a la vista de lo anterior, que los códices de Leonardo que tenía Juan de Espina y que Vicencio Carducho había visto en su casa, sean los dos que aparecieron recientemente en la Biblioteca Nacional de Madrid. (Reti, 1968). Pero esto no puede afirmarse con seguridad a falta del inventario de la biblioteca de Juan de Espina. También cabe la posibilidad de que se trate de dos de los libros que Leoni había enviado en su día a Felipe II desde Milán.

En todo caso, queda claro que, durante en un cierto tiempo, muchos de los códices de Leonardo estuvieron en España y fueron posiblemente conocidos por ciertos personajes de la Corte española que pudieron consultarlos."

Capítulo 3

Leonardo da Vinci Ser o no ser...INGENIERO

*Son vanas y están plagadas de errores las ciencias
que no han nacido del experimento, madre de toda la certidumbre
(Francis Bacon)*

3.1. Introducción.

Siendo realistas y pragmáticos analizar pormenorizadamente y en su totalidad, la obra manuscrita de Leonardo, desde un punto de vista ingenieril sobrepasa con creces el contenido de cualquier tesis doctoral. Pero si se puede tener una visión acertada y actual recopilando lo esencial de aquellos especialistas leonardistas que han dedicado su vida y su obra a tal menester.

Hemos creído conveniente, que para entender a Leonardo como Ingeniero, teníamos que hacer un repaso de la historia y analizar la Ingeniería desde el principio de los tiempos, su evolución y el papel que juega hoy en día. Evidentemente estaríamos hablando de nuevo de otra tesis doctoral. Libros y artículos de historia de la ciencia, de la técnica y de la tecnología que tratan la Ingeniería, nos los encontramos por cientos. Sin embargo, investigando sobre el tema, tuvimos la suerte de leer una serie de artículos sobre Ingeniería publicados por la Fundación El Monte de Sevilla en 2006 y dirigido por el profesor Javier Aracil sobre un curso realizado en la ETSI de la Universidad de Sevilla, del 19 al 22 de octubre de 2004, titulado “*Ingeniería y pensamiento*”.

La lectura de dichos artículos nos cautivó profundamente y nos sentimos muy identificados con todo lo publicado. (ARACIL, ORTEGA, CERDÁ, BRONCANO, MONTAÑÉS, FERREIRÓS y GARCÍA, 2006). De todos los artículos publicados hemos querido destacar dos de ellos: la presentación magistral que hace Javier Aracil y que lleva por título “*Ingeniería y pensamiento*” (igual que el Curso) y el artículo de José Ferreirós titulado “*La ingeniería, motor de conocimientos científicos*”.

En el primero de ellos “*Ingeniería y pensamiento*” que reproducimos en el apartado 3.2 del presente capítulo, Javier Aracil hace un repaso magistral de la historia de la ingeniería, pasando por Arquímedes, Aristóteles y comentando los orígenes del ingeniero actual, repasando lo que supuso la ingeniería en la Ilustración hasta llegar a la fundación de las primeras Escuelas de ingeniería en España. Con dicho artículo cumplimos el objetivo de ofrecer una visión de la génesis de la ingeniería hasta nuestros días.

En el segundo artículo “*La ingeniería, motor de conocimientos científicos*” que reproducimos en el apartado 3.3 del presente capítulo, José Ferreirós reflexiona sobre la naturaleza de la ingeniería y de la ciencia que no siempre han ido de la mano, comenta los

acontecimientos históricos acontecidos que han marcado las pautas de ambas (ciencia e ingeniería) y comenta el desarrollo tan espectacular que se ha producido en los últimos 300 años gracias a su estrecha colaboración. Con dicho artículo cumplimos el objetivo de mostrar que el matrimonio entre ciencia e ingeniería a lo largo de la historia y por supuesto en la actualidad, es simbiótico y que ha conseguido sus frutos en algunos casos llamados “principios o leyes” y en otros casos como “hitos tecnológicos”.

Llegados a este punto cualquier lector no familiarizado con el tema podrá tener una visión más acertada sobre la figura de los ingenieros en el pasado y en el presente, y el papel que le ha tocado jugar a lo largo de la historia como “creador” o “diseñador” de bienes tangibles (invenciones o construcciones) que aprovechando las tecnologías disponibles en cada época y en cada momento, tan sólo han pretendido facilitar la labor humana.

En el apartado 3.4. del capítulo nos centrarnos en los que nos ocupa, Leonardo como Ingeniero, pero contextualizándolo en el Renacimiento. Es por ello que nos ha parecido conveniente publicar un artículo en el que Nicole Schuster hace un análisis y resumen del clásico libro “*Los ingenieros del Renacimiento*” de Bertran Gille, publicado en francés (GILLE, 1978). Donde nos hacemos una composición de lugar del quehacer de los Ingenieros del Renacimiento en la Italia de Leonardo. Estudió a Filippo Brunelleschi, Taccola, León Battista Alberti, Roberto Vegecio, Francesco di Giorgio Martini, y por supuesto a Leonardo da Vinci, prestándole gran atención. Las críticas que en parte realiza Bertran Gille sobre Leonardo, justificadas o sin fundamento, es precisamente una de las motivaciones que nos ha llevado a realizar la presente tesis doctoral, para tratar de corroborarlas o rebatirlas, tal y como comentamos en los antecedentes del capítulo 1.

El último apartado está dedicado exclusivamente a investigar entre los manuscritos de Leonardo las bases científicas de sus conocimientos ingenieriles. Nos ha sido de gran ayuda entre la enorme cantidad de bibliografía consultada dos libros publicados en inglés por Fritjof Capra en 2007 y 2013: *The Science of Leonardo. Inside the mind of the great genius of the renaissance* y *Learning from Leonardo*.

3.2. Ingeniería y pensamiento.

A continuación reproduzco íntegramente el artículo del Javier Aracil, profesor de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, titulado “*Ingeniería y pensamiento*”:

Las historias de la civilización y de la técnica se encuentran profundamente entrelazadas y son indisociables la una de la otra. El propio proceso de hominización, de transición de los primates superiores a los homínidos, es inseparable de la aparición de la técnica. Con ella el hombre deja de adaptarse pacientemente a la naturaleza, para tomar conciencia de que puede predecir su comportamiento y reconducirla en su beneficio. El hombre lo es en tanto que es técnico. El mundo actual con su radical componente de artificialidad es producto acumulativo de la actuación técnica. Las formas superiores de la técnica han dado lugar a la ingeniería.

Sin embargo tanto la técnica, desde la antigüedad, como la ingeniería en tiempos modernos, no han gozado de la correspondiente apreciación intelectual. La técnica no ha sido, en general, objeto de una especial atracción por los pensadores; e incluso a veces se cuestiona que sea una forma de conocimiento. Cuando se han ocupado de ella, las más de las veces, lo han hecho por su repercusiones sociales; casi nunca lo han hecho considerándola como una forma esencial, peculiar y radical

del quehacer humano (hay excepciones, luego recordaremos algunas). Así, es notorio que la técnica ha sufrido una tradicional minusvaloración a lo largo de la historia. En tiempos antiguos la labor de los artesanos, de los que trabajaban con sus manos, era considerada propia de las clases serviles mientras que los hombres libres (liberados, entre otras cosas, del trabajo manual) se dedicaban a la especulación filosófica o política. En algunos casos puede que dedicasen algún esfuerzo a resolver problemas prácticos, pero siempre considerándolos como de rango inferior a los puramente especulativos. No olvidemos que, en tiempos casi recientes, el propio Velázquez, con toda su asentada reputación en la Corte, dedicó denodados esfuerzos a que la labor de pintor, en cuya ejecución intervienen de forma esencial las manos, fuese considerada como un arte liberal. Si esto sucedía en lo que se refiere a las bellas artes, en el dominio de las técnicas mecánicas resultaba considerablemente acentuado. Y aun en nuestros días la ingeniería, pese a su atractivo debido a la relevancia social de sus productos, no ha sido objeto de la atención intelectual que sin duda merece por su participación en el surgimiento del mundo artificial en el que se desenvuelve nuestra vida.

En el libro del filósofo americano Daniel C. Dennett La peligrosa idea de Darwin leemos: “la ingeniería ha tenido siempre un estatus de segunda clase en el mundo intelectual [...] Las huellas fósiles de esta actitud negativa se encuentran por doquier en nuestra cultura. Por ejemplo, en mi propia disciplina, la filosofía, la subdisciplina conocida como filosofía de las ciencias tiene una historia larga y respetable; muchos de los filósofos más eminentes e influyentes de la actualidad son filósofos de la ciencia. Hay excelentes filósofos de la física, de la biología, de las matemáticas e incluso de las ciencias sociales. Pero nunca he oído hablar de nadie en el campo de la filosofía que se dedicara a la filosofía de la ingeniería, como si no hubiera bastante materia en este campo, de interés conceptual, para que un filósofo se especializara en ella. Aunque esta actitud está cambiando, cada día más y más filósofos reconocen que la ingeniería acoge en su seno algunos de los pensamientos más profundos, más bellos y más importantes nunca desarrollados”.

La radical postura de Dennett requiere algunas matizaciones. Si, en efecto, no es frecuente encontrarse con cultivadores de la filosofía de la ingeniería sí es posible hacerlo con filósofos que incluyen la técnica entre sus principales preocupaciones, aunque sea en un número muy inferior al de filósofos de la ciencia; y no se olvide que la ingeniería es la forma suprema de hacer técnica. Por ejemplo, Fernando Savater en El valor de elegir dice que “la técnica es nuestra empresa más definitivamente humana”. Un poco más adelante se lee “la técnica [...] configura la relación polémica específicamente humana entre ‘libertad’ y ‘destino’”. Para acabar con “la técnica ofrece [...] un conjunto de prótesis libremente elegidas e inventadas para resistirse al menos parcialmente a nuestro destino”. Estas prótesis forman el mundo artificial en el que hoy se desenvuelve nuestra vida y del que nosotros mismos somos componentes significados.

El curso que motivó este libro ha pretendido contribuir a superar esta situación facilitando, por una parte, la relación entre ingenieros y filósofos y, por otra, sembrando entre los estudiantes de ingeniería en particular, pero de otras ramas también, la semilla de inquietud con respecto a estas cuestiones.

Lo natural y lo artificial.

Vivimos en un mundo artificial en el que prácticamente en todo lo que nos rodea hay el rastro de alguna intervención humana. No sólo en el entorno más inmediato de una villa urbana, en donde todo lo que se ve, incluidos los verdes jardines, es el resultado de una actuación humana precedida de un acto de concepción de lo que una vez producido será un artefacto o artificio, un poblador del mundo artificial, sino incluso si nos desplazamos a un monte, y hasta a una reserva ecológica, será difícil, si no imposible, encontrar algo en dónde no aparezcan rastros de alguna forma de ingerencia humana, aunque sea no deseada.

Nosotros mismos somos seres artificiales. Sobrevivimos a muchas enfermedades (ante las que lo “natural” sería que sucumbiésemos si su gravedad lo determinase) y alcanzamos una edad, en promedio, impensable para nuestros antepasados. Nuestra propia calidad de vida depende en gran medida de los fármacos que alivian nuestras dolencias. Nuestra alimentación está basada en productos mayoritariamente artificiales. Tanto los cereales, que forman la base de nuestra alimentación, como los animales que nos aportan proteínas (con la posible excepción de algunos productos del mar que forman una fracción muy pequeña de nuestra alimentación) son el resultado de una selección artificial llevada a cabo por los seres humanos. Mediante esta selección han sobrevivido aquellos individuos más productivos para nuestra especie y no aquellos mejor adaptados para perpetuarse en la naturaleza, como había sucedido a lo largo de toda la evolución biológica.

La distinción entre lo natural y lo artificial es cuestión largamente debatida. Resultan relevantes, al respecto, las matizaciones introducidas por John Stuart Mill (1806-1873) en la primera parte de su obra póstuma sobre La Naturaleza⁴. Distingue Mill dos usos corrientes de este término. El primero es el que empleamos cuando nos referimos a la naturaleza de tal o cual cosa. En tal caso nos referimos a la esencia y propiedades características de esa cosa; a su capacidad de producir determinados fenómenos. Por el contrario, hay otro uso según el cual la naturaleza es aquello que no ha sido objeto de modificación o intervención por el hombre. En este sentido técnica y arte se oponen a naturaleza; lo mismo que artificial a natural. Lo artificial no es sino la realidad creada intencionadamente por el hombre mediante su capacidad para planificar y transformar, ejercitando su inherente libertad y su razón productora.

Mill continúa su digresión recordándonos cómo la imitación de la naturaleza, en el segundo de los sentidos, es considerada por algunos como fuente de legitimación moral. En tal sentido la transformación de la naturaleza sería una trasgresión culposa que estaría en el origen de muchos de los males que nos afligen. Sin embargo, hay pocas cosas más humanas que tratar de alterar, pretendidamente mejorándolo hasta donde sea posible, el orden natural. Qué se entienda por mejorarlo es cuestión más debatible. De momento conviene solamente invocar que sin esa alteración no sería posible que sobre el planeta Tierra hubiese más de seis mil millones de seres humanos (sin olvidar, claro está, que algunos de ellos se desenvuelven en condiciones precarias pero sin negar la patente calidad de vida alcanzada por otra fracción al menos comparable a la primera). Así, cuando analizamos el contraste entre lo natural y lo artificial, acaso la más radical de las preguntas que podemos hacernos

es: ¿es “natural” que vivan en el planeta tierra más de seis mil millones de nuestros congéneres? Esta es una pregunta inevitable cuando se valora críticamente lo artificial frente a un supuesto mundo idílico natural.

Ciencia e ingeniería en Arquímedes.

Una muestra primigenia de lo que luego será la contumaz preterición de la técnica con relación al pensamiento especulativo la tenemos en la figura de Arquímedes (h. 287 a.C., 212 a.C.) o al menos en la que nos transmite la historia corrientemente aceptada. De acuerdo con ella Arquímedes, en cuya obra se combinan realizaciones de ingeniería con aportaciones a la matemática e incluso a la física, preferiría claramente estas últimas con respecto a las primeras, a las que consideraría como actividades que, por su carácter aplicado, tenían un rango utilitario y, por tanto, inferior a lo inmaculado de las matemáticas especulativas, con toda la pureza de lo incontaminado por el ejercicio de una actividad mecánica. Esta división que asigna al hombre libre las artes liberales de la especulación matemática y filosófica, mientras que las artes mecánicas son propias de las clases serviles, es una muestra de una actitud que, con altibajos, persiste a lo largo de la historia y cuyos últimos rescoldos no es difícil encontrar aún en nuestros días.

Pero sucede que Arquímedes, al que cierta historiografía muestra como figura precursora y emblemática de esa dicotomía, fue un gran ingeniero, posiblemente el más grande del mundo griego y aun de la antigüedad. Sucede también, además, que existe la presunción de que sus trabajos científicos siguieron a sus realizaciones técnicas y fueron motivados precisamente por la solución de éstas. Arquímedes, al que se considera el padre de la estática, la dinámica y la hidrostática, realiza en su obra una síntesis entre geometría y mecánica. Consigue resolver problemas geométricos mediante consideraciones mecánicas, que constituyen para él una fuente de intuición geométrica. Así, a partir de problemas mecánicos concretos, estudiados con rigor, se alcanzan resultados de validez general, que los trascienden. Al resolver un problema concreto se piensa que en esa solución está el germen de soluciones a problemas semejantes. Se procede entonces a generalizar ese método para lo que se abstraen sus aspectos más significativos y se plantea la solución a un nivel abstracto. De este modo puede considerarse que Arquímedes, partiendo de lo concreto, alcanzó enunciados generales. La transición de lo concreto a lo abstracto es el primer paso que conduce a la ciencia. Y este paso se dio por Arquímedes y otros coetáneos, al menos en un sentido muy cercano a cómo entendemos la ciencia hoy en día.

Como sucede con gran parte de las figuras clásicas del mundo griego, las noticias que tenemos de Arquímedes son, o bien a través de versiones y traducciones, con añadidos, de sus obras o bien por referencias, muy de segunda mano (la fuente biográfica principal es la obra de Plutarco (46-120), escrita trescientos años después de fallecido aquél) por lo que su figura aparece revestida de interpretaciones y conjeturas. Por eso cabe preguntarse si compartía el desdén por la técnica, por los artilugios mecánicos, como pretende la versión corrientemente aceptada o si por el contrario era un mecánico, un ingeniero, que generalizaba y al hacerlo se veía abocado a hacer ciencia. En todo

caso, la sobrevaloración de lo especulativo y teórico sobre lo manual y práctico estaba llamada a sobrevolar la historia de la civilización.

Aristóteles y la técnica.

La obra de Aristóteles (384-322 a.C.) es un compendio del saber de la antigüedad griega. Su vasta obra permite encontrar citas apropiadas para un gran número de tesis. Aquí vamos a aludir a una de la Ética a Nicómaco que resulta pertinente al argumento que estamos desarrollando.

Las formas de saber que postula Aristóteles en la mencionada referencia son tres: el contemplativo, el práctico y el productivo. El contemplativo se refiere al saber especulativo propio de la matemática y de la filosofía. El práctico afecta a las formas de las relaciones humanas en el seno de una comunidad social; postula como comportarse y cómo regular la convivencia en su seno. Por último, el saber productivo se refiere a la producción de cosas, a hacer aquello que previamente no existía. En el texto mencionado se lee: “Toda técnica versa sobre el llegar a ser, y sobre el idear y considerar cómo puede producirse o llegar a ser algo de lo que es susceptible tanto de ser como de no ser y cuyo principio está en el que lo produce y no en lo producido”⁵. Esta cita tradicionalmente se ha considerado referida al mundo del arte (en el sentido de las bellas artes) pero resulta sorprendentemente adecuada para asociarla con el mundo de la técnica (al fin y al cabo arte y técnica tienen raíces etimológicas comunes, una del latín y otra del griego). El técnico, lo mismo que el artista, en sus formas de actuación superiores “crea” algo que previamente no existía; enriquece la realidad con los productos de su ingenio; multiplica el mundo natural con “cosas” previamente inexistentes (sea una pintura rupestre o un objeto de cerámica). La cita anterior, aunque un poco larga, es digna de figurar en el blasón del ingeniero moderno empeñado en construir un mundo artificial poblado de seres artificiales (especies alimenticias, edificios, máquinas,...) de los que la naturaleza no nos había provisto espontáneamente.

No obstante, la propuesta clasificatoria de Aristóteles de tres formas de saber, no parece haber encontrado suficiente respaldo a lo largo de la historia. El saber productivo ha sido objeto de una clara postergación frente a los otros dos. Sin embargo, hoy en día, cuando nuestra inmersión en lo artificial desborda toda evidencia parece necesario reelaborar el estatus epistemológico y ético de esa ciencia de lo productivo o de lo artificial tradicionalmente postergada: el saber productivo reivindica su posición en el abanico de los saberes. La mera consideración de la técnica como un saber instrumental, de medios para alcanzar determinados objetivos, es insuficiente para afrontar los complejos problemas de un mundo en el que lo artificial es dominante.

Los orígenes de los ingenieros.

La historia de la ingeniería resulta un tanto insólita, especialmente si se la compara con otras profesiones semejantes, como la medicina. Aunque la técnica marca los albores de la humanidad, sin embargo la profesión de ingeniero es relativamente reciente. Incluso en la más remota antigüedad encontramos formas de ingeniería muy laboradas que requieren el concurso del esfuerzo coordinado de un número considerable de participantes que llevan a cabo un proyecto

complejo que había sido concebido previamente por alguien dotado para ello. Una muestra de ello la tenemos, por ejemplo, en los dólmenes. Posteriormente, ya en período histórico, los restos arquitectónicos del mundo babilónico y egipcio ponen de manifiesto la existencia de formas de ingeniería considerablemente elaboradas. En el mundo griego la figura del ingeniero carece de autonomía (ya hemos recordado el caso de Arquímedes) y en el romano, aunque florecen valiosas obras públicas, no aparece desligado de la de arquitecto. Hemos de remontarnos a finales de la Edad Media, o más concretamente al Renacimiento, para encontrar figuras de ingenieros, ya con esa denominación, y con rasgos precursores de los que muestran los actuales.

Una figura característica del ingeniero renacentista es la de Leonardo da Vinci (1452-1519), más conocido por sus creaciones artísticas, pero que puso al servicio de las principales familias italianas de la época (los Medici, los Sforza, y los Borgia) su inagotable ingenio para la concepción de máquinas y artificios con los más diversos fines, sin excluir los militares. Es notable que la imaginación creativa de Leonardo no encontrase un sustrato de lo que hoy conocemos como conocimiento científico de los fenómenos naturales que le permitiese canalizar sus inventos de forma efectiva. Es un ejemplo histórico de, por una parte, la autonomía creativa del ingeniero pero, por otra, de la dependencia de sus concepciones de las leyes que regulan el comportamiento de los elementos componentes de sus proyectos, que establece cauces y límites ineludibles a esa capacidad creativa.

En España, el reinado de Felipe II es una época floreciente de la ingeniería. Dos muestras significativas de ese período son el artificio de Juanelo Turriano, para elevar el agua del Tajo a Toledo, y la presa de Tibi (Alicante). Otro hecho destacable es la creación de la Real Academia Matemática, a instancias del propio rey, y dirigida por Juan Herrera, quien además de arquitecto se consideraba ingeniero. Es significativo que este centro dedicado fundacionalmente a la formación de ingenieros, cosmógrafos y otros especialistas en artes aplicadas y mecánicas se hiciera al margen de la universidad, ajena a este tipo de inquietudes.

La época a la que estamos refiriéndonos culmina con un siglo especialmente interesante para la génesis del mundo moderno: el XVII. En él nos encontramos con la emblemática figura de Galileo Galilei (1564-1642) cuya obra constituye uno de los hitos en la aparición de la ciencia moderna. Cuando se enaltece la significación de su figura resulta inevitable recordar el primer párrafo de sus Discorsi en el que Salviati (es decir, el propio Galileo) resalta la relevancia de la actividad de los artesanos para inspirar los modos de pensamiento de los filósofos (los filósofos naturales que luego, en el XIX, pasarán a denominarse científicos). Efectivamente, en la obra de Galileo es posible encontrar un trasvase de métodos de la técnica a la filosofía natural, de la asimilación por los sabios de los procedimientos asentados entre los artesanos que construían, entre otras cosas, embarcaciones o edificios (proyectar, medir, calcular, ...). Aun a costa de una cierta simplificación se puede decir que Galileo personaliza, para el mundo moderno, la genial intuición de adoptar procedimientos acreditados en el dominio de la técnica al ámbito del pensamiento científico.

En el XVII aparecen también otros dos autores René Descartes (1596-1650) y Francis Bacon (1561-1626) que, cada uno con sus peculiaridades, prefiguran el papel de la técnica y la ciencia en el mundo moderno. En uno cabe ver los orígenes del racionalismo francés y en el otro los del empirismo inglés. Ambos vuelven su mirada hacia los mundos de la técnica y de la ciencia tratando de fundirlos en una fecunda síntesis, que tiene gran influencia en la aparición de la ciencia moderna.

Parece imponerse una divisa: sabiendo podemos hacer. Y efectivamente ese propósito, en aquellos tiempos, era profundamente innovador. Sin embargo llevaba implícito un peligro: que el hacer se subordinase al saber. Y aunque presumiblemente no fuese esa la intención ni de Descartes ni de Bacon es, sin embargo, lo que acabó aparentemente sucediendo en los siglos posteriores.

Para finalizar este apartado es conveniente dejar sentada la componente militar en el origen de los ingenieros. En ella cabe ver alguna de las características de los ingenieros actuales, como su acusado sentido de la organización y de la disciplina, pero también, en una capa más profunda de su personalidad, el ser hombres de acción que serán juzgados por el éxito con el que alcancen el objetivo que se (o les) impongan: el resolver un determinado problema. Esto les diferencia, ya en sus orígenes, de los científicos convencionales cuyas motivaciones más filosóficas (en el sentido tradicional de esta disciplina) les llevan a interesarse fundamentalmente por el conocimiento profundo de las cosas y consecuentemente con lo que se esconde tras ese término tan esquivo como es el de verdad (lo que no es poca ambición).

Los ingenieros y la Ilustración.

La importancia del Renacimiento en la configuración de la ingeniería moderna está fuera de toda duda, pero sin embargo es en la Ilustración dónde se fraguan los modernos ingenieros. La Ilustración es una época especialmente esplendorosa para la génesis del mundo moderno, en la que adquieren carta de naturaleza los valores que lo definen. Es un movimiento aparentemente minoritario que genera una profunda renovación de los valores sobre los que se sustenta el pensamiento y la sociedad. Posiblemente la divisa que mejor la define sea la debida al filósofo alemán Immanuel Kant (1724-1804): sapere aude, atrévete a saber, ten el valor de servirte de tu propio entendimiento y prescinde del principio de autoridad para formular tu conocimiento de las cosas y tu actitud ante la vida. Una de las ideas centrales de la Ilustración es que la causa principal de la miseria, la opresión y la injusticia se encuentra en la ignorancia. El movimiento ilustrado condujo al ideal de la modernidad basado en el triunfo de la razón, la eclosión del sujeto, la libertad intelectual y el progreso.

Para llevar a cabo el programa ilustrado se requerían, entre otras cosas, funcionarios especialmente preparados para la magnitud del empeño. Entre ellos juegan un papel particularmente relevante los ingenieros. Para su formación, se crean en toda la Europa continental centros específicos: las escuelas de ingenieros. Como ya sucediera en el reinado de Felipe II, la universidad permanece ajena a estas necesidades sociales y es la iniciativa de los poderes públicos, en este caso ilustrados,

la que tiene que suplirla. En la creación de escuelas de ingenieros cobra un especial protagonismo el modelo francés.

Este modelo se origina en los centros de formación de ingenieros militares que habían tenido su germen en la segunda mitad del siglo XVII. Estos ingenieros incluían entre sus labores el diseño de fortificaciones, vías de transporte y avituallamiento, y puentes por lo que resultaban especialmente adecuados para otro tipo de obras públicas. Así surge, a mediados del siglo XVIII, entre otras muchas, pero con especial relevancia, la École des ponts et chaussées creada por Jean-Rodolphe Perronet (1708-1794). En esta Escuela es notable que la formación artística ocupase un lugar primordial, como era tradición desde el Renacimiento.

El segundo gran hito en la formación de ingenieros en Francia se da durante la Convención cuando se crea la École polytechnique en 1794. Los detalles y el significado de esta creación se analizan en el capítulo debido a Javier Ordóñez. En todo caso hay que reseñar que a esta creación subyace la pretensión de que el ingeniero desplace su centro de gravedad del arte a la ciencia. La formación científica pasa a tener un papel substancial en la formación de los ingenieros.

Como en tantas otras cosas, Inglaterra sigue una ruta diferente al resto del continente. Allí, de hecho, la Revolución industrial se inicia prematuramente y es la iniciativa privada y no las Manufacturas Reales (como sucede en la Europa continental, especialmente en la que sigue el modelo francés) la impulsora del proceso industrializador. Una figura especialmente relevante es la de John Smeaton (1724-1792) quien se inició como artesano relojero, produciendo aparatos astronómicos, lo que le llevó a familiarizarse con la física de Newton y a tratar de aplicarla al proyecto de máquinas. Podemos ver en la obra de Smeaton un movimiento, en algún sentido, opuesto al de Galileo, más arriba recordado. Preconiza emplear los métodos de Newton (quien, por cierto, no parece que sintió gran simpatía por la técnica) para el cálculo de máquinas, especialmente hidráulicas. Smeaton fue el creador de la Society of Civil Engineers en 1771.

Como ya hemos indicado, los primeros ingenieros fueron militares. Por ejemplo, en Sevilla, una de sus realizaciones emblemáticas es la Fábrica de Tabacos cuya arquitectura clasicista choca frontalmente con el barroquismo de los arquitectos coetáneos, aunque estos también participaron en el proyecto. Aunque no sean propiamente ingenieros, en sentido estricto, en esta época cabe destacar también las figuras de los marinos Jorge Juan y Santacilla (1713-1773) y Antonio de Ulloa (1716-1795), parte de cuya obra se desarrolló en San Fernando (Cádiz). Los dos participaron en la expedición a Perú para la medida de meridiano. En su obra se encuentran profundamente entrelazados tanto lo propiamente científico como lo técnico. El primero es autor de Examen marítimo⁶, un libro clásico de ingeniería naval, que fue traducido al inglés, francés e italiano.

La transición de la ingeniería militar a la civil se produce durante el último cuarto de siglo, y en ella destaca la figura del tinerfeño Agustín de Betancourt (1758-1824) que dirigió a un grupo de becarios españoles que se formaron en París, en la mencionada École des ponts et chaussées, enviados por el Conde de Floridablanca (1728-1808), primer secretario

de Estado, para estudiar en esa Escuela con el fin de crear luego en España otra a imagen y semejanza de aquella. Trabajó en casi todos los dominios de la ingeniería. Visitó Londres y Birmingham en 1788 para estudiar la máquina de Watt de doble efecto, cuyo fundamento y operación fue capaz de descifrar al verla funcionar y difundió posteriormente por Europa, desvelando el secreto tan celosamente guardado por Watt y Boulton. Proyectó el telégrafo óptico Madrid-Cádiz. Dirigió en Aranjuez, ante la Corte el vuelo de un globo (se conserva en el Museo del Prado un cuadro de Antonio Carnicero reproduciendo la efemérides). Creó y dirigió el Real Gabinete de Máquinas, con planos y maquetas de todos los procesos y máquinas que había reunido con su equipo en sus viajes por Europa. Es el primer centro moderno de difusión de la ingeniería que se crea en España. Se exilió a Rusia cuando consideró que el ideario de la Revolución francesa estaba llamado a la derrota y allí se convirtió en un alto funcionario del zar reformador e ilustrado Alejandro I.

Otra figura notable es la del malagueño Juan López de Peñalver, perteneciente al grupo que se formó con Betancourt en París. Redactó, entre otras muchas cosas, el catálogo del Real Gabinete de Máquinas en el que se reunió todo el material coleccionado por el grupo de Betancourt en su estancia en París y con el que se propició la introducción de esos métodos en España. Es autor también de un estudio sobre la evolución del precio del trigo que se considera precursor de la moderna economía matemática. Pero, sobre todo, es una figura señera de la génesis de la industrialización española, al menos por lo que se refiere a su impulso y promoción desde la administración pública.

A la Ilustración sigue un siglo de grandes convulsiones, que abre la puerta al mundo moderno: el XIX. Es el siglo en el que la componente racionalista de la Ilustración alcanza gran difusión y la ciencia se instituye como la religión oficial llamada a eliminar los males tradicionales de la Humanidad. Tanto la medicina como la ingeniería invocan sus raíces en la ciencia, que pasa a ocupar un lugar preeminente en la formación de los futuros médicos e ingenieros. Es una época sobre la que resulta muy difícil resumir en unos rápidos apuntes sus múltiples manifestaciones, entre las que es inevitable referirse al resultado de la penosa transición, en los países más desarrollados, de un mundo rural a otro industrial y moderno (algunos países, como el nuestro, vivirían esa transición en el siglo XX y otros muchos o la están viviendo ahora o no la han vivido aún). Es un siglo en el que se entrecruzan la utopía y la invención, las dos como propuestas emancipadoras. Aunque la idea de progreso aparece implícitamente en el Renacimiento, se hace explícita, tal como hoy la entendemos, en esta época en la que, además, se difunde la fe en él –pues de eso se trata a priori, de una fe, aunque a posteriori se encuentre soportada por la evidencia de factores objetivos como es la mayor longevidad y calidad de vida de las poblaciones que lo alcanzan–. Esta fe estaba llamada a tener una crucial importancia en la aparición de la modernidad. En todas estas cuestiones tuvieron una importancia capital los nacientes ingenieros, que a su vez se convirtieron en paladines de la propagación de esa nueva fe.

Las Escuelas de ingenieros en España.

En 1802 se fundó la primera Escuela de Caminos, con sede en el Palacio del Buen Retiro y que funcionó hasta mayo de 1808. La Guerra de la Independencia (la primera guerra civil española del XIX) frustra el proyecto. Algunos de sus profesores se exilian y en particular Betancourt emigra a Rusia, como se ha dicho anteriormente. Después de algunas vicisitudes la Escuela se recrea definitivamente en 1835 y pervive hasta la actualidad. Años antes, en 1777, Carlos III encomendó a Enrique Cristóbal Storr, director de las Minas de Almadén, la organización de las enseñanzas de minería, en las que cabe ver los orígenes de los actuales ingenieros de minas. En 1835 la Escuela adquiere un perfil plenamente moderno y se traslada a Madrid.

Entre las inquietudes de los ilustrados se encontraba el fomento de la agricultura. Para ello se dotaron a finales del XVIII una serie de cátedras de agricultura. En 1855 se crea la Escuela Central de Agricultura en Aranjuez, que en 1869 se traslada a Madrid convirtiéndose en la Escuela General de Agricultura en la que se impartió el título de ingeniero agrónomo. La Escuela de Montes se creó por Bernardo de la Torre Rojas (1792-1875) en 1848 y con ella el título de ingeniero de montes. Es notable que los ingenieros de montes son, en cierta forma, precursores de los modernos movimientos de defensa del medio ambiente al promover la conservación de los montes frente a las pretensiones de convertirlos en zonas agrarias o en pastos, o de acabar con ellos para extraer su madera.

En 1850 se crea el título de ingeniero industrial para cuya colación se instituye el Real Instituto Industrial de Madrid y Escuelas Industriales en Barcelona, Sevilla y Vergara. Solamente en el Real Instituto se imparte el título de ingeniero superior, correspondiendo a las otras Escuelas un primer ciclo que permitía, aparte de un cierto ejercicio profesional, el acceso al Real Instituto de Madrid. En 1857 esas Escuelas, junto con las creadas en Valencia y Gijón, se convierten en Escuela Industriales Superiores facultadas todas ellas para colacionar el título de ingeniero industrial. Sin embargo, la experiencia de estas Escuelas resultó fallida y excepto la de Barcelona se clausuraron entre 1866 y 1867. Posteriormente, a principios del siglo XX, se reabren la de Bilbao y la de Madrid.

Los ingenieros navales conservan su carácter militar hasta 1933 en que se convierten en civiles al ser trasladada la Escuela correspondiente desde El Ferrol a Madrid. A mediados del siglo XIX se organiza el cuerpo de telégrafos, de carácter militar, que en 1913 desemboca en la Escuela General de Telegrafía que, pocos años después, en 1920 pasa a denominarse Escuela Superior de Telegrafía en la que empieza a impartirse el título de ingeniero de telecomunicación. Por último, en 1928 se crea la Escuela Superior de Aerotecnia, de carácter militar, que en 1949 se transforma en la Escuela Especial de Ingenieros Aeronáuticos.

Los ingenieros, en sus distintas especialidades, son paladines del progreso a lo largo del XIX y, en no pocos casos, de la regeneración nacional de España.

En cierto sentido, son los herederos del espíritu de la Ilustración. Al menos en una de sus líneas más pragmática y constructiva.

Es curioso reseñar que cuando se crea la Real Academia de Ciencias en Madrid, en 1847, la minoría mayoritaria está formada por ingenieros, y si se suman ingenieros y militares son mayoría absoluta. Las facultades de ciencias no se crean en España hasta la ley Moyano en 1857, como una secesión de las facultades de filosofía. A su creación no es ajena la necesidad de formación científica básica de los ingenieros. El color de su traje académico, azul turquí, recuerda este origen (las facultades de Filosofía y Letras lo tienen azul celeste).

3.3. La ingeniería, motor de conocimientos científicos.

Reproducimos a continuación el artículo de José Luis Montañés, profesor de la Universidad Politécnica de Madrid.

*Cada vez más frecuentemente se oyen voces críticas relativas a la actividad de la ingeniería. Incluso estas voces alcanzan al propio conocimiento científico tanto desde un punto de vista epistemológico como desde un punto de vista social, sustituyéndolo por misticismo e irracionalidad. Sokal y Bricmont, en su excelente *Imposturas Intelectuales* critican esta postura pseudointelectual, fruto del talante de la época, que se conoce como postmodernismo. Estos autores argumentan que en una sociedad desanimada, como la actual, la ciencia despierta antipatía y resulta un blanco fácil por su vinculación al poder establecido. En su análisis Sokal y Bricmont distinguen cuatro usos diferentes del término “ciencia”, uno de ellos es “la ciencia aplicada y la tecnología (con la que a menudo se confunde la ciencia)”; con referencia a éste añaden: “También es verdad que la tecnología tiene efectos contradictorios –en ocasiones desastrosos– y que en raras ocasiones aporta las soluciones milagrosas que sus defensores más entusiastas prometen a cada paso”, aunque a pie de página minimizan los aspectos negativos de su crítica diciendo “No obstante, hay que subrayar que, a menudo, la tecnología es censurada por algunos efectos que se deben más a peculiaridades de la estructura social que a ella misma”. En mi opinión, estos comentarios son buena muestra de la arrogancia, que a veces se observa en el mundo científico, respecto a la tecnología. A pesar de lo anterior, conviene reconocer que los resultados de la ingeniería pueden ser criticables desde una perspectiva ética, individual o social, mientras que la búsqueda del conocimiento no debería serlo en ningún caso. Como ejemplo de la dificultad de juzgar éticamente los resultados de la ingeniería, Sokal y Bricmont refieren el caso de la investigación en electrónica cuántica, llevada a cabo en los 40 y 50 que, motivada en gran parte por sus posibles aplicaciones militares, dio lugar al transistor y a las nuevas tecnologías de la información a las que éste se aplica.*

A lo largo de la Historia se comprueba una y otra vez que la ciencia y la ingeniería han ido frecuentemente de la mano, especialmente durante los últimos trescientos años, en una colaboración que ha sido particularmente fructífera para ambas. Conviene, por tanto, reflexionar sobre la naturaleza de ambas, a la luz de acontecimientos históricos que han marcado su devenir, para conocer sus límites y diferencias.

El diccionario de la Real Academia Española define la ingeniería como “el conjunto de conocimientos que permite aplicar el saber

científico a la utilización de los materiales y de las fuentes de energía mediante invenciones o construcciones útiles para el hombre”. Es lógico, por tanto, que los términos ingeniería y ciencia, o ingeniero y científico aparezcan juntos con frecuencia. Una de las descripciones diferenciales entre la actividad del científico y la del ingeniero, que a mí particularmente me satisface más, es debida a von Karman, una de las personalidades más ilustres de la ingeniería aeronáutica mundial. Von Karman decía: “El científico explora lo que es, el ingeniero crea lo que nunca ha sido”. Aunque diferentes, ambos tienen como protagonista el mundo observable, unos para explicarlo, los otros para agrandararlo, pero ambas actividades pueden llegar a solaparse. En función de ese solape se puede caracterizar el mundo de lo creado; o sea, la ingeniería. Utilizando el enunciado de von Karman “crear” no tiene por qué estar basado en “explorar”, pero cuando la creación se basa en lo explorado de forma rigurosa, sistemática y empírica, ese mundo de lo artificial que es la ingeniería alcanza sus mejores resultados. En su contestación al discurso de ingreso en la Real Academia de Ingeniería del Profesor Sanmartín, Amable Liñán escribía: “Los que nos ocupamos de la ingeniería sabemos bien que los sistemas complejos que nos preocupan sólo pueden desarrollarse mediante saberes y tareas de carácter muy variado, como son la investigación y desarrollo, el diseño, la construcción y fabricación, y por último la operación y el mantenimiento... En el mundo competitivo actual, en que el éxito es tan dependiente de la capacidad de innovación tecnológica, no podemos dejar a la improvisación basada en el ingenio o la experimentación sin base científica sólida la solución de los problemas complejos”. En mi opinión, se pondría añadir que esos saberes son, además, los únicos transmisibles de forma sistemática mediante la enseñanza, contrariamente a otros como el ingenio, la capacidad creadora y la experiencia, que no lo son.

Ya Rankine abogaba por la investigación y la preparación de los ingenieros en las ciencias fundamentales. Cuando alguien le decía que un ingeniero práctico no necesitaba de mucha ciencia, Rankine contestaba: “Sí; lo que usted llama un ingeniero práctico es el hombre que perpetua los errores y equivocaciones de sus predecesores”. Refiriéndose a esta frase von Karman apostilló: “... aunque la definición es algo dura para muchos buenos ingenieros prácticos, es correcta en el sentido de que la enseñanza de la ingeniería no debe servir solamente para transmitir la experiencia de una generación, sino, también, basarse a la vez en antiguos y nuevos desarrollos de las ciencias fundamentales”. En realidad, la enseñanza sistemática de la ingeniería arranca de la Revolución Francesa al tomar conciencia de la posible mejora que podría derivarse si a los inventores de máquinas y artilugios se les dotase de una sólida formación científica y de buena capacidad de cálculo. Desde entonces y aunque con intereses distintos, la ciencia ha sido compañera inseparable de la ingeniería.

La ingeniería hace énfasis en lo particular; la preocupación fundamental es lo creado. Esta característica, permite, también, delimitar la frontera entre ciencia e ingeniería. Mientras que la ciencia busca conocer el marco fundamental, si es que lo hay, de los fenómenos observables, la ingeniería aplica ese conocimiento a lo particular. Se podría decir que los científicos buscan la modelización, a través de formulaciones matemáticas de lo observable, mientras que los ingenieros

buscan algunas soluciones particulares derivadas de la modelización científica.

El comienzo de la ingeniería se puede datar desde el momento en que el ser humano empieza sistemáticamente a transformar la naturaleza mediante la creación de objetos artificiales mientras que la ciencia, en un sentido amplio, aparece cuando la mente humana se inicia en la exploración el mundo. Las primeras manifestaciones de lo artificial están relacionadas con la arquitectura, la agricultura, las obras públicas y la guerra. Antiguas civilizaciones como la babilónica y la egipcia son ejemplos de desarrollo temprano de la astronomía y las matemáticas. Sin embargo, salvo raras excepciones, los primeros resultados del pensamiento filosófico llevados a cabo en el mundo clásico, cuna de nuestra civilización, distaron mucho de lo que hoy se entiende por ciencia. Las teorías precientíficas abordaban la explicación del mundo sin atender a su contraste empírico. En este entorno florecieron especialmente la lógica, la geometría, la ética y la psicología, entre otras, pero no la física.

En el período precientífico existieron, no obstante, hombres cuyas creaciones, buscadas y logradas de forma sistemática, permiten reconocerlos como científicos e ingenieros auténticos. Particularmente Arquímedes, cuyos espectaculares y variados resultados le han hecho acreedor a un puesto de honor no sólo como geómetra y matemático, sino también como físico e ingeniero. En efecto, en sus 75 años de existencia, Arquímedes, descubrió sus famosos principios y generó artefactos de gran utilidad. Este genio capaz de elaborar artefactos y descubrir las leyes de la palanca o de la flotabilidad es la representación viva de una ingeniería sólidamente basada en los pilares del conocimiento y del empirismo. Haciendo uso, principalmente, de la geometría, elaboró postulados de estática y las leyes de la palanca, de ahí que se le considere el padre de la mecánica. Hay que destacar, no obstante, que la mayoría de sus postulados en mecánica o en hidrostática fueron resultado de sus experiencias en la realización de artilugios, artefactos y sistemas de caracterización de materiales. Parece ser, entonces, que en estos casos, su fin primordial era más práctico que teórico; prueba de ello fueron las poleas compuestas, tornos, ruedas dentadas, tornillos sin fin, catapultas, garfios, sistemas de determinación del peso específico de los materiales, colea para subir agua, etc. Antes de Arquímedes, las únicas herramientas existentes, el rodillo, la cuña, el plano inclinado y la polea, no eran capaces de multiplicar la potencia invertida; por tanto, si el encargado de generar potencia era el músculo del hombre o del animal, la única forma de aumentar ésta era invertir un número mayor de éstos para realizar el trabajo. Las grandes construcciones de la antigüedad requirieron para su realización un número enorme de esclavos y animales. Sin embargo, los artilugios de Arquímedes eran sistemas limitados por la energía, en lugar de la potencia; cualquiera hombre o animal es capaz de desarrollar mucha energía, es sólo cuestión de estar más tiempo trabajando; piénsese lo que representó el uso de las poleas compuestas y de la palanca, donde el límite de la potencia desarrollada por el hombre desaparece. Por todo ello, y aun a su pesar según el relato de Plutarco², Arquímedes fue fundamentalmente un ingeniero y como tal el primero de la historia.

Entre los ingenieros antiguos hay que mencionar, también a Heron de Alejandría, que describió un gran número de aparatos con poleas y ruedas dentadas, y expuso el principio del sifón y un sistema de vapor a chorro, que se puede considerar precursor del motor de reacción. Desgraciadamente, su motor de reacción estaba fuera de las capacidades tecnológicas disponibles en la sociedad de su tiempo y por tanto no encontró la aplicación casi inmediata que requiere la obra de ingeniería. Crear artefactos (actividad que se puede conocer como inventar) no desemboca necesariamente en ingeniería si las tecnologías contemporáneas no están lo suficientemente desarrolladas como para que la sociedad pueda usarlas. Por esto, en la actualidad, una de las tareas de la ingeniería es la búsqueda y puesta a punto de las tecnologías que permitan llevar a cabo las realizaciones de la ingeniería.

Los inicios de lo que actualmente se conoce como física van asociados, y con razón, a los nombres de Galileo y Newton. Estos no fueron solos meros descubridores de leyes o teorías sobre algún fenómeno físico particular, sino que fueron capaces de formular las leyes fundamentales que rigen los fenómenos mecánicos. No obstante, en la sociedad de su tiempo e incluso un siglo más tarde, las ciencias físicas no contaban con la notoriedad ni la relevancia social que poseen en la actualidad. En efecto, la revolución del pensamiento científico, que Galileo y Newton protagonizaron, tuvo muy poco impacto en la mayoría de las universidades; ser científico era considerado poco más que un snobismo. Por otra parte, los practicantes de oficios y artesanos desarrollaban sus habilidades aprendidas en escuelas, usualmente patrocinadas por los gremios profesionales correspondientes y, por supuesto, separadas del ámbito universitario. Sin embargo, la necesidad de exigir responsabilidades a los dispensadores de ciertos servicios profesionales críticos hizo necesaria la tutela de los poderes públicos en la confección de los programas de enseñanza. De este modo, la sociedad pudo contar con ingenieros profesionales, a veces comisionados por el poder público, garantes de las labores técnicas, no triviales y de utilidad pública, realizadas por ellos o por otros a los que supervisaban.

En este marco y con la finalidad de fortalecer la tecnología industrial y militar francesa, la Convención Revolucionaria creó la École Polytechnique en el París de 1794. La principal característica de dicha institución emanaba de la creencia de sus fundadores de que la ingeniería debía estar profundamente basada en las ciencias fisicoquímicas y en las matemáticas. Este hecho determinó el tipo de profesores empleados que fueron reclutados entre los científicos más prominentes de su tiempo. A partir de ese momento, los ingenieros entran en contacto con la investigación científica. Siguiendo las líneas de la École Polytechnique, esta corriente educativa pasó pronto a Alemania, donde las Technisches Hochschulen desarrollaron rápidamente lazos con la industria alemana. Al mismo tiempo en las universidades alemanas se comenzó a valorar la actividad científica. Después de la Guerra Civil norteamericana, Estados Unidos se incorpora a este quehacer científico y algunos de sus estudiantes vinieron a Europa, a Alemania especialmente, atraídos por la fama de la ciencia que allí se desarrollaba. Se generalizó así la enseñanza de las ciencias en la ingeniería para afrontar con ventaja los problemas técnicos de una

sociedad que se enfrentaba por primera vez a un desarrollo sin precedentes que exigía dar la respuesta adecuada en actividades tales como la extracción y transformación de las materias primas, la industrialización, la alimentación, y la arquitectura entre otras.

Sin esta labor de la ingeniería, el desarrollo científico hubiera sido mucho más lento y su repercusión social mucho menor. Una muestra de ello se encuentra en la aeronáutica. La aviación como respuesta al deseo de volar se justifica por sí misma, pero sin su aspecto comercial, sin el transporte aéreo, el desarrollo no hubiera sido el mismo, o como amplía Amable Liñán en uno de los discursos conmemorativos del centenario de la aviación: “El desarrollo de la Ingeniería Aeronáutica fue incentivado en gran medida por las aplicaciones militares de la Aviación, que cambiaron drásticamente el carácter de las guerras. Este desarrollo no podría haber ocurrido sin otro paralelo de las ciencias aeronáuticas, que por ello, recibieron también fuertes apoyos gubernamentales para su propio desarrollo”. En efecto, una vez formuladas las ecuaciones de Navier Stokes el problema de la mecánica de fluidos parecería a priori totalmente resuelto. Sucede, sin embargo, que su complejidad matemática es tan grande que no es fácil extraer soluciones útiles para la ingeniería. El modelo de fluido no viscoso, por ejemplo, establecido por Euler en 1755, cuando se aplica al cálculo de la resistencia que experimenta un cuerpo que se desplaza en el seno de un fluido, lo que constituye el problema fundamental de la aerodinámica, proporciona el resultado de que dicha resistencia es nula; este resultado, que no tiene realidad física, se conoce con el nombre de paradoja de D’Alambert.

Debido a este resultado paradójico creció el escepticismo en la utilidad de la teoría y se promovió una hidrodinámica experimental y una ingeniería de fluidos basada fundamentalmente en el empirismo. La búsqueda de una solución práctica a este problema fue lo que guió a Prandtl, en 1905, para desarrollar su teoría de la capa límite. Esta teoría no solo permitió resolver un problema concreto de la ingeniería sino que contribuyó al desarrollo del conocimiento científico, desde la ingeniería, ya que su formulación hizo posible la explicación teórica de los resultados experimentales y dio paso a la mecánica de fluidos moderna. Además, en la actualidad sucede con frecuencia que ciencia e ingeniería van de la mano tanto en la preparación de los ensayos y diseño de equipo necesarios para contrastar las cada vez más sofisticadas teorías científicas como en grandes proyectos de demostración y factibilidad.

Mientras que el conocimiento científico se encuadra en un marco general de modo que cada nueva teoría contenga a las que la precedieron, la ingeniería propugna soluciones a problemas particulares, sin la exigencia de una generalización sistemática. La mecánica de Newton fue válida para cualquier sistema de referencia inercial independiente de la velocidad de los mismos hasta, que un fenómeno observable, como el de la constancia de la velocidad de la luz en cualquier sistema de referencia, vino a contradecirla; Einstein, poco después, formuló su teoría de la relatividad especial, y demostró la aplicabilidad de las transformaciones de Lorentz entre sistemas inerciales. La ingeniería, en cambio, en su búsqueda de soluciones a los problemas particulares que le ocupan hace uso frecuente de aproximaciones, simplificaciones, correlaciones y ensayos. El

ingeniero, en su afán por simplificar, estructurar y facilitar su trabajo ha hecho un uso profuso de ábacos, prontuarios, reglas de cálculo y máquinas de calcular. No es de extrañar, por tanto, que el cálculo numérico, apoyado en la velocidad computacional y capacidad de memoria de los modernos ordenadores, se haya convertido en una de las armas más poderosas de la ingeniería actual. Se debe advertir, sin embargo, que los poderosos algoritmos y programas existentes no pueden sustituir al ingeniero en la búsqueda de soluciones a los problemas de la ingeniería.

No es menos ilustrativo, el estudio de la contribución de la ingeniería al desarrollo de los conocimientos científicos de los fenómenos relativos al calor, y a la electricidad y magnetismo. Aunque ambos fenómenos se conocen desde la antigüedad, su conocimiento y sus aplicaciones han seguido un desarrollo radicalmente distinto. Las sensaciones de calor y frío empezaron a cuantificarse con la creación del termómetro. El primer instrumento científico para medir la temperatura fue inventado por Galileo, desde entonces y aun sin un conocimiento claro de los procesos termodinámicos, antes al contrario erróneo (teoría del calórico), se han desarrollado numerosas máquinas térmicas para extraer el siempre tan preciado trabajo mecánico del “barato” calor. Contemporáneo de Newton fue Thomas Newcomen, que en 1698 patentó el primer motor sobre la base de las ideas de Thomas Savery; en 1712, una de las realizaciones de este motor se instaló con éxito en una mina. Más tarde, en 1775, mucho antes que Carnot formulara el segundo principio (1824), que Joule estableciera el equivalente mecánico del calor (1843) y que Mayer postulara el principio general de conservación de la energía (1845), James Watt separó el condensador del embolo y consiguió aumentar de forma sustancial el rendimiento del motor. Es curioso constatar que el enorme prestigio intelectual de Watt fue responsable del retraso, de casi 20 años, en el desarrollo del motor de vapor, al empeñarse éste en que fuera la presión atmosférica, en lugar de la presión de alta, la que condujera el movimiento del émbolo. Las máquinas de vapor y el trabajo mecánico que suministraban, a partir del calor de la combustión, y los nuevos sistemas de obtención de hierro, en hornos de carbón fueron elementos esenciales para la revolución industrial que comenzaba a alborear. Es curioso observar que, aun sin la existencia de un conocimiento riguroso de los fenómenos del calor, cuyas teorías modernas fueron comenzadas por Carnot y formuladas en su forma definitiva por Gibbs, Boltzmann y Maxwell a finales del siglo XIX, Watt y sus contemporáneos fueron capaces de diseñar artefactos de gran utilidad. De extraordinaria importancia fueron también las innovaciones que posibilitaron el transporte mecánico, entre las que cabe citar la máquina de Stephenson y los motores de Otto y Diesel. Lo anterior demuestra que el concurso de la ingeniería fue clave como elemento motor para el desarrollo de la termodinámica. Debe añadirse, sin embargo, que sin el concurso de la termodinámica no se hubiera pasado del 2% del rendimiento de los primeros motores de vapor a casi el 70% de los modernos motores de combustión interna.

Por el contrario, el desarrollo del conocimiento y de las aplicaciones de la electricidad no siguieron las mismas pautas. En efecto, excepto en el caso de la pila de Volta, las aplicaciones sistemáticas de la electricidad comenzaron cuando ya se disponía de un extenso cuerpo de conocimientos científicos de los fenómenos eléctricos. Innovadores de talla excepcional como von Siemens, Gramme y Tesla desarrollaron

los sistemas de generación de energía eléctrica y los motores eléctricos, el descubrimiento del transformador por Gaulard permitió un transporte económico de la misma, y Edison ideó un sistema de alumbrado limpio y seguro. Finalmente, las realizaciones de Bell y Marconi abrieron el área de las comunicaciones.

Históricamente, muchos de los desarrollos y realizaciones de la ingeniería han ido por delante del conocimiento científico establecido recurriendo al empirismo en caso necesario. Como se ha comentado anteriormente, la dificultad intrínseca de las ecuaciones de Navier-Stokes, que modelizan el comportamiento de los fluidos, hace que la ingeniería de fluidos haya hecho un uso intensivo del ensayo experimental. En estos casos, es fundamental, debido al coste de los ensayos, reducir el número de los mismos para lo que el análisis dimensional y la semejanza dinámica se hacen imprescindibles. Reynolds estableció que, para velocidades pequeñas comparadas con la velocidad del sonido, los movimientos de los fluidos están gobernados por un único parámetro adimensional (después llamado número de Reynolds) y, por tanto, si se mantiene constante este parámetro, el movimiento que se obtiene es el mismo independiente de las características del fluido y del ensayo a tratar. Un ejemplo de la no trivialidad de este tipo de análisis, incluso para la comunidad científica de principios de siglo XX, lo describe la siguiente experiencia que relata von Karman y que, por su interés, copio literalmente su traducción al español:

“En 1911 un afamado fisicoquímico alemán, Emil Bose, publicó un trabajo con muy cuidadosas medidas sobre la caída de presión, en distintos tubos, de varios líquidos orgánicos. Empleó aparatos idénticos para todos ellos y midió el tiempo necesario para que iguales volúmenes de los diferentes líquidos corrieran a través del mismo tubo, determinando las correspondientes diferencias de presión sobre los extremos de éste. Comparando los resultados para distintos líquidos, halló que el cloroformo, por ejemplo, es menos viscoso que el agua a velocidades bajas, pero se comporta casi lo mismo que el agua a velocidades mayores; el bromoformo es más viscoso que el mercurio a velocidades bajas, pero resulta ‘menos viscoso’ que el mercurio a velocidades altas. Evidentemente ‘menos viscoso’, en este caso, significa que es necesaria una diferencia de presión más pequeña a la misma velocidad de corriente. Sugerí el empleo del número de Reynolds como parámetro – definido como la velocidad media multiplicada por el diámetro del tubo y dividida por la velocidad cinemática–, y se vio que las fórmulas que propuso Bose para representar sus resultados experimentales con nueve líquidos podían unificarse en una sola fórmula. Lo que prueba no tanto lo correcto de la ley de semejanza, que no necesita prueba experimental, sino la exactitud de las medidas de Bose”.

Karman sigue diciendo: “Con mis disculpas a los hidráulicos que puedan leer este libro, confieso que solía llamar a la Hidráulica ‘la ciencia de las constantes variables’. Lo cierto es que la mayor parte de las constantes que aparecen en los viejos libros de Hidráulica son, simplemente, funciones del número de Reynolds. Una vez que los ingenieros hidráulicos y los ingenieros químicos adoptaron el concepto de número de Reynolds, todos los fenómenos sobre corrientes en tubos y canales se aclararon mucho. Sin embargo, pasó bastante tiempo antes de que toda la importancia de las ideas de Reynolds penetrase

en las mentes de los físicos, químicos e ingenieros. En la literatura de este siglo aparece como ‘factor de turbulencia’ un equivalente del número de Reynolds.

Dije antes que el número de Reynolds estaba, a veces, considerado como ‘magia negra’, porque en ingeniería se puede usar una regla de semejanza, y otros métodos generales para la reducción de parámetros, sin una perfecta comprensión del fenómeno”.

Von Karman remata su comentario con una última anécdota: “Recuerdo que un gran ingeniero, Charles F. Kettering, entonces director de investigación de la ‘General Motors’, me dijo en un almuerzo celebrado juntamente con el difunto Robert A. Millikan: ‘debo confesar que la Termodinámica ha sido siempre para mí como una caja negra!’. Esta observación de un gran ingeniero práctico que, ciertamente, tuvo que aplicar la ley de la entropía y otros conceptos termodinámicos en sus trabajos, ¡es muy interesante!”.

A pesar de su modernidad, la ingeniería aeronáutica ha hecho un uso intensivo y sistemático del ensayo experimental para extraer conocimiento. Por ejemplo, los hermanos Wright, pioneros de la ingeniería aeronáutica consiguieron realizar los primeros vuelos propulsados, en Kitty Hawk en 1903, después de medir las características de los perfiles aerodinámicos a partir de ensayos realizados en un túnel aerodinámico diseñado y construido por ellos mismos. El éxito de sus vuelos despertó el interés de científicos e ingenieros por la ciencia aerodinámica lo que condujo a un desarrollo rápido y espectacular de sus fundamentos básicos y resultados prácticos. No obstante, el progreso del vuelo propulsado ha necesitado disponer de plantas de potencia adecuadas. La falta de un medio adecuado de propulsión, independientemente de otros problemas, impidió el vuelo de la máquina concebida para tal fin por Leonardo da Vinci. Los hermanos Wright tuvieron que desarrollar su propio motor de 12 CV antes de afrontar con éxito su primer vuelo por ser excesivamente pesados los motores de combustión interna existentes en su tiempo. El desarrollo de motores más grandes y eficientes posibilitó el vuelo de aeronaves mayores, más rápidas y capaces de volar a mayor altura.

Otro ejemplo interesante se encuentra en el desarrollo del turborreactor, uno de los sistemas tecnológicos que más rápidamente ha evolucionado y cuyo problema principal consistió en el diseño de las cámaras de combustión; aun sin una teoría precisa de la combustión, se logró que éstas funcionaran adecuadamente con energías liberadas por unidad de volumen mil veces mayores que las calderas. El advenimiento de los motores de reacción fue una respuesta al problema del aumento de la velocidad de vuelo. Sin plantas propulsoras de bajo peso por unidad de empuje o potencia, el vuelo a velocidades supersónicas sería imposible. Al igual que había ocurrido con Otto y Diesel que tuvieron que desarrollar sus motores de explosión sin que existiera un conocimiento claro de la termodinámica, Whittle y von Ohain, los padres del turborreactor, desarrollaron su sistema a pesar de los pronósticos en contra de algunos científicos que, aun sin un conocimiento claro de los fenómenos aerotermodinámicos involucrados, aventuraban la imposibilidad de su funcionamiento. Animado, sin embargo, por sus resultados experimentales, Whittle y von Ohain no

cejaron hasta demostrar la viabilidad del turborreactor, al igual que lo ocurrido con la aerodinámica, este hecho despertó un interés inusitado que culminó en el establecimiento de la propulsión como una rama nueva de la ingeniería.

El desarrollo de un proyecto competitivo de un motor de reacción para una aeronave o vehículo espacial es una de las tareas más desafiantes en ingeniería. Las actuaciones de una aeronave o vehículo espacial son tan sensibles a las reducciones de dimensión, peso y consumo de combustible de sus motores, que se requiere que el rendimiento de cada uno de sus componentes esté por encima de un valor umbral. Para lograrlo fue necesario recurrir a disciplinas tales como: aerodinámica, termodinámica, control, materiales, vibraciones y aeroacústica, combustión, transmisión de calor, lubricación, instrumentación, fabricación e inspección.

En propulsión, como en otros muchos avances tecnológicos, el “arte” precedió a la ciencia. Sin embargo, es altamente improbable que el hombre hubiera producido aviones supersónicos o cohetes capaces de llevarlo a la luna sin una adecuada “teoría” de la propulsión. Por “teoría” se quiere significar el método de generalizar los resultados de los experimentos para poder, con alguna confianza, predecir los resultados de nuevos experimentos; esto es, capaz de diferenciar los puntos principales de un fenómeno separándolos de los detalles confusos y pocos significativos, y de hacer posible el análisis de los límites de funcionamiento del sistema. Además, la teoría estimula la mente para experimentar nuevos desarrollos y concepciones. Una teoría contrastada puede prevenir la realización de esfuerzos baldíos en artefactos inviables.

La ingeniería de materiales es otro campo donde los conocimientos y resultados se han obtenido fundamentalmente a través de la experimentación. Desde la antigüedad y aun careciendo de un conocimiento profundo de los materiales, el hombre ha usado, obtenido y transformado éstos para la fabricación de sus ingenios y artefactos. Parte de esta actividad desembocó en el nacimiento de la metalurgia y del estudio sistemático del comportamiento y de la resistencia de los materiales. Mi profesor de metalurgia y buen amigo, Pascual Tarín, comentaba en sus clases que la metalurgia es, en la actualidad, lo más parecido a la alquimia. Como en la alquimia, en la metalurgia se obtienen resultados después de muchos ensayos sistemáticos y su difusión por parte de las empresas que los poseen se limita total o parcialmente. Resulta notable que, aun careciendo de un conocimiento acabado de la teoría de la fractura, la ingeniería construya sistemas donde el comportamiento estructural de los materiales utilizados es trascendental. Como suelo comentar en mis clases de motores de reacción, el arte de diseñar y la capacidad de fabricar compresores, cámaras de combustión y turbinas quedarían en un segundo plano si no se dispusiera de los materiales necesarios para su construcción y que en el caso de los motores de reacción son de vital importancia para su funcionamiento, no solo seguro, sino rentable. España, por ejemplo, no posee la tecnología necesaria para obtener los materiales ligeros o capaces de soportar las altas temperaturas que requieren los motores de reacción. La disponibilidad de estos materiales estratégicos es un claro ejemplo de desarrollo industrial de un país y sitúa a sus empresas en una posición ventajosa. Conviene destacar que este carácter del desarrollo

tecnológico ha restado protagonismo al ingeniero. La empresa y no el ingeniero que trabaja para ella es la que desarrolla y detenta el conocimiento tecnológico. Contrariamente al ingeniero, el científico sigue, en la actualidad, siendo el verdadero protagonista del desarrollo del conocimiento científico.

Otro claro ejemplo destacado de ingeniería como motor de conocimiento científico lo encontramos en la Universidad de Göttingen durante los últimos años del siglo XIX y principios del XX. En efecto, el matemático Felix Klein, a su vuelta de la exposición Universal de Chicago en 1893 donde observó los avances tecnológicos espectaculares que se estaban produciendo, se propuso impulsar, en Göttingen, los lazos entre las matemáticas y las disciplinas científicas con los problemas tecnológicos de la industria. Gracias a esto se pudo financiar el establecimiento en Göttingen de figuras relevantes de la ciencia y de la ingeniería. Los resultados de esta gestión fueron espectaculares; en particular, para la emergente ingeniería aeronáutica. En efecto, la incorporación de Ludwig Prandtl a Göttingen, bajo el mandato de Klein, significó un extraordinario impulso para la aerodinámica. Prandtl impulsó la construcción de un túnel de viento para la realización de ensayos aerodinámicos y estableció bases cuantitativas para la teoría cualitativa de Lanchester de las alas de gran alargamiento; esta teoría permitió relacionar la forma en planta del ala y la curvatura y la torsión de sus perfiles con la distribución de las cargas aerodinámicas y en particular con la sustentación y la resistencia inducida.

Como se ha mencionado, el precedente de este modo de hacer es la École Polytechnique. Así, bajo los auspicios del Comité de Salud Pública se creó una Comisión de Trabajos Públicos que daría origen a la creación de la École en 1794 bajo la dirección de Monge y Fourcroy. Se instaló en el Palais-Bourbon, sus profesores fueron seleccionados entre los científicos más destacados y sus alumnos eran reclutados por concurso en toda Francia. En 1795, se le agregó el adjetivo Polytechnique con la misión de conferir a sus alumnos una sólida formación científica, apoyada en las matemáticas, física y química, y formarlos para entrar en las escuelas especiales de los servicios públicos del estado. El impacto de esta Escuela se puede apreciar en la lista de nombres ilustres que salieron de sus aulas: Poisson, Biot, Fresnel, Gay-Lussac, Arago, Cauchy, Comte, Poincaré, Becquerel, Clapeyron, entre otros muchos. De nuevo, la ingeniería fue motor del conocimiento científico y, desde entonces, ha seguido siendo su principal mecenas. Tras muchos avatares, después de pasar por academia militar, en la actualidad sigue siendo una de las instituciones de enseñanza técnica más prestigiosa del mundo. Parte del éxito de la École Polytechnique, así como de otras muchas que la tomaron por modelo, es debido al sistema de selección de sus estudiantes; se puede definir como un sistema elitista, en donde entran los que mejor resultado han obtenido durante una formación preparatoria. Para dar una idea del carácter de exclusividad analicemos las siguientes cifras correspondientes a la actualidad: 800.000 personas nacen en Francia en un año; 480.000 pasan el Bachillerato; 120.000 de ellos siguen la opción científica; de los cuales 13.000 –con muy buenos resultados académicos– son admitidos en el Preparatorio (estudios especiales para competir en los exámenes de entrada de las

Grandes Écoles); pués bien la École Polytechnique recluta sus estudiantes de primer curso entre los mejores de ellos.

Si este ingeniero, de amplia formación científica, cuyos orígenes se remontan al siglo XVIII sigue hoy vigente es una cuestión con una respuesta delicada. Aun para los que creemos en los valores de ese modelo de ingeniero y de su enseñanza, es indudable que la sociedad occidental demanda su revisión crítica. En particular, el abandono de los procesos de selección para permitir el acceso a la Universidad de grandes masas de estudiantes, que los poderes públicos tratan de satisfacer con mejor o peor fortuna, parece incompatible con la formación elitista del modelo anterior; la preocupación por el grado de conocimientos adquiridos durante el período de formación pasa así a un segundo plano. No podía de ser de otra forma ya que nuestro sistema universitario ha pasado de atender a 330.000 alumnos en 1970 a casi 1,6 millones en el año 2000 de los cuales el 12,5% han optado por ingenierías. Para muchos, los contenidos científicos cuya adquisición requiere mayor esfuerzo están bajo sospecha y su necesidad ha sido puesta en tela de juicio. Con independencia de lo anterior, la adecuación de los conocimientos científicos del ingeniero a su realidad profesional es imprescindible. Al igual que Landau estableció, en su tiempo, los conocimientos matemáticos mínimos requeridos para la formación de un físico, el cambio drástico que está experimentando la ingeniería en la actualidad requeriría también establecer la formación físico-matemática mínima imprescindible en el patrimonio intelectual de los ingenieros.

Excepto en las actividades específicas de innovación, muchas ramas de la ingeniería han llegado a un grado de perfección tecnológica tal que su aplicación comporta una dosis de rutina considerable. Por otra parte, los resultados de algunas ramas de la física, actualmente relevantes, parecen alejados de su aplicación inmediata, de modo que el interés de físicos e ingenieros se hace más distante. Excepto en lo relativo a la biotecnología, informática y comunicaciones, la mejora en el desarrollo e innovación de los procesos tecnológicos es cada vez más difícil. Muchas de las actividades de la ingeniería se están concentrando en actividades que permiten aumentar el valor añadido de los productos: la mejora de la producción, fabricación y otros procesos de la ingeniería, y el cálculo computacional, asociado al incremento revolucionario de la capacidad de los actuales ordenadores, son ejemplos típicos. Para el desempeño de estas actividades, el conocimiento de programas de cálculo, de la organización de la producción, del marketing y de las relaciones humanas se hace necesario y limita el tiempo dedicado a la formación físico-matemática tradicional.

No deja de ser paradójico que se clame por ingenieros con una formación científica menos exigente para desarrollar la llamada ingeniería sostenible que debe enfrentarse a retos ecológicos y tecnológicos verdaderamente formidables: el estado de la biosfera –contaminación del aire y del agua, la desaparición de selvas ecuatoriales, los miles de especies al borde de la extinción, las grandes extensiones de tierra explotadas hasta mucho más allá de su capacidad, las centrales nucleares inseguras, las armas nucleares, los calveros que sustituyen a los bosques, el hambre, la desnutrición, los humedales en vías de desaparición, la destrucción de las antiguas praderas, y un gran número de enfermedades de origen

ambientales entre otros. Es claro que sólo desde una sólida formación científico-técnica podrán los problemas anteriores abordarse con garantías de éxito.

Ante esta diversidad en las necesidades de la ingeniería no parece razonable dar una única respuesta. En este sentido, la ingeniería anglosajona parece más adaptada a la demanda actual ya que en su sistema han convivido tipos diferentes de ingenieros. Desde aquellos cuya formación estaba basada fundamentalmente en la práctica hasta otros, como los graduados en el Imperial College o en el MIT, con una sólida formación científico-técnica. Es conveniente señalar, que la ingeniería francesa está abriendo actualmente el abanico de posibilidades en la formación de sus ingenieros al introducir diferencias en los contenidos científico-técnicos y en la especialización de éstos para su mayor adecuación a las nuevas tareas profesionales.

De la misma forma nosotros no debemos dejar escapar la oportunidad que se nos presenta actualmente de la definición de las nuevas profesiones de la ingeniería para establecer un amplio margen de formaciones; haciendo compatible una formación sólida para un número no elevado de alumnos con una formación especializada para una gran mayoría de ingenieros que las nuevas actividades empresariales demanda.

Por último creo de interés apuntar, para ser tenido en cuenta en esta etapa de clarificación de nuestra oferta universitaria, uno de los peligros que se ciernen sobre los estudios científicos y de ingenierías: la falta de alumnos. Seguro que este fenómeno que empieza a preocupar en Estados Unidos y en países avanzados de Europa como Alemania nos parece lejano. ¿Cómo no vamos a tener gente dispuesta a estudiar carreras que hasta el momento parecen tener tan buena aceptación como las ingenierías? Pues la respuesta es bien sencilla, en nuestra sociedad actual donde algunos de los valores que se tenían presentes como la vocación se cuestionan dando paso a una búsqueda de la comodidad (que no de la felicidad) o de la posición social como motor de nuestra actividad, el sacrificio que puede representar la realización de estudios tan complejos y difíciles como los científicos y de ingeniería no parecen que merezcan la pena por la “paga que consiguen”. Las nuevas teorías económicas nos acusan a los que advertimos de estos peligros que las leyes del mercado se encargaran de estabiliza cualquier desequilibrio social; a ellas se alude para enunciar que los retos tecnológicos se superan siempre que sea necesario. En mi opinión eso no es así; los retos tecnológicos se superan después de muchas horas de estudio y sacrificio. Los retos tecnológicos hay que abordarlos en escalas de tiempo lo suficientemente grande. Como ingeniero sé que la expresión “suficientemente grande” no tiene sentido por eso seré más preciso y diré que la escala de tiempos para abordar los retos tecnológicos debería ser menor que el tiempo característico del colapso de una sociedad para que ello no ocurriera.

3.4. Los ingenieros del renacimiento. Análisis del libro de Bertrand Gille.

En su libro *Los Ingenieros del Renacimiento*, el autor, Bertrand Gille, sustenta que la época, conocida como la del "Renacimiento", se caracteriza por el surgimiento de la categoría de los denominados "*ingenieros*", que sobrepasa la condición de "*maestro de las máquinas de guerra*", como se solía llamar a los artesanos-constructores de la Edad Media. Estos últimos fabricaban los artefactos de guerra pesados, como las catapultas, en base a conocimientos empíricos, dado que los instrumentos de medida, en este mundo donde la matemática empezaba solamente a ser introducida en la enseñanza de las universidades, se revelaban de lejos insuficientes, situación que se hizo igualmente sentir durante el Renacimiento. Al contrario, el ingeniero del Renacimiento, para poder enfrentarse a las nuevas realidades técnicas de la época, tiende siempre más hacia un esfuerzo de racionalización de las leyes físicas que rigen el mundo. El Ingeniero debía desempeñar las funciones de arquitecto civil, militar, constructor, diseñador, y pensador, aunque aquel esfuerzo de reflexión no desembocó obligatoriamente en la proliferación de innovaciones técnicas y militares, como se hubiera podido asumir. Es desde ese entonces que se esbozara una tímida interacción entre la ciencia y la técnica, aun cuando el nuevo ingeniero se distinguirá siempre más del futuro científico, el cual se mueve a otro nivel de abstracción, destacándose del sector de la pura tecnicidad.

Para sustentar su tesis, el autor hace un breve recorrido de las fuentes manuscritas de la Antigüedad griega, romana, de las del Imperio bizantino, en las cuales se encuentran consignadas las técnicas contemporáneas en uso y que confirmaban la existencia de un espíritu "técnico". Luego, analiza el periodo de la Edad media, que se caracteriza por la copia de los manuscritos antiguos, y aprecia la influencia técnica y científica que esas reproducciones han tenido sobre los ingenieros europeos a partir del siglo XII, y particularmente del Renacimiento. El autor estudia el Tratado militar de Guy de Vigevano, que anticipa los cuadernos de los ingenieros del Renacimiento, así como repasa los escritos técnico-militares de la Escuela alemana. Entre éstos últimos se destaca el de Konrad Kyeser, cuyos dibujos serán ampliamente reproducidos en los manuscritos posteriores, particularmente en los italianos, sin que, desgraciadamente, fuese citado su nombre. A esta obra se añade el Manuscrito de la guerra husita, escrito en Alemania, y que data del periodo ulterior a 1420. Bertand Gille explora asimismo las dos generaciones italianas, que precedieron la época personificada por Da Vinci. Entre los autores de la primera generación, encontramos a Filippo Brunelleschi, Taccola, León Battista Alberti, Roberto Valturio. En la obra de este último se nota la influencia de Flavio Vegecio, antiguo autor de la obra *De Re Militari*, cuyo título será retomado por Valturio para su tratado de técnica militar. El tratado de Valturio tuvo gran éxito durante más de medio siglo después de su publicación, y fue dedicado al ex – condotiero Malatesta devenido en Príncipe y dedicado al mecenazgo. Francisco di Martini, cuya carrera fue injustamente eclipsada por la de Da Vinci, el cual no dudó tampoco en copiar sus dibujos, marca la transición definitiva hacia la segunda generación, de la cual Da Vinci fue un notable representante.

El estudio de la compilación de manuales tradicionales evidencia la influencia de Vegecio, la cual, a parte de haberse cristalizado en el tratado de Valturio, como lo habíamos mencionado, se manifiesta también en varios otros ingenieros del Renacimiento. Entre no solamente los ingenieros de la primera generación, pero igualmente en los trabajos de Da Vinci, el antiguo Vitruvio ocupa un sitio de honor, más que el romano Frontin.

En Italia, todas las obras publicadas bajo, principalmente, la égida de los humanistas y mecenas italianos, quedaron impregnadas de la tradición escrita técnico-militar, de la cual se tiene dificultad en salir, aunque en esta época había ya aparecido el cañón, arma revolucionaria a nivel de la táctica, estrategia y de construcción militar.

Sin embargo, se percibe en los manuscritos que se publican en el siglo XV y XVI una voluntad más fuerte de exactitud en el dibujo, una importancia mayor otorgada a la

perspectiva, especialmente desde Da Vinci, y que confirma el espíritu de cooperación que unía a los artistas y los sabios desde el inicio del Renacimiento.

Gran parte del libro enfoca la vida de Leonardo da Vinci, su carrera de ingeniero, su lado técnico, y su "método", el cual, según Bertrand Gille, no existe. Como lo señala el autor, es inexistente porque Leonardo es dotado de una curiosidad inmensa que desgraciadamente lo lleva a dispersarse, lo cual le impide especializarse en ciertos sectores, y por ende, a erigir los pilares de una investigación metódica. Además, Bertrand Gille indica que, aun si Leonardo Da Vinci lega un número amplio de dibujos a la posteridad, su aporte a nivel de innovaciones técnicas fue mínimo, dado que no brindaba soluciones prácticas viables, pero quedaba de una manera u otra fijado en el espíritu de su tiempo orientado hacia el análisis y la reproducción literal de los dibujos anteriores. El autor ha estimado necesario colocar a Da Vinci en su justo contexto, es decir, sin alabarlo demasiado como era costumbre hasta la mitad del siglo XX. Porque, aunque se puede detectar en Da Vinci un cierto esfuerzo de reflexión sobre los mecanismos que rigen el funcionamiento de varias máquinas de la época, su estudio del armamento, por ejemplo, es inexistente, y como sus compañeros de la época entonces escultores, pintores, constructores, Leonardo se interesaba más en la fortificación militar y prefería dedicar un número importante de sus trabajos al sistema hidráulico de las obras públicas. Pero, en estas áreas, tampoco resultó ser un descubridor. Sin embargo, no se puede denigrar al florentino, puesto que su deseo de observación y el de usar ciertas nociones de cálculo en la elaboración de máquinas que dibujó, pone a este último entre los precursores de los ingenieros modernos.

El autor nos demuestra que el Renacimiento estaba fuertemente anclado en la tradición antigua, aún si ésta fue enfocada de manera diversa por cada uno de los países europeos. Tenemos así a los alemanes que no conseguían emanciparse de ella, razón por la cual se encontraron en la imposibilidad de dar el salto hacia el progreso técnico, mientras que los italianos, a pesar de reconocer su mérito, no le atribuyeron a la tradición manuscrita la importancia que le otorgaban los teutones, y sin embargo no pudieron superarla. Efectivamente, pese al hecho que los italianos manifestaban una capacidad creativa superior a la de los alemanes, demasiado aferrados al mundo de la técnica militar, sus dibujos de máquinas de guerra eran a menudo meras fabulaciones, como las que poblaban el imaginario medieval, y no tenían aplicación práctica.

Además, la adopción durante una gran parte de la Edad Media de los principios aristotélicos que se sobreponían a la visión arquimediana, la cual había sabido unir de manera más pragmática ciencia y técnica, representó un verdadero freno para la época del Renacimiento. Desgraciadamente, Aristóteles, que impuso al Occidente medieval su noción del ímpetus, desvió gran parte de los estudios sobre el movimiento y, consecuentemente, sobre las del tiro en la artillería.

En conclusión se puede afirmar que, pese a esta tradición que dominaba las compilaciones de la época y el hecho que los mecanismos de comprensión eran mal canalizados debido a que estaban basados en la visión física aristotélica colmada de errores, el cuerpo naciente de "ingenieros", como Francisco di Giorgio Martini o Leonardo Da Vinci, evidenció una verdadera voluntad de reflexión para entender la tradición, a fin de integrarla mejor a las realidades técnicas vigentes de entonces. Esta tentativa de razonamiento permitió a los ingenieros ulteriores asimilar y superar esta tradición, fenómeno que desembocará en el establecimiento de un método de investigación más sólido sustentado en una mayor sistematización. Dotados de conocimientos científicos que iban acrecentándose, esos nuevos especialistas de la técnica racionalizada iban a poder enfrentar mejor a las demandas técnicas en los siglos venideros. (GILLE, 1978)

3.5. Bases científicas de los conocimientos ingenieriles de Leonardo.

Leonardo estudió, dibujó y pintó “todas las formas de la naturaleza posibles”, investigó no sólo sus cualidades y proporciones externas, sino también las fuerzas que las habían conformado y transformado. Observó patrones y modelos similares en el macro y microcosmos, pero sus cuidadosas investigaciones de estos patrones de organización le hizo darse cuenta de que las fuerzas subyacentes eran muy diferentes.

En sus numerosos estudios sobre el agua, Leonardo reconoció perfectamente que la gravedad y la fricción interna del fluido, o viscosidad, eran las dos fuerzas principales que influían en su movimiento. En sus observaciones detalladas sobre formaciones rocosas, identificó el agua como el agente principal en la formación de la superficie de la Tierra. Por otra parte, especulaba sobre la naturaleza de las fuerzas tectónicas que provocaron capas de roca sedimentaria que emergieron del mar y formaron las montañas. (CAPRA, 2013).

En sus estudios de plantas y animales, Leonardo identificó el alma como la fuerza vital que subyace en su formación y crecimiento. No podía ser de otra manera, siguiendo la tradición aristotélica, donde se concibe el alma como una construcción en niveles sucesivos, correspondientes a los niveles de la vida orgánica. El primer nivel es el "alma vegetativa," que controla los procesos metabólicos del organismo. El alma de las plantas se restringe a este nivel metabólico de una fuerza vital. La siguiente forma superior es el "alma animal", que se caracteriza por el movimiento autónomo en el espacio y por sentimientos de placer y dolor. El "alma humana", por último, incluye las almas vegetales y animales, pero su principal característica es la razón.

3.5.1. El "noble" papel de la Mecánica.

Los movimientos autónomos y voluntarios del cuerpo humano fascinaban a Leonardo, llegando a convertirse en un tema importante en su obra sobre anatomía. Desde su origen en el centro del cerebro (el "asiento del alma"), trazó la transmisión de las fuerzas subyacentes desde los distintos movimientos corporales a través de los nervios motores centrales y periféricos a los músculos, los tendones y los huesos. Leonardo argumentó que los músculos, los tendones y los huesos eran "*instrumentos mecánicos*" de la naturaleza que son esenciales para los movimientos corporales y fueron analizados mucho mejor en términos de leyes y principios de la "*ciencia mecánica*".

Desde los primeros días de su aprendizaje como artista e ingeniero en Florencia, Leonardo había estado familiarizado con los principios básicos de la mecánica aplicada a las máquinas simples: palancas, tornillos, cuñas, poleas, balanzas y similares. Más tarde, aplicó estos principios en sus invenciones de máquinas más complejas y dispositivos mecánicos. Pero fue en Milán, cuando desarrolló un gran interés por las matemáticas e **hizo la transición desde la ingeniería a la ciencia**, que se convirtió en la motivación para estudiar la mecánica con un esfuerzo más sostenido y con mucha mayor profundidad. (CAPRA, 2007)

Fue en esta época cuando Leonardo comenzó a investigar los movimientos del cuerpo humano, descubriendo un papel mucho más amplio y “noble” para la ciencia de la mecánica. "*La ciencia instrumental o mecánica*", escribiría quince años más tarde en su Códice sobre el vuelo de los pájaros, "*es muy noble y más útil sobre todas las demás, porque por medio de ella (refiriéndose a la mecánica), todos los órganos animados que tienen movimiento realizan todas sus operaciones*". (CFB_0003r). La diferencia de esta afirmación con los pronunciamientos de los arquitectos de la visión mecanicista del mundo en los dos siglos posteriores es bastante notable. Para Descartes, Bacon y Newton, el valor último de la ciencia de la mecánica era la dominación humana de la naturaleza. Para Leonardo era el entendimiento y la imitación (en el caso del vuelo de los pájaros) del cuerpo de los animales en movimiento.

Para entender en detalle cómo los "instrumentos mecánicos" de la naturaleza trabajan juntos para mover el cuerpo, Leonardo se enfrascó en el estudio de problemas relacionados con los pesos, fuerzas y movimientos. Mostró cómo las articulaciones funcionan como bisagras, los tendones como cuerdas, y los huesos como palancas. Mientras estudiaba los principios elementales de la mecánica en relación con los movimientos del cuerpo humano, también aplicó estos estudios al diseño de numerosas máquinas nuevas, y como su fascinación por la ciencia de la mecánica no tenía límites, exploró temas cada vez más abstractos, a menudo luchando con problemas conceptuales que sólo pueden entenderse plenamente siglos después de su muerte.

3.5.2. El cuerpo humano ¿una máquina perfecta?

Estamos completamente de acuerdo con la afirmación de Capra:

"Comparar los brillantes logros de Leonardo sobre ingeniería mecánica y aplicarlos tan sólo a los principios de la mecánica del cuerpo como instrumentos mecánicos, es tentador, pero, en mi opinión, errónea al creer que Leonardo vio todo el cuerpo humano como una máquina." (CAPRA, 2013)

Muchos estudiosos sobre Leonardo tienen, implícita o explícitamente, tomada esta opinión. Kenneth Keele, por ejemplo, en su análisis de los estudios anatómicos y del cuerpo humano de Leonardo, publicado en 1983, se refirió en varias ocasiones a la "máquina humana", aparentemente parafraseando a Leonardo. (KEELE, 1983)

Una década después, Paolo Galluzzi hizo eco de esta percepción en su excelente libro *Ingenieros del Renacimiento: De Brunelleschi a Leonardo da Vinci*, cuando tituló una sección sobre los estudios anatómicos de Leonardo "El cuerpo humano como una máquina maravillosa." En los primeros párrafos de esta sección, Galluzzi citó la declaración de Leonardo que "la naturaleza no puede dar movimiento a los animales sin instrumentos mecánicos", y luego añadió los siguientes comentarios:

Leonardo trató de demostrar la estrecha analogía entre la máquina y el cuerpo. Observó los maravillosos logros de la naturaleza, donde las leyes del hierro gobiernan no sólo los instrumentos mecánicos, sino también los movimientos de los animales. (GALLUZZI, 1996)

Una vez más coincidimos con Capra en poner en duda las evaluaciones de Keele, Galluzi y otros historiadores que pretenden encasillar los estudios anatómicos de Leonardo tan sólo desde un enfoque puramente mecanicista, viendo el cuerpo humano como una máquina. Al igual que Capra, creemos que dicha conclusión está basada en una interpretación cartesiana injustificada de los escritos de Leonardo. Equivale a proyectar un modelo reduccionista y mecanicista del cuerpo humano sobre la visión científica que Leonardo tenía sobre el macro y el microcosmos, visión que era totalmente orgánica y sin ataduras entre la división mente-cuerpo introducida por Descartes unos cien años después del fallecimiento de Leonardo.

René Descartes basó su visión de la naturaleza en una división fundamental en dos reinos separados e independientes: el de la mente y el de la materia. El universo material era una máquina y nada más que una máquina. Trabajó estrictamente de acuerdo a las leyes mecánicas; todo en el mundo material podría ser explicado en términos de la disposición y movimientos de sus partes. Descartes amplió esta visión mecanicista de la materia para los organismos vivos. Las plantas y los animales, para él, eran simplemente máquinas. Los seres humanos estaban habitados por un alma racional, que era de origen divino. Pero el cuerpo humano era un mero autómatas, indistinguible de una máquina-animal. El cuerpo estaba

completamente divorciado de la mente, la única conexión entre los dos se explicaba únicamente por la intervención divina.

La forma de entender los organismos vivos por parte de Descartes y Leonardo era muy diferente. Para Leonardo, la naturaleza permite a los animales moverse con la ayuda de "*instrumentos mecánicos*", pero esto no significaba que los animales fueran máquinas. La diferencia fundamental es que, en opinión de Leonardo, el alma, que es inherente a todos los seres vivos, era el origen del movimiento corporal y era también "*compositor*" del cuerpo (*desso corpo compositore*), o fuerza formativa (WC_AS_0114v). El concepto del alma de Leonardo era muy diferente al de Descartes. Para él, el alma formaba un todo indivisible con el cuerpo, controlando tanto sus movimientos voluntarios e involuntarios. La gama de actividades del alma era diferente en las plantas, los animales y los seres humanos; aumentaba por etapas a medida que aumentaba la complejidad biológica. Leonardo integraba perfectamente el concepto de alma como agente de percepción, y como fuerza vital que subyace a la formación del cuerpo y en sus movimientos, mientras que Descartes, se aproximaba mucho a nuestro concepto moderno de cognición. (CAPRA, 2007).

"¿Por qué la naturaleza no puede proveer de movimientos a los animales sin instrumentos mecánicos," Leonardo lo escribió en sus Estudios Anatómicos, *"está demostrado por mí en este libro los movimientos activos provocados por la naturaleza en los animales."* (WC_AS_0153r). Parece bastante claro que él se refería aquí a los movimientos voluntarios de los animales, que se conseguían por medio de instrumentos mecánicos, pero se originaban y eran controlados por el alma, muy diferente del animal-autómata de Descartes.

En muchos pasajes de los manuscritos de Leonardo, se maravillaba ante la belleza y la gracia que surgen de las interacciones sutiles entre los cuerpos y las almas de los animales. Por ejemplo, se observa que los procesos cognitivos delicados (como diríamos en lenguaje científico moderno) de un pájaro en vuelo serán siempre superiores a los de un piloto humano dirigiendo una máquina voladora:

Se podría decir que a dicho instrumento diseñado por el hombre tan sólo le faltaba el alma del pájaro, que debía ser falsificado con el alma del hombre. Sin embargo, el alma del pájaro ciertamente respondería mejor a las necesidades de sus miembros de lo que lo haría el alma del hombre, separado de ellos y especialmente de sus movimientos de balanceo casi imperceptibles. (CA_0434r)

A veces incluso se puede discernir un fino sentido del humor en la insistencia de Leonardo en que los movimientos de los animales no eran puramente mecánicos. "*La naturaleza no busca contrapesos cuando ella ya se encarga de fabricar los órganos adecuados para el movimiento de los cuerpos de los animales*", reflexiona en otro de los folios de sus Estudios Anatómicos, *"pero ella coloca en el interior del cuerpo el alma, el compositor de este cuerpo"*. (WC_AS_0114v). Resaltar este pasaje como una declaración clara de la integración de la naturaleza del alma como batuta y motor del cuerpo.

De los pasajes citados arriba y de la naturaleza general de su ciencia como ciencia de las formas orgánicas, cualidades y transformaciones, parece evidente que el enfoque de Leonardo sobre anatomía no era mecanicista, al menos no en el sentido cartesiano. Él claro que hablaba que la anatomía de los animales y la de los seres humanos implicaban funciones mecánicas, y por supuesto que ésta fue la principal motivación en sus extensos estudios de "la ciencia mecánica." Pero estos estudios siempre se deben enmarcar en un contexto orgánico conceptual mucho más amplio.

De vez en cuando Leonardo se refiere a los sistemas anatómicos complejos como "máquinas". En un folio de sus Estudios Anatómicos nos muestra el conjunto de músculos que controlan los complejos movimientos de la cabeza, y en otro folio, los músculos superficiales del muslo utilizando el término "*ésta, nuestra máquina*", en un repentino y maravilloso arrebató de asombro sobre la complejidad del cuerpo. (WC_AS_0179v y 0148v). En ambos párrafos el término "máquina" se tiene que entender como un sistema complejo de funciones mecánicas, más que el cuerpo como un todo.

En otras ocasiones, Leonardo utilizó el término "máquina" para referirse a los fenómenos en el macrocosmos. Se refería al agua como "*el humor vital de la máquina terrestre*," (MsH_0095r), y del flujo y reflujo de las mareas como "*la respiración de esta máquina que es la Tierra*." (CL_0017v). Es evidente que aquí de nuevo "máquina" no debe ser tratado en un sentido cartesiano, debe entenderse como un sistema de vida compleja, alimentada por el agua, con las mareas moviéndose rítmicamente como la respiración y el flujo de la sangre en el cuerpo humano, y animada por una fuerza vital de crecimiento, o "*alma vegetativa*".

Leonardo da Vinci creó una síntesis única entre arte, ciencia, y diseño (CAPRA, 2007). Él era un genio de la mecánica que inventó un sin número de máquinas y dispositivos mecánicos, y mantuvo un vivo interés en la teoría de la mecánica durante la mayor parte de su vida madura. Sin embargo, su ciencia en su conjunto no era mecanicista. Él veía el mundo como una infinita variedad de formas de vida continuamente conformadas por procesos fundamentales, y patrones de organización que se repiten en el macro y el microcosmos. Formuló modelos mecánicos cuando pensaba que ayudarían a comprender los fenómenos naturales, pero a diferencia de los científicos de siglos posteriores, él nunca consideró el mundo en su conjunto, ni el cuerpo humano, como nada más que una máquina.

3.5.3. Las máquinas de Leonardo.

A lo largo de su vida adulta, y sobre todo durante sus años en la corte de los Sforza en Milán, Leonardo era famoso no sólo como artista sino también como ingeniero mecánico. Sus deberes como pintor de la corte e "ingeniero ducal" incluían, además de la pintura de retratos y el diseño de los desfiles y fiestas, una variedad de pequeños trabajos de ingeniería que exigió ingenio y habilidades en el manejo de materiales. Muchos talentos creativos de Leonardo eran perfectamente adecuados para estas tareas. Inventó un gran número de dispositivos asombrosos durante este tiempo, que le confirió una gran reputación como ingeniero-mago en la corte.

Entre sus inventos se podían encontrar puertas que se abren y cierran automáticamente por medio de contrapesos; una lámpara de mesa con intensidad variable, muebles plegables; un espejo octogonal que generaba un infinito número de imágenes; y un ingenioso asador, en el que "*el asado se volverá lento o rápido, dependiendo de si el fuego es moderado o fuerte*." (CA_0021r).

Leonardo no limitó sus habilidades de ingeniería para estos aparatos sino que inventó numerosas máquinas de carácter mucho más industrial. Estos incluyen una variedad de máquinas textiles de hilado, de tejido, de bobinado del cáñamo, de máquinas de hacer agujas, así como máquinas para la fundición y el forjado de metal, máquinas de corte de madera y pulido de piedra, máquinas de moler, en resumen, las máquinas para las industrias básicas de su tiempo (PEDRETI, 1999).

Un tipo especial de máquina fueron los instrumentos de medición que Leonardo inventó y diseñó para sus experimentos científicos. En particular, hizo muchos intentos de mejorar los mecanismos de relojería para la medición del tiempo, que todavía estaba en paños menores por aquella época. En el Códice Madrid I, Leonardo mostró de forma sistemática los principales componentes de un reloj mecánico: el uso del resorte como la fuerza motriz y del

caracol (un tambor cónico) para compensar la disminución de la fuerza del resorte; transmisiones de potencia a través de trenes de engranajes; y varias formas de sistemas de regulación de movimientos conocidos como escapes. (RETI,1974) Todos estos elementos se analizan en detalle y están representados en dibujos de un acabado excelente sobre todo en el Códice de Madrid I y son comentados ampliamente en el capítulo 5 de la presente tesis Leonardo: Ingeniero Mecánico.

Además de la ingeniería mecánica, Leonardo también se dedica ampliamente a la ingeniería civil y militar, algunos de sus logros se muestran también en los capítulos 4 y 7 (Leonardo: Ingeniero Militar e Ingeniero Civil). Fue conocido como uno de los ingenieros hidráulicos más importantes de Italia y durante sus años en la corte de los Sforza fue probablemente responsable de todas las obras hidráulicas en Lombardía. Mejoró los sistemas existentes de canales, inventó máquinas especiales para cavar canales, y hábilmente insertó pequeñas presas en los ríos para evitar daños a las propiedades a lo largo de sus bancadas.

Uno de sus más ambiciosos, pero no realizadas proyectos hidráulicos era una vía navegable entre Florencia y Pisa. Leonardo imaginaba que esta vía fluvial proporcionaría riego para tierra seca y también podría servir como un canal "industrial", proporcionando energía para numerosos molinos que producirían seda y papel, para las ruedas motrices de los alfareros, para la limpieza y corte de la madera y para la laminación del metal. En el capítulo 6 de la tesis mostramos parte de su trabajo (Leonardo: Ingeniero Hidráulico).

Como ingeniero militar, Leonardo fue consultado con frecuencia acerca de las estrategias de la guerra, y a menudo respondió con diseños ingeniosos de nuevas fortificaciones y grandiosos planes para represar o desviar ríos para conquistar las tropas enemigas. La mayor parte de su trabajo para los gobernantes militares consistió en el diseño de estructuras para defender y preservar los pueblos y ciudades. Sin embargo, también diseñó máquinas extravagantes de destrucción, bombardas, balas de cañón explosivas, catapultas, ballestas gigantes, y similares. Al mismo tiempo, paradójicamente, se opuso vehementemente a la guerra, a la que él llamaba una "locura bestialísima" (*pazzia bestialissima*). Esta aparente contradicción se puede explicar ya que Leonardo estaba en constante necesidad de disponer de un ingreso estable que le permitiera proseguir su investigación científica, y él astutamente se basó en sus grandes habilidades en ingeniería mecánica para asegurarse una independencia financiera, ofreciendo diseños de impresionantes máquinas de guerra. Por otra parte, él pudo haber sido consciente de que la mayoría de estos diseños nunca se realizarían.

Sin embargo, también se desprende de los cuadernos de Leonardo que estaba fascinado por los motores destructivos de la guerra, tal vez de la misma manera que los cataclismos naturales y los desastres le fascinaban. Puede que no seamos capaces de resolver la contradicción entre su postura pacifista y sus servicios como ingeniero militar, pero puede que tengamos que aceptarlo como una de las muchas contradicciones en la compleja personalidad de un gran genio. (CAPRA, 2007).

Contribuciones sobresalientes de Leonardo en ingeniería mecánica, civil y militar se discuten ampliamente en varios libros, entre ellos el hermoso volumen de *Ingenieros del Renacimiento: De Brunelleschi a Leonardo da Vinci*, por el historiador de la ciencia Paolo Galluzzi. (GALLUZZI, 1996). No se puede estudiar la figura de Leonardo sin mencionar a una de los leonardistas más prestigiosos del mundo que ha dedicado toda su vida a estudiarlo, nos referimos a Carlo Pedretti. Uno de sus numerosos libros que hemos tenido el placer de consultar ha sido su ya clásico *Leonardo: Las Máquinas* (PEDRETTI, 1999). Sus dibujos técnicos son exhibidos con frecuencia en todo el mundo, a menudo complementados con modelos de madera que muestran detalladamente cómo las máquinas funcionan como se habían previsto.

La combinación de artista-ingeniero no era inusual en el Renacimiento Verrocchio, el maestro de Leonardo en su juventud, por ejemplo, era un renombrado orfebre, escultor y

pintor, así como un ingeniero de buena reputación. El gran arquitecto renacentista Filippo Brunelleschi primero se ganó su reputación en Florencia como escultor y más tarde, cuando ya era famoso también como arquitecto, fue aclamado por su genio inventivo como ingeniero. El joven Leonardo lo admiraba mucho y colaboró con el gran arquitecto dibujando varios planos de dispositivos de elevación para coronar la cúpula del Duomo de Florencia.

Lo que hizo que Leonardo fuera único como ingeniero, fue que muchos de los nuevos diseños que presentó en sus manuscritos incluían avances tecnológicos que no se desarrollarían hasta varios siglos después. Aún más importante, él era el único entre los famosos ingenieros renacentistas que hicieron la transición desde la ingeniería a la ciencia. Entender cómo algo funcionaba no era suficiente para él; también necesitaba saber por qué. Por lo tanto fue parte importante en un proceso inevitable que puso en marcha para llevar la tecnología y la ingeniería hacia la ciencia pura.

En primer lugar, se cuestiona la construcción de ciertas máquinas, que le lleva a plantearse el primer principio de la dinámica; por último, intenta responder a cuestiones que nunca se habían hecho antes sobre la naturaleza de los vientos, las nubes, la edad de la tierra, la generación, el corazón humano. La mera curiosidad se ha convertido en una investigación científica profunda, independiente de los intereses técnicos que la podrían haber originado.

La transición de Leonardo del estudio de la tecnología empírica medieval a la mecánica teórica comenzó con la aparición de su gran interés por las matemáticas durante su primer período en Milán, cuando él tenía unos treinta y tantos años. Un acontecimiento importante fue la visita a la cercana ciudad de Pavía en 1490. Leonardo fue allí junto con el arquitecto Francesco di Giorgio en nombre del duque de Milán para inspeccionar el trabajo en la catedral de la ciudad.

En Pavía, Leonardo se reunió con el matemático Fazio Cardano, especialista en la "*ciencia de la perspectiva*", que en el Renacimiento incluía la geometría y la óptica geométrica. Debates de Leonardo con Cardano encendieron su pasión por las matemáticas que permanecerían con él hasta su vejez. Mientras que su compañero, arquitecto e ingeniero Francesco regresó a Milán al finalizar su trabajo, Leonardo se quedó en Pavía seis meses para consolidar su comprensión de la geometría con estudios realizados en la deslumbrante Biblioteca de Pavía, de fama mundial. (CAPRA, 2007)

Inmediatamente después de su regreso a Milán comenzó dos nuevos cuadernos, ahora conocido como manuscritos A y C, en el que aplica su nuevo conocimiento de la geometría a un estudio sistemático de la perspectiva y de la óptica, así como a los problemas elementales de la mecánica. Los razonamientos geométricos para el análisis de máquinas de Leonardo eran muy originales. Inspirado, muy probablemente, por sus discusiones con Cardano en Pavía sobre los *Elementos* de Euclides, comenzó a separar los mecanismos simples, o "elementos" de las máquinas en las que fueron ensamblados. Esta separación conceptual no surgió de nuevo en la ingeniería hasta el siglo XVIII. (RETI, 1974)

De hecho, Leonardo en ese momento planeaba (e incluso podría haberlo escrito) todo un tratado sobre Elementos de Máquinas, en la que iba a usar la geometría para analizar los mecanismos básicos en términos de principios elementales de la mecánica, la transmisión de la energía y el movimiento, la medición de fuerzas, y así sucesivamente. Este análisis no sólo fue importante para Leonardo para comprender y mejorar en los mecanismos ya existentes, sino también con el propósito "muy noble" de la comprensión de las acciones individuales de los músculos, los tendones y los huesos en la generación de movimientos corporales.

El tratado de Leonardo sobre Elementos de Máquinas, si alguna vez fue escrito, se perdió. Pero su Códice Madrid I contiene extensos estudios preparatorios para un tratado tal y como se ha comentado. En este manuscrito, escrito a finales de los años 1490, mientras él también estaba completando La Última Cena, Leonardo analizó más de veinte mecanismos

elementales con innumerables variaciones, tornillos, palancas, bisagras, muelles, acoplamientos, engranajes, poleas, y así sucesivamente. Como historiador de la tecnología Ladislao Reti ha demostrado en su análisis profundo y hermoso del Códice Madrid, que los elementos de Leonardo de máquinas incluyen todos los dispositivos mecánicos que se describen en el trabajo de los académicos franceses de principios del siglo XIX de la Escuela Politécnica, que es considerado tradicionalmente como el primer estudio sistemático de los mecanismos elementales. (RETI, 1974)

Los mecanismos descritos en el Códice Madrid eran bien conocidos por los ingenieros del Renacimiento, aunque Leonardo inventó muchas nuevas versiones y variaciones entre ellos. Sin embargo, ninguno de sus predecesores y contemporáneos había analizado en detalle cómo funcionaban. Durante siglos, los animales se habían unido a los carros con dispositivos de tracción; los hombres usaban las manivelas, trabajaban con herramientas mecánicas a mano. Las máquinas simples fueron construidas y utilizadas de acuerdo a la tradición sin preguntarse cómo se podría reducir el rozamiento o mejorar la transmisión de la potencia muscular.

El enfoque de Leonardo era profundamente diferente. Él nunca se dejó llevar por las soluciones tradicionales sin cuestionarlas, sino todo lo contrario, las analizaba de acuerdo con las normas y principios mecánicos deducidos de la observación y de la experimentación. Prestó especial atención a la transmisión de la energía y al movimiento de un plano sobre otro, lo cual fue un gran reto de la ingeniería del Renacimiento. Un ejemplo muy complejo es el diseño de un molino de accionamiento hidráulico para extraer simultáneamente y estirar duelas metálicas (laminar barras de cañón). La ilustración de Leonardo de su diseño (Fig. 3.1) muestra un conjunto de máquina de quince conexiones en las que la potencia inicial de la turbina de agua (en la parte inferior izquierda del conjunto) se transmite hasta tres veces diferentes entre ejes verticales y horizontales con la ayuda de una combinación de ruedas y engranajes helicoidales dentados. Cada vez que la potencia aumenta doce veces, la velocidad de giro disminuye sucesivamente hasta que llega a la rueda sólida y robusta (en la parte superior derecha del conjunto) que presiona sobre las barras de cañón debajo de ella. La transmisión de la potencia está claramente indicada por Leonardo en un pequeño diagrama bajo el dibujo principal en el que las relaciones de potencia se indican numéricamente para cada engranaje.

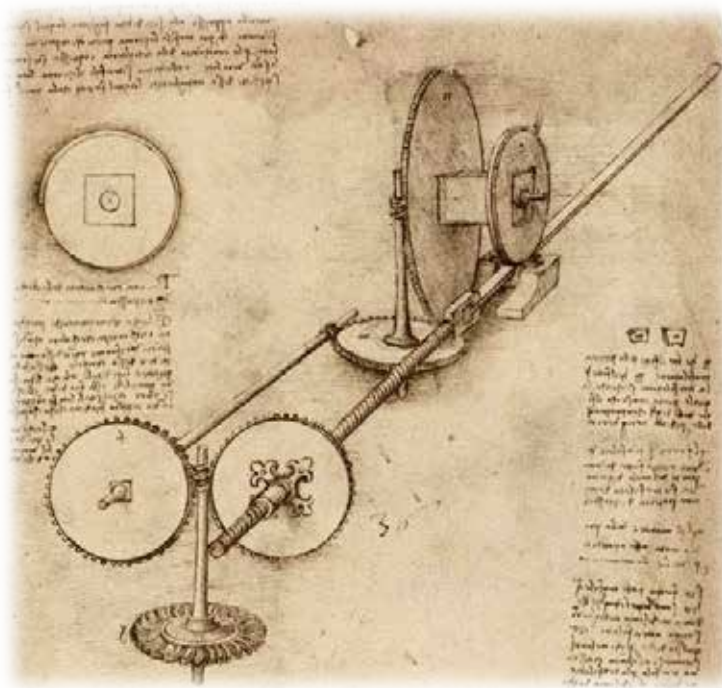


Figura 3.1: Máquina para estirar duelas metálicas.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0010r (detalle)

Este dibujo (ver también el apartado 7.2.8 de la presente tesis donde se muestra el folio completo) es un espléndido ejemplo de la extraordinaria capacidad de Leonardo de coordinar funciones mecánicas complejas, analizando con precisión y presentando la solución con una gran claridad. Desde el momento en que se interesó por las matemáticas en la Universidad de Pavía, su trabajo en ingeniería mecánica se puede decir que ya estuvo siempre ligado al análisis de sus máquinas en términos geométricos y principios mecánicos.

3.5.4. Leonardo y La Ciencia de los Pesos.

Leonardo comenzó sus estudios teóricos de la mecánica con la "*ciencia de pesos*", conocido hoy como la **estática**, que se ocupa del análisis de cargas y fuerzas de los sistemas físicos en equilibrio estático, como balanzas y palancas. En el Renacimiento como en la actualidad, este conocimiento era muy importante para los arquitectos e ingenieros, y de la ciencia medieval de pesos provenía una gran colección de obras compiladas a finales de los siglos XIII y XIV, que Leonardo estudió ampliamente. Algunos de ellos fueron tratados y fragmentos traducidos del griego o del árabe, por lo general atribuido a Euclides o Arquímedes, mientras que otros fueron escritos originales de autores medievales. (MOODY, CLAGETT, 1952).

Los fundamentos matemáticos de la estática se establecieron en la antigüedad por el gran matemático y científico Arquímedes en un tratado titulado *Sobre el equilibrio de los planos*, que contiene sus determinaciones exactas de los centros de gravedad y su demostración de la ley general de la palanca. Las demostraciones matemáticas de Arquímedes eran puramente geométricas, lo que encandiló a Leonardo y le llevó a declarar con entusiasmo que "*la mecánica es el paraíso de las ciencias matemáticas.*"(MsE_0008v).

De los autores medievales, Leonardo indagó más profundamente sobre dos obras de Jordanus Nemorarius, un matemático del siglo XIII sobre el que casi no se sabe nada, pero que dejó varios tratados sobre matemáticas y mecánica que muestran una considerable habilidad y originalidad. Leonardo leyó las dos principales obras de Jordanus sobre estática, *Elemental de ponderibus* (Elementos de la ciencia de los pesos) y *De ratione ponderis* (Sobre la naturaleza del peso), siendo esta última una versión muy ampliada y mejorada del *Elemental*.

Como era habitual, Leonardo absorbió las ideas clave de los mejores y más originales textos en el corpus de la ciencia medieval de los pesos, comentó sobre algunos de sus postulados en sus manuscritos, que verificó experimentalmente, y refutó algunas pruebas incorrectas. El Códice Atlántico, en particular, contiene varias páginas de su traducción al italiano de diversos postulados de los *Elementos* de Jordanus y *De ratione ponderis*, probablemente a partir de un único manuscrito que contenía ambas obras. (CA_0416v, 0499r, 0450cr).

“La relación de los pesos que sujetan los brazos de la balanza paralelo al horizonte es la misma que la de los brazos, pero en razón inversa.” (CA_0481r)

En el Códice Arundel, Leonardo expresa la ley de la palanca de la siguiente forma:

“Multiplicar el brazo más largo de la balanza por el peso que soporta y dividir el producto por el brazo más corto, y el resultado será el peso que, cuando se coloca en el brazo más corto, resiste el descenso del brazo más largo, los brazos de la balanza estarían en equilibrio desde el principio.” (CAr_0001v).

Leonardo utilizó la ley de la palanca para calcular las fuerzas y pesos necesarios para establecer el equilibrio en numerosos sistemas simples y compuestos que implicaban a balanzas, palancas, poleas y pesos colgando de cuerdas. Además, analizó cuidadosamente las

tensiones en varios segmentos de las cuerdas, probablemente con el fin de estimar las tensiones similares en los músculos y tendones de las extremidades humanas.

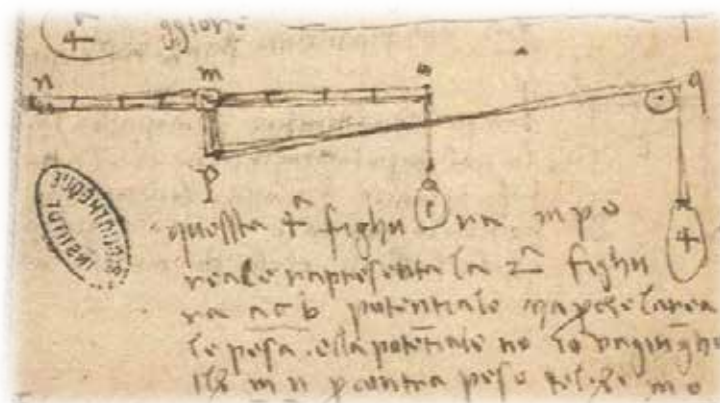


Figura 3.2: Eje de la balanza, polea y peso.
Instituto de Francia (París), Manuscrito B de Francia, f. 0065r

El historiador de la ciencia Marshall Clagett ha examinado los diagramas de Leonardo y analizado los principios de la estática minuciosamente. (CLAGETT, 1999) Clagett hace hincapié en que Leonardo aplica la ley de la palanca, no sólo para situaciones en las que las fuerzas actúan en una dirección perpendicular a los brazos de la palanca, sino también en fuerzas que actúan en varios ángulos. El Códice Arundel y el Manuscrito E contienen numerosos diagramas de diversa complejidad con pesas que ejercen fuerzas en diferentes ángulos a través de cuerdas y poleas. Leonardo reconoce que en tales casos la longitud relevante en la ley de la palanca no es la longitud real del brazo de palanca sino la distancia perpendicular desde la línea de la fuerza al eje de rotación. Llamó a esa distancia el "brazo potencial de la palanca" (*braccio potenziale*) y los remarcó claramente en muchos de sus diagramas.

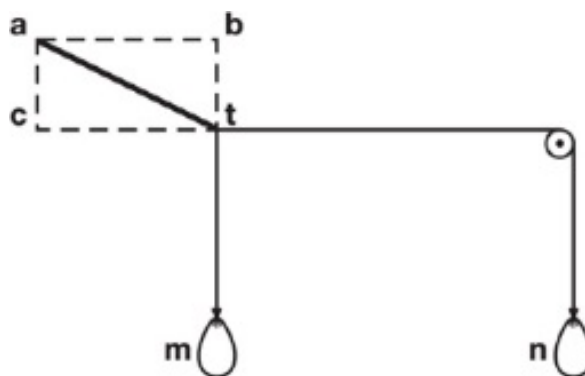


Figura 3.3: Viga pivotante que está en equilibrio con dos fuerzas en ángulos diferentes.
Representación esquemática. Manuscrito B de Francia, f. 0065r (CLAGETT, 1999)

En uno de los diagramas estudiados del Manuscrito E (figs. 3.2 y 3.3), por ejemplo, Leonardo muestra una barra que pivota en un extremo en el punto a con un peso m suspendido de su otro extremo en el punto t . Un segundo peso n ejerce una fuerza horizontal a través de una cuerda tendida sobre una polea. El problema es determinar los pesos m y n necesarios para mantener la barra en equilibrio. En su solución, Leonardo identifica los dos brazos potenciales de palanca ab y ac , y afirma correctamente que, en el equilibrio, los pesos m y n serán inversamente proporcionales a las distancias ab y ac .

En la estática moderna, el brazo potencial de la palanca se conoce como el "brazo del momento" y el producto del brazo de momento y la fuerza se denomina el "momento de la

fuerza” o *par*”. Leonardo reconoce claramente el principio de que la suma de los momentos respecto cualquier punto debe ser cero para que un sistema permanezca en equilibrio estático. Según Clagett, este descubrimiento fue su contribución más original a la estática, va mucho más allá de la ciencia medieval de pesos de su tiempo.

3.5.5. Fluidos en equilibrio.

Mientras Leonardo estaba experimentando con balanzas palancas y poleas para explorar las leyes que rigen los sistemas mecánicos en equilibrio estático, también estudió el equilibrio de los fluidos, conocido hoy como la hidrostática. En los Códices de Madrid, que contiene la mayor parte de sus primeras investigaciones de la *“ciencia de los pesos”*, encontramos también anotaciones sobre la presión del agua y referencias al principio de Arquímedes, así como dibujos de escalas de medición de la flotabilidad de los pesos sumergidos en agua.

Desde la antigüedad, la hidrostática había sido considerada una disciplina independiente, sin relación con el estudio del flujo de agua (ahora conocida como la hidrodinámica). Sus principios generales se habían enunciado claramente por Arquímedes en su texto clásico *Sobre los cuerpos flotantes*. Este tratado contiene, en particular, el famoso principio que ahora lleva su nombre “el principio de Arquímedes”. Se establece que la fuerza de empuje sobre un objeto sumergido es igual al peso del fluido desplazado por el objeto.

La mayor parte del trabajo teórico de Arquímedes estaba tan avanzado que no fue bien comprendido ni por sus contemporáneos ni por generaciones venideras. (CAPRA, 2007) Traducciones de diversos fragmentos de la hidrostática se transcribieron en varios textos medievales, generalmente sin una comprensión clara de los principios subyacentes. Estos textos podrían haber dado a Leonardo sólo un conocimiento incompleto de la hidrostática de Arquímedes.

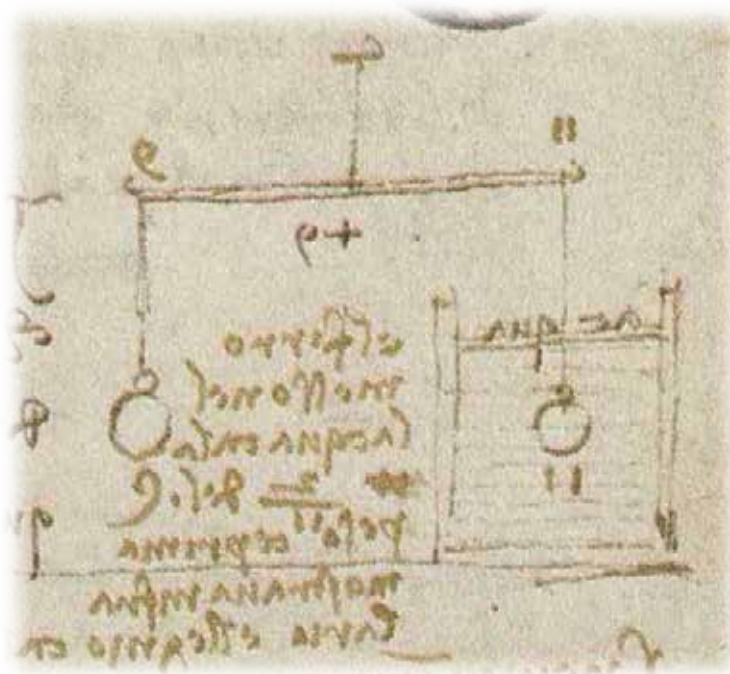


Figura 3.4: Experimento para determinar la fuerza de empuje.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0181r

Leonardo tenía ciertamente un conocimiento general de la flotabilidad. Él sabía que los objetos pesan menos en el agua que en el aire e incluso trató de determinar la diferencia experimentalmente. Dos dibujos similares en el Códice de Madrid I, muestran los pesos que cuelgan de una escala, uno de los pesos en el aire y el otro sumergido en el agua contenido en

un recipiente. (CM1_0181r, CM2_0080r) En el Códice Madrid I (fig. 3.4), el texto que acompaña la ilustración menciona varios experimentos de ese tipo y enumera los resultados cuantitativos. Leonardo también conocía el principio básico de flotabilidad de los cuerpos. Un folio anterior en el mismo Códice de Madrid I muestra un pequeño boceto elegante de un barco flotando junto con el siguiente comentario (fig 3.5): "*Pesa igual el agua que sale del lugar donde un barco flota, como el peso del propio barco.*" (CM1_0123v, CF2_0065v). Sin embargo, Leonardo nunca declaró plenamente el principio de Arquímedes. Él conocía la fórmula para objetos flotantes, pero parece haber sido consciente de que una fórmula similar valía para objetos sumergidos. Numerosas notas de Leonardo sobre la hidrostática hacen evidente que llegó sólo a un conocimiento parcial de las leyes de flotabilidad de Arquímedes.

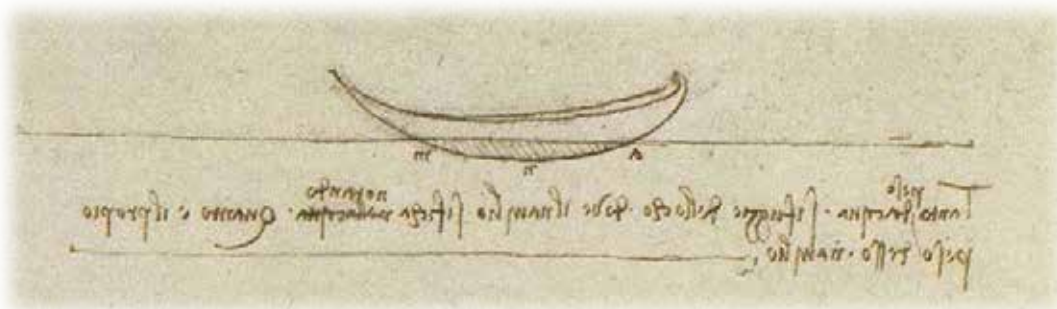


Figura 3.5: Ilustración de la cantidad de agua desplazada por un barco flotante.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0123v (detalle)

Es interesante examinar con detalle lo que impidió a Leonardo comprender plenamente el principio de Arquímedes. Para entender el origen de la fuerza de empuje, era necesario saber que la presión del agua aumenta con la profundidad, y que el aumento de la presión se ejerce en todas las direcciones. Como consecuencia, hay una fuerza neta hacia arriba en la parte inferior de un objeto sumergido.

La medición de la variación de la presión del agua con la profundidad por medio de una serie de placas móviles, sostenidas por contrarrestar las fuerzas que se generan por los pesos y se transmiten a las placas a través de cadenas y poleas.

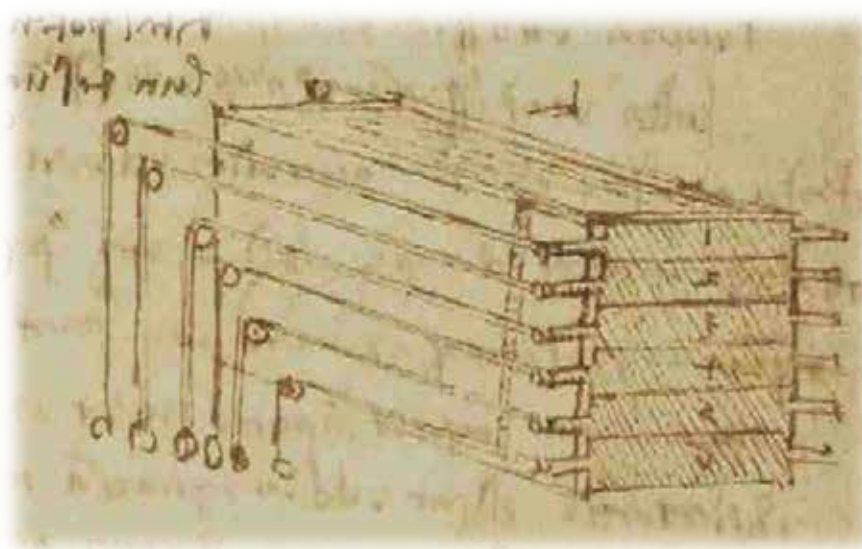


Figura 3.6: La medición de la variación de la presión del agua con la profundidad por medio de una serie de placas móviles, sostenidas por contrarrestar las fuerzas que se generan por los pesos y se transmiten a las placas a través de cadenas y poleas.
Colección privada de Bill Gates. Seattle (EEUU), Códice Leicester, f. 0006r (detalle)

Leonardo sabía, al menos en sus últimos años, que la presión de agua en un depósito actúa en las paredes verticales y aumenta desde la superficie hasta la parte inferior. En el Códice Leicester, que escribió cuando contaba ya cincuenta y tantos años, representó un experimento muy ingenioso diseñado para medir el aumento de la presión con la profundidad (Fig. 3.6). Como se describe en el texto que acompaña, el experimento consiste en un tanque de agua *"en el que una de las paredes es un pergamino suelto, sostenido por una hilera de placas, como muestra el dibujo, en el que pones en las placas el peso opuesto como para sostener precisamente esas placas que están en contacto con la parte delantera del depósito de agua antes mencionado."* (CL_0006r). Si Leonardo hubiera llevado a cabo realmente este experimento, habría advertido como se incrementa linealmente la presión con la profundidad.

A pesar de su conocimiento de la variación de la presión del agua, habría sido difícil para Leonardo razonar que el peso de una bola sumergida en un recipiente de agua se equilibra con la presión ascendente neta. Esta sofisticada comprensión de la distribución de la presión del agua de Arquímedes se había perdido durante siglos y no sería redescubierta por Blaise Pascal hasta 150 años después de Leonardo. Además, el concepto de que el peso de una porción de agua, se sumerge en el agua circundante a llenar el depósito, era ajeno a Leonardo. Durante la mayor parte de su vida, él aceptó la visión aristotélica de que *"todos los elementos no pesan en su propia ámbito, pero poseen peso fuera de su ámbito."*(CL_0026v). Esta teoría aristotélica de la gravedad, que era comúnmente aceptada en la Edad Media y en el Renacimiento, hacía difícil, si no imposible, entender el equilibrio hidrostático de una porción de agua como el equilibrio entre su peso y la presión neta hacia arriba del agua que lo rodea.

La visión aristotélica de un estado de ingravidez natural de los elementos también impidió Leonardo desarrollar una concepción sofisticada de la presión del agua, que era esencial para una comprensión completa del principio de Arquímedes. Él era consciente de la presión generada por un pistón, pero tenía grandes dificultades en la conceptualización de una distribución de la presión del agua en su estado "natural".

La presión en los fluidos es un concepto de la hidrostática moderna donde se define como la fuerza (o peso) por unidad de área. Como físico y estudioso de Leonardo, Enzo Macagno destacó en sus estudios detallados de los escritos sobre hidrostática de Leonardo (MACAGNO, 1982), que esta definición era difícil de aceptar en la Edad Media y el Renacimiento, ya que requería la división de dos cantidades de diferentes dimensiones, una fuerza por un área. Tales divisiones o multiplicaciones, fueron plenamente aceptadas sólo en el siglo XVII, cuando la geometría fue reemplazada por el álgebra, lenguaje matemático mucho más potente, capaz de expresar las relaciones entre cantidades físicas en términos de ecuaciones abstractas.

Debido a estas limitaciones matemáticas, Leonardo y sus contemporáneos nunca alcanzaron más que una comprensión cualitativa de la presión de los fluidos. El primero en hacer una relación completa de la distribución de la presión en un fluido en equilibrio hidrostático fue el matemático y filósofo Blaise Pascal en el siglo XVII. Su formulación es ahora conocida como el principio de Pascal. Se establece que la presión aplicada a un fluido confinado en cualquier punto se distribuye sin disminuir a través del fluido en todas las direcciones y actúa sobre cada parte de la superficie de confinamiento del recipiente en ángulo recto.

Leonardo tuvo problemas con el concepto de presión durante muchos años sin llegar a entenderlo del todo. Como historiador de la ciencia Constantino Faso tiene documentadas que algunas páginas de los manuscritos de Leonardo muestran anticipaciones de ideas esenciales que se formulan con claridad en siglos posteriores, mientras que otras páginas contienen declaraciones confusas y contradictorias (FASSO, 1987) Por ejemplo, el Códice Madrid I, en la que Leonardo escribió sus primeras investigaciones sobre hidrostática, ya muestra una

evidente, aunque imprecisa, anticipación del principio de Pascal. Al lado de un boceto de un peso colocado en una bota de vino, hay una nota al margen: "*En cualquier parte de la piel se siente igual la presión del peso.*" (CM1_0169r). Pero en otros lugares en el mismo manuscrito, Leonardo da una calificación errónea de una situación similar. Representa un recipiente lleno de agua sobre el que se ejerce presión por un peso a través de un colchón de aire, y se comenta que el aumento de la presión "*empuja... en todas las partes de dicho recipiente en forma y proporción ejercida antes por el agua solamente.*" (CM1_0148v). En otras palabras, se supone que el aumento de la presión no es constante a través del recipiente (como se indica en el principio de Pascal), pero varía con la profundidad en proporción a la presión hidrostática que existía antes de la aplicación del peso.

Incluso los escritos de madurez de Leonardo sobre la hidrostática en el Códice Leicester no están libres de tales contradicciones. La descripción de su brillante experimento para medir la variación de la presión del agua con la profundidad (ver fig. 3.6) es un buen ejemplo. Después de afirmar correctamente que la presión sobre las paredes verticales aumenta desde la superficie hasta el fondo del recipiente, y describir la forma de medir el aumento, Leonardo añade unas líneas en las que confunde la cuestión de nuevo. "*La misma regla*", afirma, "*se puede utilizar en el fondo para determinar en qué parte del fondo del recipiente el agua presiona más sobre el propio fondo.*" (CL_0006r). Es evidente que, al menos en el momento de escribir estas líneas, Leonardo no era consciente de que la presión del agua se distribuye por igual en planos horizontales.

En otro folio en el mismo Códice Leicester, unas páginas después de las declaraciones contradictorias mencionadas anteriormente, nos encontramos con la discusión más madura de Leonardo sobre la presión hidrostática. Una vez más, se considera un vaso lleno de agua a la que se aplica una presión a través de una abertura en la parte superior:

"El agua, presionada por la boca del vaso", escribe, "adquiere en contacto con ese recipiente una presión uniforme [potencia]. El agua, debido a que es presionada, adquiere esta presión uniforme, además de la presión desigual que existía en el agua antes, ya que es evidente que el agua por sí mismo ejerce más peso en un orificio en la parte inferior del recipiente que en la superficie, y por cada grado de profundidad adquiere los mismos grados de peso." (CL_0011r).

Comparando esta anotación con la que se había mencionado anteriormente en el Códice de Madrid, en la que se describe el mismo experimento escrito unos diez años antes, hace evidente que los pensamientos de Leonardo sobre la presión hidrostática han madurado significativamente durante los años intermedios. En el código Leicester, afirmó de manera inequívoca y correcta que la presión ejercida sobre el agua por un peso se distribuye uniformemente a través del recipiente, y que la presión del agua total resultante se compone de dos partes: la presión hidrostática original que es desigual, aumentando de la superficie al fondo, y la presión constante que se añade a través de la aplicación del peso. Por otra parte, afirma correctamente que la presión hidrostática original aumenta linealmente con la profundidad.

Parece que el único defecto en el análisis de Leonardo es la falta de una definición explícita de presión como fuerza (o peso) dividido por el área, y por lo tanto se muestra una ligera confusión entre presión y peso. De lo contrario, esta declaración en el Códice Leicester sería una clara anticipación de principio de Pascal.

Otro fenómeno de la hidrostática que desconcertó mucho a Leonardo era el equilibrio de los líquidos en los vasos comunicantes, que era bien conocido en su época "*Las superficies de todos los líquidos en reposo que se unen entre sí por debajo son siempre de la misma altura*", señaló correctamente en el Códice Atlántico (CA_589v). En la "*ciencia de los pesos*" medieval, las preguntas de la estática siempre habían sido tratadas mediante la aplicación de las leyes del equilibrio de la balanza, y por tanto era natural que Leonardo y otros ingenieros

del Renacimiento utilizaran el mismo enfoque para tratar de explicar la ley de los vasos comunicantes. La analogía de una balanza en equilibrio con brazos iguales, cargado por los pesos del agua en los dos vasos, es correcta sólo cuando los dos vasos son iguales. Cuando un recipiente es más grande, el equilibrio hipotético puede estar en equilibrio sólo si la superficie del agua es más alta en el recipiente más pequeño. Esto es contrario a la evidencia experimental, ya que Leonardo no debió darse cuenta.

La resolución de esta paradoja de cómo una pequeña cantidad de agua en un lado puede equilibrar una cantidad grande en el otro lado, requiere la plena comprensión de la presión hidrostática alcanzado por Pascal en el siglo XVII. De acuerdo con el principio de Pascal, la presión hidrostática debe ser la misma en todos los planos horizontales para que el agua esté en equilibrio. Esto significa que la altura bajo las superficies debe ser la misma, pero sus áreas son irrelevantes ya que la presión es igual al peso por unidad de área.

A falta de este sofisticado concepto de presión, Leonardo nunca logró resolver completamente la paradoja de los vasos comunicantes. Sin embargo, sí encontró una explicación ingeniosa durante sus primeras reflexiones sobre la hidrostática. En el Códice Madrid I, hay un esbozo de vasos comunicantes de tamaño desigual con los niveles de agua a la misma altura indicada correctamente (fig. 3.7). En este dibujo, Leonardo ha dividido el agua en el recipiente más grande en varias columnas. En el texto que la acompaña, explica que no toda el agua en el recipiente más grande es movida para contrarrestar el peso del agua en el recipiente más pequeño, pero sólo una columna ($a-n$) con la misma sección transversal que la del recipiente más pequeño (sr). A la vista de la comprensión tan limitada que Leonardo tenía sobre la presión del agua en aquella época, este razonamiento es notable. "*El enfoque de Leonardo al problema de los vasos comunicantes*", comenta Fasso, "*me parece la más avanzado que podría lograrse en un momento en el que el concepto de presión aún no se había enunciado.*" (FASSO, 1987).

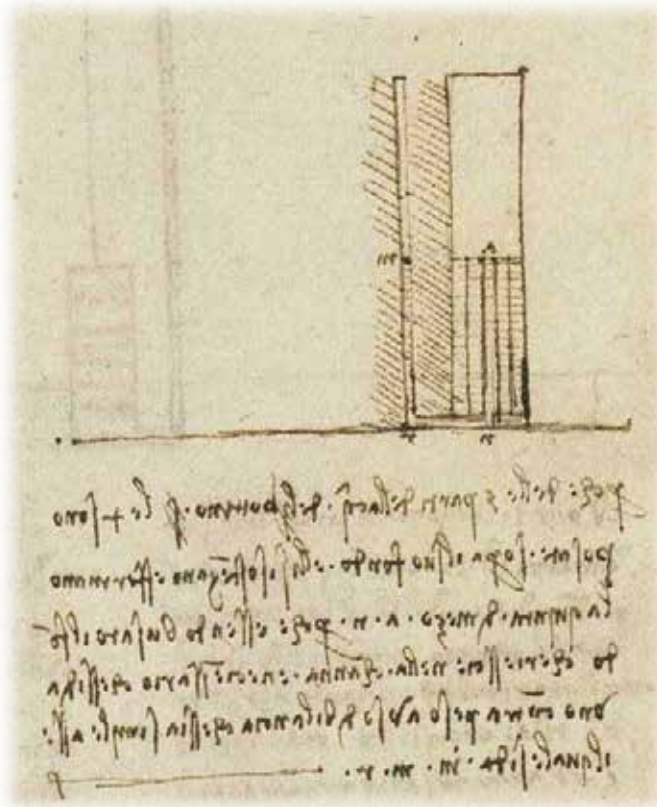


Figura 3.7: .Explicación esquemática de la ley de los vasos comunicantes.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0150r (detalle)

3.5.6. Fuerzas y movimiento. Un laberinto conceptual.

Durante sus estudios de la "*ciencia de los pesos*" y de la hidrostática, Leonardo se interesó en las relaciones generales entre fuerzas y movimiento. En sus intentos de esbozar lo que en siglos posteriores se llamaría una "*ciencia del movimiento*," se encontró con dificultades conceptuales que eran mucho mayores que las de sus trabajos sobre la estática. El razonamiento geométrico que usaba para sus análisis de las máquinas era mucho más difícil de aplicar a los fenómenos dinámicos de los cuerpos en movimiento bajo la influencia de fuerzas que chocan entre sí. Además, los conceptos necesarios para describir estos fenómenos matemáticamente como la energía, el momento, la fuerza, la aceleración, etc., aún no habían sido plenamente desarrollados. De hecho, se necesitarían otros dos siglos para identificar claramente y definir estos conceptos básicos de la mecánica. Como historiador de la ciencia Domenico Bertoloni-Meli señala, que incluso las primeras especulaciones de Galileo sobre el movimiento, cien años después Leonardo, le enfrascó en "*un laberinto conceptual y terminológico a mitad de camino entre el aristotelismo y la nueva ciencia*." (BERTOLONI-MELI, 2006)

De acuerdo con la teoría aristotélica de los cuatro elementos, comúnmente aceptada en la Edad Media y durante el Renacimiento, los movimientos de los elementos surgen de sus tendencias naturales a volver, cuando se les perturba, a sus lugares naturales dentro de esferas concéntricas alrededor de la Tierra (CAPRA, 2007). Leonardo se aferró a esta explicación teleológica de las fuerzas y el movimiento durante la mayor parte de su vida, pero en varias ocasiones puso en duda sus premisas básicas, dándose cuenta de que eran obstáculos en sus intentos de comprender los fenómenos mecánicos. Por ejemplo, en un pequeño cuaderno escrito durante sus primeros estudios de la mecánica y ahora conocido como Manuscrito I, enumeró una serie de preguntas sobre el movimiento que tenía la intención de explorar. Además de ser un testimonio vivo a la curiosidad incesante de Leonardo, estas preguntas indican claramente sus dudas sobre el esquema aristotélico:

“¿Cuál es la causa del movimiento? ¿Qué es el movimiento en sí mismo? ¿Qué es lo que está más adaptado para el movimiento? ¿Qué es un ímpetu? ¿Cuál es la causa del ímpetu, y del medio en el que se crea? ¿Qué es la percusión? ¿Cuál es su causa? ¿Qué es la recuperación? ¿Cuál es la curvatura del movimiento rectilíneo y su causa?”. (MsI_0130v)

Unos años más tarde, expresó dudas similares sobre la visión aristotélica de la gravedad en relación con el flujo del agua. Teniendo en cuenta el laberinto conceptual de la mecánica clásica y la medieval, Leonardo a veces mostró una comprensión intuitiva de los conceptos abstractos y relaciones que estaba muy por delante de su tiempo, mientras que otras veces no pudo liberarse de las limitaciones de las ideas tradicionales aristotélicas.

3.5.7. Las Cuatro “Fuerzas” de la Naturaleza.

En sus intentos de clarificar la mecánica clásica y la medieval, Leonardo identificó cuatro variables básicas: **movimiento (o velocidad), peso, fuerza, y percusión (o "impacto", tal como lo diríamos hoy en día)**. No usó el término "variable" moderna pero en vez usó el término "**potencia**" (*potentia*), que aparece con frecuencia, con una amplia gama de significados, en sus cuadernos. En sus escritos sobre la hidrostática, por ejemplo, *potentia* significa "*presión*"; en otros textos que corresponde a nuestro término moderno "*energía*"; y Leonardo también describe la fuerza ejercida por los organismos vivos como una "*potencia o fuerza invisible*".

El hecho de que el uso de Leonardo de *potentia* es bastante vago en comparación con la terminología científica moderna, sin embargo no es sorprendente para el siglo XV. Hoy

sabemos que sus cuatro "*potencias o fuerzas*" de la naturaleza tienen diferentes dimensiones, y por lo tanto creo que potencia en este contexto se entiende mejor en el sentido de nuestro término moderno "*variable*" (CAPRA, 2013). Esta interpretación se ve reforzada por la insistencia de Leonardo en destacar que la característica común de las cuatro "*fuerzas*" es que varían de forma continua (como las variables en nuestras funciones matemáticas modernas). Entre las primeras notas de Leonardo sobre mecánica en el Códice Madrid I nos encontramos con la siguiente afirmación:

“Contaremos la verdad al afirmar que es posible imaginar todas las fuerza capaces de aumentar o disminuir infinitamente.... Pueden crecer de la nada a la grandeza infinita gradualmente. Y de forma gradual decrecer infinitamente hasta disminuir, terminando en la nada.”
(CM1_0128v)

Una vez definidas las variables básicas de la mecánica, Leonardo trató seguidamente de establecer relaciones cuantitativas entre ellas. Durante la mayor parte de su vida, creyó que todas estas relaciones podrían ser representadas como proporciones directas o inversas en general, lo que hoy conocemos como funciones lineales. Llamó a tales proporciones, relaciones algebraicas "*piramidales*", usando pirámides y triángulos isósceles (es decir, los triángulos con dos lados iguales) para representarlas geoméricamente.

En un folio en el Códice Atlántico, Leonardo ilustra las acciones de las fuerzas de la naturaleza con varios ejemplos, dicho con sus propias palabras: "*Todas las fuerzas naturales se pueden expresar de forma piramidal en la medida en que disminuyen y aumentan de una forma gradual proporcional y continúa*". En otras palabras, todas las fuerzas varían de forma continua y sus variaciones se pueden expresar en términos de relaciones lineales.

La creencia de que Leonardo pensara que las relaciones "*piramidales*" (lineales) eran de carácter universal se deriva de su familiaridad con las proporciones lineales en perspectiva. Como la mayoría de los matemáticos de su época, utiliza con frecuencia figuras geométricas para representar relaciones algebraicas, y vio la pirámide, o el triángulo isósceles, como un poderoso símbolo para usarlos en óptica y mecánica.

Esta creencia del carácter universal de las relaciones lineales impidió a Leonardo algunas veces reconocer otros tipos de relaciones algebraicas que no se expresan con tanta facilidad en términos de figuras geométricas. Por ejemplo, no reconoció que la distancia recorrida por los cuerpos que caen aumenta con el cuadrado del tiempo empleado en caer, en lugar de linealmente. Galileo cometió el mismo error en sus primeros trabajos, y por las mismas razones. En una carta escrita en 1604, señaló como un "*principio incuestionable*" que la velocidad de caída de los cuerpos aumenta en proporción a la distancia recorrida, lo que equivale a decir que ambas, velocidad y distancia aumentan linealmente con el tiempo.

Galileo finalmente corrigió su error, y Leonardo, también, descubrió relaciones funcionales más complejas entre variables físicas al final de su vida. Pero para entonces estaba demasiado ocupado con otros proyectos como para terminar de revisar sus escritos sobre la universalidad de las relaciones piramidales entre las cuatro fuerzas de la naturaleza.

Los escritos de Leonardo sobre movimiento, peso, fuerza, y percusión están muy dispersos entre sus manuscritos, desde sus comienzos con sus notas científicas en el Códice Trivulziano y sus primeros textos en el Códices Forster y en el Manuscrito A hasta llegar a sus notas en el Manuscrito E, recopiladas ya en la vejez, y mostradas en sus grandes colecciones misceláneas de sus anotaciones en los Códices Arundel y Atlántico. A continuación, vamos a destacar alguna de las observaciones, descubrimiento y especulaciones más destacadas de Leonardo, en el campo de la mecánica.

3.5.8. El Movimiento. Su Naturaleza según Leonardo.

Cuando Leonardo amplió sus estudios de mecánica más allá de la estática, se dio cuenta de que la naturaleza del movimiento y sus relaciones con las distintas fuerzas tenían que ser el tema central de sus investigaciones. Por lo tanto, no es de extrañar que **considerara el movimiento como la más fundamental de sus cuatro fuerzas de la naturaleza**. "*Habla primero de movimiento*", escribió en una nota a sí mismo, "*después del peso, ya que provoca el movimiento; a continuación, de la fuerza, que surge de peso y movimiento; y finalmente, de la percusión, que surgen del peso, del movimiento, y a menudo de la fuerza.*" (CA_0421v).

Los vínculos causales entre las cuatro fuerzas establecidas en esta norma parecen un tanto arbitraria, y de hecho Leonardo se dio cuenta rápidamente, que movimiento, peso, fuerza y percusión estaban tan fuertemente interconectadas que era imposible señalar a cualquiera de ellos como primaria:

La gravedad, la fuerza, y la percusión son de tal naturaleza que cada una por sí misma pueden surgir de las otras... y todas juntas y cada una de ellas por sí solas pueden crear movimiento. (CAr_0037v)

Sin embargo, Leonardo creyó que el movimiento sería el mejor punto de partida para analizar las relaciones entre las cuatro fuerzas de la naturaleza. En el Códice Arundel, vuelve a afirmar que el movimiento, al igual que las otras tres fuerzas, varía de forma continua, y en el mismo pasaje identifica correctamente la relación básica entre la velocidad, la distancia y el tiempo:

Ese movimiento que es más lento cubre menos distancia en el mismo tiempo. Y ese movimiento que es más rápido cubre más distancia en el mismo tiempo... Es en la fuerza del movimiento donde reside una lentitud infinita e igualmente una velocidad infinita. (Car_0176r)

Aún más notable es el hecho de que Leonardo reconoció la relatividad del movimiento. "*El movimiento del aire contra una cosa fija es tan grande como el movimiento de la cosa en movimiento contra el aire inmóvil*", señaló en el Códice Atlántico. "*Y lo mismo ocurre con el agua, que en una circunstancia similar me ha mostrado la misma naturaleza.*" (CA_1098r). De hecho, en una página anterior en el mismo Códice, Leonardo observó con precisión: "*La acción de un palo que pasa por aguas tranquilas se asemeja a la del agua de una corriente contra un poste fijo.*" (CA_0215r).

Leonardo debió haber reconocido la importancia de este descubrimiento, porque lo recordó muchas veces en varios de sus manuscritos. Todas estas declaraciones son expresiones claras y hermosas de un principio importante de la mecánica moderna. **La relatividad del movimiento** fue redescubierto y formulada matemáticamente a finales del siglo XVII por el renombrado físico y matemático Christiaan Huygens en relación con las leyes de la colisión. Es la base del túnel de viento, la herramienta experimental principal utilizada en los ensayos de la aerodinámica moderna.

Al igual que en la cinemática de hoy día, Leonardo distinguió entre movimiento "*recto*" (lineal) y movimiento curvo, y enumeró los movimientos circulares, en espiral, e "*irregulares*" como tipos especiales de movimiento. (MsE_0042r). Debido a su gran fascinación por las espirales, no es de extrañar que identificara hasta cuatro movimientos en espirales distintos, correspondientes a movimientos planos, cóncavos, convexos y helicoidales.

En su extenso trabajo con máquinas, Leonardo estudió las ruedas que giran alrededor de varios ejes. Distinguió correctamente entre la velocidad angular y la lineal, tal como diríamos hoy. *"Esa parte de una rueda giratoria se mueve con menos movimiento mientras más nos acercamos al centro de la revolución"*, señaló en el Manuscrito E (MsE_0036r). Como se mencionó antes, Leonardo contrastó el movimiento circular de las ruedas con el movimiento en espiral de los vórtices del agua en sus pioneros estudios de flujos turbulentos del agua y del aire. *"El movimiento en espiral o de giro de todos los líquidos es mucho más rápido, cuanto más cerca estemos del centro de su revolución,"* observó con total exactitud, *"[mientras que] el movimiento circular de una rueda es mucho más lento, ya que está más cerca del centro de revolución del objeto."* (CA_0813r).

Leonardo comprendió plenamente que con la distinción entre velocidad angular y lineal había descubierto una propiedad que no sólo era característica de las ruedas giratorias, sino de todo el movimiento circular. Podemos encontrar varios ejemplos de esta idea en sus manuscritos, incluidos los siguientes, que hace referencias a las herramientas de caza, en sus primeras notas sobre la mecánica en el Manuscrito I:

Las lanzas y los látigos de caza o fustas tienen un movimiento superior a los brazos porque, en el movimiento del brazo, la mano describe un círculo mucho más amplio que el codo; y en consecuencia, moviéndose al mismo tiempo, la mano cubre el doble del camino cubierto por el codo; Por tanto, puede decirse que su velocidad será el doble de la del movimiento del codo (MsI_0099v).

Leonardo reconoció la fuerza centrífuga generada por el movimiento circular, y también observó correctamente que, cuando un objeto que gira amarrado a una cuerda es liberado de su rotación, saldrá volando hacia fuera tangencialmente:

El peso que se mueve alrededor de un punto fijo de una cuerda al cual permanece unido, empuja y estira esta cuerda con gran fuerza, y si la cuerda se soltase de su punto fijo, el peso llevaría consigo a dicha cuerda a lo largo de esa línea en la que se dibuja su separación de su punto fijo. (WC_AS_0115v y MsE_0029r).

Tuvieron que pasar otros 150 años para que estas características del movimiento circular pudieran ser redescubiertas por Robert Hooke y Christiaan Huygens.

3.5.9. Fuerza y movimiento.

En su análisis de las relaciones entre fuerza y movimiento, Leonardo se quedó en gran medida dentro de los límites del marco aristotélico. Distinguió entre el movimiento *"natural"* movimiento espontáneo de un elemento hacia su estado natural, y el movimiento *"violento"* o *"accidental"*, en el que un elemento se desplaza de su estado natural por alguna fuerza. *"La gravedad y la ligereza son potencias accidentales"*, explicó en el Códice Atlántico, *"que son producidos por un elemento que está siendo arrastrado o conducido por otro. Ningún elemento tiene gravedad o ligereza sin su propio elemento"* (CA_0362r).

En este contexto aristotélico *"gravedad"* no se refieren a una fuerza, como lo hace en la física newtoniana, sino más bien a la *"pesadez"* producida mediante el desplazamiento de un objeto sólido hacia arriba, lejos de la Tierra y por lo tanto de su lugar natural. Del mismo modo, se pensaba que la *"ligereza"* se producía cuando el aire se desplaza hacia abajo y al sumergirse en el agua. En ambos casos, los desplazamientos eran movimientos *"violentos"*

para lo cual se requerirían fuerzas, mientras que el retorno del elemento a su lugar natural era debido a una tendencia inherente, en lugar de a una fuerza externa.

La distinción aristotélica entre movimiento natural y violento, y su afirmación de que estos dos tipos de movimiento eran fundamentalmente diferentes y no podían ser mezclados, fueron aceptadas por los filósofos naturales a lo largo de la Edad Media y del Renacimiento. A principios del siglo XVII, la distinción entre movimiento natural y violento fue abandonado por Galileo, pero aún se debatía entre sus contemporáneos.

La situación se aclaró gradualmente cuando el concepto de inercia comenzó a tener protagonismo. El paso decisivo fue dado por Newton, que reconoció claramente la inercia como la tendencia de un cuerpo macizo para preservar su estado de reposo o movimiento rectilíneo uniforme, a menos que actúe una fuerza. Una consecuencia de esta idea fundamental, ahora conocida como primera ley del movimiento de Newton, fue que la fuerza de ahora en adelante ya no se asocia con el movimiento en general, sino más específicamente con los cambios de estado de movimiento de un cuerpo; en otras palabras, con la aceleración.

Al igual que todos los eruditos medievales y renacentistas, Leonardo aceptó la afirmación de Aristóteles de que un objeto con movimiento violento continuaría moviéndose sólo el tiempo en el que una fuerza actuara sobre él. "*Ninguna cosa inanimada puede empujar o tirar de algo sin estar de acuerdo con ella*", escribió en su Manuscrito A, "*y lo que lo empuja sólo puede ser la fuerza o el peso*." (MsA_0021v). Un problema obvio con esta posición aristotélica era la dificultad de explicar por qué una piedra lanzada, por ejemplo, continuaba moviéndose después de perder contacto con la mano actuando una fuerza sobre él, o una flecha después de perder el contacto con el arco que la disparó. Los filósofos medievales eran muy conscientes de esta dificultad, y encontraron una solución ingeniosa. Ellos postularon que la fuerza motriz ejercía, o infundía, un ímpetu al objeto que lo mantenía en movimiento hasta que el ímpetu finalmente se disipaba, como el calor de un metal de hierro después de que se le retirara del fuego.

La teoría medieval sobre el **ímpetu** fue formulada, en su forma más elaborada, en el siglo XIV por el filósofo escolástico francés Jean Buridan. Leonardo estudió las teorías de Buridan, incluyendo su teoría imaginativa de movimientos tectónicos en ciclos geológicos, a través de los escritos de Alberto de Sajonia (CAPRA, 2013). A medida que avanzaba con sus investigaciones sobre mecánica, utilizó el concepto de ímpetu con mayor frecuencia. En su primer manuscrito, el Códice Trivulziano, describió el fenómeno de ímpetu, pero no utilizó el término propiamente dicho:

Cada cuerpo que es movido o golpeado conserva en sí mismo por algún tiempo de duración la naturaleza de esa percusión o movimiento; y se conserva tanto más o menos si el poder y la fuerza de ese golpe o movimiento, es mayor o menor. (CT_0043r)

Casi al mismo tiempo, sin llegar a utilizar otra vez el término de "*ímpetu*", analiza cómo la perturbación causada por una piedra arrojada a un estanque va viajando hacia el exterior en ondas circulares:

El agua, aunque permanece en su posición, puede tomar fácilmente este temblor de las piezas vecinas y dárselo a otras partes adyacentes, siempre disminuyendo su poder hasta el final. (MsA_0061r).

En los años siguientes, las definiciones de "*ímpetu*" en la línea de Buridan, aparecen con frecuencia en los cuadernos de Leonardo. En el Manuscrito G, por ejemplo, señala:

El ímpetu es la impresión de movimiento transmitido por un motor para mover un objeto. Ímpetu es la fuerza impresa por un motor en el objeto que es movido. (MsG_0073r)

Leonardo aplica el concepto de ímpetu a muchos fenómenos mecánicos que ahora asociamos con la inercia, como la estabilidad de una peonza, diversos movimientos oscilantes y colisiones (CLAGETT, 1999). Sin embargo, mientras que Buridan describe el ímpetu cuantitativamente como proporcional tanto a la cantidad de materia como a la velocidad del objeto, tal tratamiento cuantitativo es evidente en cualquiera de los manuscritos existentes de Leonardo.

En sus primeros trabajos sobre la mecánica, Leonardo mantuvo la imaginería medieval del ímpetu como un poder que se infunde en un objeto en movimiento y que posteriormente se disipa por sí mismo. Pero en el momento que su interés por la fricción fue creciendo, tomó conciencia de los efectos de la viscosidad en el agua y en el aire. Y se dio cuenta que la resistencia del aire era la responsable de que disminuyera gradualmente el ímpetu de un proyectil:

La potencia del motor... se adhiere al cuerpo movido, y con el tiempo se consume en su penetración por el aire, que siempre se comprime frente al objeto en movimiento. (CL_0029v)

Además, Leonardo reconoció que en el movimiento de los proyectiles había una interacción continua entre el movimiento violento y natural. "*El movimiento natural, en conjunción con el movimiento de un motor, consume el ímpetu de ese motor*", observó al final de su vida en el Manuscrito E (MsE_0029r). Con esta declaración describió la interacción entre la inercia del proyectil y la fuerza de la gravedad (como diríamos hoy), Leonardo trasciende claramente el marco aristotélico donde los movimientos naturales y violentos nunca podían ser mezclados (CAPRA, 2013).

En los siglos posteriores a Leonardo, el concepto medieval de **ímpetu** evolucionó gradualmente al concepto moderno de **momento lineal** de la mecánica clásica, que se define como el producto de la masa de un objeto y su velocidad, magnitud física fundamental de tipo vectorial con magnitud y dirección. A finales del siglo XVI, Galileo todavía pensaba en el ímpetu como una entidad que se auto disipa (BERTOLONI-MELI, 2006). Descartes abandonó esta imagen mediante la introducción del término "*cantidad de movimiento*" para reemplazar "*ímpetu*", pero él lo entendía como que se mantenía independiente de la dirección. En el siglo XVII, por último, Huygens fue el primero en declarar la conservación de la cantidad de movimiento y le dio el significado completo de nuestro concepto contemporáneo de momentum.

3.5.10. Conservación de la Energía.

Entre los conceptos básicos de la mecánica, la energía fue el que llevó más tiempo en su identificación y formulación. Es mucho más abstracto que los conceptos de masa, fuerza o ímpetu, y se ha convertido en uno de los conceptos más importantes de la física moderna. Su importancia se debe al hecho de que la energía total en cualquier proceso físico siempre se conserva. La energía puede transformarse en muchas formas diferentes: gravitacional, energía cinética, calorífica, energía química, etc., pero la cantidad total de energía en un determinado proceso o conjunto de procesos, nunca cambia. No se conoce una excepción a la conservación de la energía. Es una de las leyes más fundamentales y de mayor alcance de la física.

El famoso filósofo y matemático alemán Gottfried Wilhelm Leibniz, contemporáneo de Newton, es considerado habitualmente como el primero en reconocer la conservación de la energía. Él lo llamó una "*fuera vital*" (*vis viva*) y la definió como el producto de la masa de un objeto por su velocidad al cuadrado. Newton aceptó la conservación de la energía, pero no le agradaba del todo y no le concedía gran importancia. Curiosamente, la discusión de la conservación como una ley fundamental de la naturaleza conllevó discusiones filosóficas y teológicas, tanto para Newton como para Leibniz. (BERTOLONI-MELI, 2006).

El término "**energía**" en su sentido moderno fue utilizado por primera vez a principios del siglo XIX, y los científicos y filósofos debatieron durante muchos años acerca de si la energía era algún tipo de sustancia o simplemente una cantidad física. Fue sólo con la aparición de la termodinámica a mediados del siglo XIX cuando la energía se definió como la capacidad para realizar un trabajo, y se formuló la ley universal de la conservación de la energía, que es el fundamento del primer principio de la termodinámica.

Teniendo en cuenta el surgimiento gradual del concepto de energía a lo largo de más de tres siglos, y la reticencia incluso mostrada por Newton en dar importancia a la conservación de la energía, es verdaderamente notable que Leonardo da Vinci tuviera una comprensión intuitiva de ella a finales del siglo XV (CAPRA, 2013). Leonardo prestó especial atención a la conservación de determinadas cantidades entre masa y volumen, en particular, desarrolló su propia y original "*geometría realizada con el movimiento*" para expresar estos principios matemáticamente (CAPRA, 2007). Extendió el concepto de conservación hasta el movimiento de los objetos sólidos en el espacio. "*De todo lo que se mueve*", señaló, "*el espacio que adquiere es tan grande como el que deja.*" (MsM_0066v).

Leonardo vio la conservación de volumen como principio general que rige todos los cambios y transformaciones de las formas naturales, ya sean cuerpos sólidos que se mueven en el espacio o cuerpos flexibles que cambian sus formas. Y lo aplicó a las corrientes de agua y a otros líquidos, así como a varios movimientos del cuerpo humano, especialmente en la contracción de los músculos. (KEEKE, 1983).

Estudiando la forma de proceder de Leonardo sobre las cuestiones relativas a los principios de conservación, tal vez no sea sorprendente que reconociera de una forma intuitiva la conservación de la energía en sus estudios de la mecánica. Un ejemplo notable de esta intuición se presenta en el Códice Madrid I, donde describe y dibuja un experimento con un recipiente del que se vierte agua a diferentes alturas (fig. 3.8).



Figura 3.8: .Chorros de agua que caen de un recipiente desde 4 alturas diferentes.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0134v (detalle)

Leonardo comienza la discusión de este experimento indicando claramente el problema. "*Aquí se hace la pregunta,*" escribe, "*¿cuál de estos cuatro chorros tiene más percusión para hacer girar una rueda: el que cae de a o b, c o d?*" En su análisis posterior, Leonardo observó

que la velocidad de propulsión inicial de los chorros aumentaba a medida que el nivel se reducía por el aumento de la presión del agua. Sin embargo, luego hizo la siguiente conjetura.

Todavía no lo he experimentado, pero me parece que [los cuatro chorros] deben tener la misma potencia... [de] donde la fuerza de percusión que carecen, se compensa con el peso de los chorros.
(CM1_0134V)

En terminología moderna, diríamos que Leonardo razona de la siguiente manera. Como la energía cinética (o "fuerza de percusión") generada por la caída libre de las partículas del agua disminuye con la altura decreciente de los surtidores, esta disminución se compensa por la energía potencial creciente (o "peso de las caída de agua"), lo que se traduce en el aumento de la presión del agua y la velocidad inicial del chorro. Como resultado de esta compensación, la energía total (o "fuerza") de los chorros en su impacto sobre el suelo se mantiene constante independientemente de la altura de sus surtidores.

Este boceto de Leonardo de las cuatro "caídas de agua" no es exacto. ¿Había realmente llevado a cabo el experimento?, se habría dado cuenta de que las distancias horizontales recorridas por los chorros están representadas de forma incorrecta. Aunque la velocidad de propulsión de los chorros sí aumenta con la disminución de la altura de los grifos, el tiempo que tardan en alcanzar el suelo se hace más corto, afectando a las distancias horizontales que pueden alcanzar.

Hoy podemos calcular fácilmente el tiempo que tardan las partículas de agua de cada chorro en caer y llegar al suelo desde la altura de salida, y la distancia horizontal que puedan llegar a alcanzar durante ese tiempo con la velocidad inicial del chorro (FASSO, 1987). Este cálculo muestra que la distancia horizontal aumenta cuando la apertura del orificio del recipiente se va bajando, alcanzando un máximo para el surtidor a mitad de la altura del recipiente, y luego disminuye de nuevo simétricamente para los chorros en la mitad inferior del recipiente. La curva obtenida mediante el trazado de las distancias horizontales que alcanzaron los chorros en relación con las alturas de sus caños, es una elipse.

Sin nuestra moderna terminología y fórmulas cuantitativas, este cálculo va mucho más allá del alcance de Leonardo. Estas limitaciones hacen que sea aún más impresionante que Leonardo intuyera correctamente la formulación de la conservación de la energía para el agua que fluye. Esta importante ley de conservación fue redescubierto y precisamente formulada sólo en la mitad del siglo XVIII por el matemático Daniel Bernoulli, y ahora se conoce como el principio de Bernoulli.

3.5.11. Movimientos de Consumo.

Cuando los físicos del siglo XIX desarrollaron la ciencia de la termodinámica formularon dos principios fundamentales, conocidos hoy como la primera y segunda ley de la termodinámica. La primera ley es la de la conservación de la energía. La segunda ley establece que, mientras que la energía total involucrada en un proceso siempre se conserva, la cantidad de energía útil disminuye, disipada en forma de calor, fricción, y así sucesivamente. Es realmente notable que Leonardo da Vinci previera tales leyes fundamentales de la física y que su conocimiento profundo de la disipación de la energía le llevara a tener una visión diferente sobre el cambio, la transformación y la naturaleza en su época, presagiando ideas similares a la física moderna en más de tres siglos.

La pérdida de potencia de las máquinas por rozamiento era bien conocida por los ingenieros del Renacimiento. Sus montacargas, grúas y otras máquinas grandes eran de madera, y la fricción entre las partes móviles era un problema importante. Leonardo inventó numerosos dispositivos sofisticados para reducir la fricción y el desgaste, incluyendo los sistemas automáticos de lubricación, cojinetes fabricados con piedras semipreciosas, y los rodillos móviles de diversas formas, esféricos, cilíndricos, como conos truncados, etc. (RETI, 1974), muestra un ejemplo elegante de un cojinete giratorio integrado por ocho rodillos cóncavos que giran sobre sus propios ejes, intercalados por bolas que pueden girar libremente, pero se les impide su desplazamiento lateral por estar situadas entre los rodillos. Cuando una plataforma se coloca sobre este cojinete de bolas, la fricción se reduce hasta tal punto que la plataforma se puede hacer girar fácilmente, incluso para cargas pesadas.

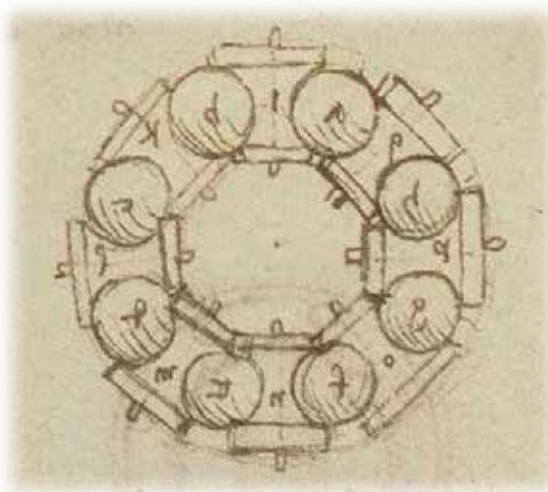


Figura 3.9: .Rodamiento de bolas.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0020v (detalle)

Todos los grandes ingenieros del Renacimiento eran conscientes de los efectos de la fricción, pero Leonardo fue el único que llevó a cabo estudios empíricos sistemáticos sobre su naturaleza y sus propiedades. Investigó las fuerzas de fricción entre varios sólidos, así como sus relacionados con el agua y el aire, y diseñó maquinaria experimental para estos estudios, muy por delante de su tiempo.

Leonardo se dio cuenta experimentalmente que cuando un objeto se desliza contra una superficie, la fricción o rozamiento estaba determinada por tres factores: la rugosidad de las superficies, el peso del objeto, y la pendiente del plano inclinado:

Para conocer con exactitud la cantidad de peso necesaria para mover un centenar de libras en un camino en pendiente, hay que conocer la naturaleza del contacto que el peso tiene con la superficie sobre la que roza en su movimiento, ya que los diferentes cuerpos tienen diferentes rozamientos

... pendientes diferentes provocan diferentes grados de resistencia en su contacto; porque, si el peso que debe ser movido está sobre el nivel del suelo y tiene que ser arrastrado, sin duda el suelo será la primera fuerza de la resistencia, porque todo se basa en la tierra y nada sobre la cuerda para mover el peso.... Pero se sabe que, si uno fuera a tirar de él hacia arriba, con un poco de contacto con una pared vertical, el peso se encuentra casi en su totalidad en la cuerda que tira de él, y sólo muy poco descansa sobre la pared donde se está rozando. (CF2_0086r y 0087r).

Las conclusiones de Leonardo están plenamente confirmadas por la mecánica moderna. Hoy en día, la fuerza de rozamiento se define como el producto del coeficiente de rozamiento (midiendo la rugosidad de las superficies) y la fuerza perpendicular a la superficie de contacto (que depende del peso del objeto y de la pendiente de la superficie). Leonardo no sólo analizó la fuerza de rozamiento correctamente, sino que también obtuvo resultados cuantitativos razonablemente precisos dos siglos antes de que comenzara a estudiarse de una forma moderna el rozamiento y tres siglos antes de que el tema fuera totalmente elaborado por el físico Charles Coulomb.

Leonardo extendió su gran interés por la fricción a sus estudios sobre el flujo de los fluidos. El Códice de Madrid I contiene un registro meticuloso de sus investigaciones y análisis de la resistencia del agua y del aire para mover cuerpos sólidos, así como la resistencia del agua y la propagación del fuego en el aire (CM1_0095r). Muy consciente de la fricción interna (*viscosidad*) de los fluidos, dedicó numerosas páginas de sus manuscritos también para describir sus efectos sobre el flujo de los fluidos. "El agua tiene siempre una cohesión en sí misma", escribió en el Códice Leicester, "y esta es mayor cuanto más viscosa es el agua" (CL_0025r).

Leonardo mostró siempre un interés especial por la resistencia del aire, ya que jugó un papel importante en una de sus grandes pasiones **el vuelo de los pájaros y el diseño de máquinas voladoras** (ver capítulo 8, Leonardo: INGENIERO AERONÁUTICO). "Con el fin de entender la verdadera ciencia del movimiento de los pájaros en el aire", declaró, "es necesario primero entender la ciencia de los vientos." (MsE_0054r).

Una lectura pormenorizada de los escritos de Leonardo sobre mecánica pone de manifiesto que identificara que todos los diferentes tipos de rozamiento que estudió (el contacto entre ejes y pivotes en las máquinas, la fricción entre los objetos que chocan, y la resistencia encontrada por los cuerpos que se mueven en el agua y en el aire), tenían el mismo efecto neto. Todos ellos tenían un "**consumo de energía**", o **disipación de la energía**, como diríamos hoy. La observación fundamental de que en cualquier proceso físico se disipa un poco de energía y no se puede volver a recuperar, se convertiría en la piedra angular de la ciencia de la termodinámica 350 años más tarde, y sin embargo se muestra en repetidas ocasiones en los manuscritos de Leonardo.



Figura 3.10: Comparación entre la trayectoria de dos pelotas.
 Instituto de Francia (París), Manuscrito A de Francia, f. 0024r

En toda ingeniería mecánica, Leonardo señala, "hay que investigar mucho... cómo se perdió parte de la potencia en la fricción de sus uniones"; (CA_0407r). Sus experimentos con objetos rebotando le llevaron a esta conclusión: "He aprendido de la percusión que el movimiento incidente excede al movimiento reflejado." (MsG_0001r y CL_0029r). Una demostración muy particular y elegante sobre la pérdida de energía se detalla en el Manuscrito A, que contiene algunas de las primeras investigaciones de Leonardo sobre mecánica. En un boceto sencillo (fig. 3.10), compara la trayectoria de una pelota que vuela libremente por el aire con otra pelota que rebota en varias ocasiones, perdiendo una cierta cantidad de "energía" en cada rebote.

En sus estudios sobre ingeniería mecánica, al principio Leonardo trabajó con la creencia medieval de que la energía podría ser aprovechada por máquinas de movimiento perpetuo. Al

principio aceptó esta idea y llegó a diseñar una serie de mecanismos complejos para mantener el agua en movimiento perpetuo a través de diversos sistemas de retroalimentación. Pero a medida que su comprensión sobre la pérdida de energía fue madurando, se dio cuenta de la imposibilidad de tal tarea.

“Así que es imposible mostrar que podemos crear, mediante cualquier artilugio ideado por el hombre, un movimiento del agua de abajo a arriba a partir del descenso del agua que tiene que volver a elevarse con igual peso y altura que la que desciende”. “El agua que ha caído”, concluyó, “nunca se elevará desde el lugar en el que se ha detenido a la altura desde donde se inició una cantidad igual de agua a su peso.” (CA_0398v).

“Insomma per mostrarti essere impossibile che si possa creare, per alcuno strumento fatto dall’omo, movimento d’acqua di basso in alto mediante il dissenso della quale s’abbia a rilevare altra dal fine d’esso dissenso, di simile peso e altezza a quella che discende”

Al final, Leonardo se burló de los intentos de construir máquinas de movimiento perpetuo: *"he encontrado entre los delirios excesivos e imposibles de los hombres la búsqueda de movimiento continuo, llamada por algunos como rueda perpetua."* (CM1_0000r).

“Io ho trovato infra l’altre superchie e impossibile creculità degli omini la ciera del moto continuo, la quale per alcuno é decta rota perpetua”

En el siglo XIX, el segundo principio de la termodinámica se formuló por primera vez en términos de disipación de energía en los motores térmicos, pero pronto se reconoció que su significado era mucho más amplio. Es comúnmente aceptada en física la idea de los procesos irreversibles, de una **"flecha de tiempo"**, tal y como fue llamada. De acuerdo con el segundo principio, hay una cierta dirección en los fenómenos físicos. Al igual que la energía mecánica se disipa y no puede ser recuperada, los procesos físicos se suceden en una dirección: del orden al desorden. Para expresar esta dirección matemáticamente, los físicos introdujeron una nueva magnitud, llamada **"entropía"**, que mide el grado de desorden, y por lo tanto el grado de evolución de un sistema físico. En su formulación más genérica, el segundo principio de la termodinámica establece que cualquier sistema físico aislado avanzará de forma espontánea en la dirección con mayor entropía, o desorden.

Leonardo no sólo tenía una idea clara de disipación de energía, sino también intuyó su significado más amplio. Él siempre había prestado especial atención a las formas de "consumo" bajo la influencia de fuerzas físicas durante largos períodos de tiempo. Por ejemplo, la descripción detallada de la erosión de las rocas transportadas por ríos y arroyos, que con el tiempo se convierten en grava y arenilla, es una perfecta ilustración de una secuencia "entrópica" (como diríamos hoy) hacia un desorden mayor. También ocurría lo mismo en la descripción tan gráfica que Leonardo escribe sobre la erosión de las rocas: *"El agua erosiona las montañas y llena los valles, y si pudiera, le gustaría reducir la Tierra a una esfera perfecta"* (CA_0508v).

Sorprendentemente, Leonardo asoció estos procesos irreversibles con una concepción del tiempo específica, como los fundadores de la termodinámica harían 350 años más tarde. Los físicos en los siglos XIX y XX discutieron la idea de una dirección del tiempo, que se manifiesta en la evolución de los procesos físicos del orden al desorden. La llamaron la *"flecha del tiempo"* para distinguirla de la concepción del tiempo en la física newtoniana. Leonardo, utilizó tan sólo un lenguaje ligeramente diferente, introdujo la noción de cualidad física de

tiempo. En un folio en el Códice Arundel, anotó un breve recordatorio a sí mismo: “*Escribo de la calidad del tiempo, para diferenciarla de la geométrica.*” CAr_0176r).

“*Scrivi la qualità del tempo separata dalla geométrica*”

La calidad del tiempo que tenía en mente era la de “*el consumidor de todas las cosas*”; en otras palabras, la irreversibilidad del tiempo en los procesos físicos de transformación y decadencia.

La concepción del tiempo como consumidor de todas las cosas se puede encontrar en los primeros escritos de Leonardo. Un folio en el Códice Atlántico, que data de alrededor de 1480, contiene un pasaje evocador inspirado en las Metamorfosis de Ovidio, en el que Leonardo se imagina a la bella Helena de Troya como una anciana, con el rostro asolado por el paso del tiempo:

“*Oh tiempo, consumidor de todas las cosas. Oh vejez envidiosa, que devora todas las cosas y las consume con dureza, poco a poco, en una muerte lenta. Helena, cuando se miró en el espejo y se vio las arrugas marchitas que la vejez le habían hecho en su cara, lloró y se preguntó por qué ella había sido raptada dos veces*” (CA_0195r)

Leonardo aplicó su concepción cualitativa del tiempo y, en consecuencia, la concepción de “*movimientos de consumo*”, a tres ámbitos principales: en las transformaciones del cuerpo humano en el curso de su vida, en las del cuerpo de la Tierra en el transcurso geológico del tiempo, y en el desgaste de las partes móviles de las máquinas. (LAURENZA, 2006). Su visión de la transformación y el consumo de las formas en estos tres ámbitos como diferentes manifestaciones de un proceso universal es claramente una anticipación del pensamiento evolutivo de la física en más de tres siglos y debe ser reconocido como uno de sus mayores logros científicos (CAPRA, 2013).

3.5.12. Peso, Fuerza y Movimiento

El peso fue la segunda de las cuatro fuerzas de la naturaleza de Leonardo. Las relaciones entre peso, fuerza y movimiento fueron el centro de su atención cuando comenzó sus estudios teóricos sobre mecánica con una larga serie de investigaciones empíricas sobre la “*ciencia de los pesos.*” de la Edad Media. El principal instrumento de estas investigaciones fue la balanza, y el marco teórico básico fue la ley clásica de la palanca de Arquímedes.

Entre 1490 y 1500, mientras pintaba la última cena en Milán, Leonardo también llevó a cabo detallados estudios sobre la balanza, experimentando con diferentes tipos de suspensiones o soportes de las barras, diferentes cuerdas y pesos, y así sucesivamente. Alteró sistemáticamente cada variable con el fin de obtener una comprensión clara de los principios subyacentes. Además, se cuestionaba cualquier posible error de las diferencias que pudieran existir entre una balanza teórica (con un tratamiento matemático) con una balanza física real.

“*La ciencia de los pesos lleva a engaño en la práctica, ya que en muchos casos la práctica y la ciencia de los pesos no se ponen de acuerdo, ni es posible. Este divorcio entre práctica y ciencia de los pesos se pone en evidencia cuando el tratamiento que le daban los antiguos filósofos a los ejes de las balanzas era el de meras líneas matemáticas y en algunos casos tan sólo puntos matemáticos. Es decir en la ciencia de los pesos estos ejes eran incorpóreos, mientras que en la práctica son objetos*”

corpóreos y hay que tener en cuenta el peso de las balanzas, junto con los pesos que se utilizan en ellas... todo lo cual dejo constancia de este engaño." (CA_0257r).

Leonardo procedió a enumerar varios errores posibles. Por ejemplo, observó que la línea central de la barra se podía construir por debajo, atravesando o por encima del punto de apoyo (el fulcro) de la balanza. "*Sólo el que pasa a través del medio es perfecto*", explicó. "*El que pasa por arriba peor; el que pasa por debajo es menos malo*." (CA_0257r).

Estos estudios meticulosos de la balanza no sólo permitieron a Leonardo calcular las fuerzas y pesos necesarios para establecer equilibrios en numerosos sistemas compuestos, incluidas balanzas, palancas y poleas, sino que también le hizo darse cuenta de que el peso de un cuerpo es idéntico a la fuerza de gravedad que actúa sobre él. "*La fuerza es siempre igual al peso que lo produce*", señaló en el Códice Atlántico (CA_1060r). En vista de su aceptación general de la visión aristotélica de la gravedad, que no incluía el concepto actual de fuerza, la correcta asociación de peso con la fuerza de la gravedad, a la que llegó Leonardo empíricamente, es más que notable.

La relación entre la gravedad y el movimiento fue importante para Leonardo en sus estudios anatómicos porque quería comprender las secuencias exactas de los movimientos corporales al caminar, correr, saltar, y otras actividades. Analizando detalladamente tales movimientos Leonardo realizó muchos cálculos para determinar el centro de gravedad (el llamado "*centro de masas*" en la mecánica moderna) en varias figuras geométricas. (CLAGETT, 1999)

Las normas y principios para la determinación exacta del centro de gravedad de triángulos, cuadrados y otras figuras geométricas se habían establecido en la antigüedad por Arquímedes en su tratado sobre el *Equilibrium de los planos*. Leonardo siguió a Arquímedes estrechamente en sus cálculos de para determinar los centros de gravedad, citando varios pasajes del gran clásico. Al igual que Arquímedes, con frecuencia dividía las figuras geométricas en triángulos y utilizaba la ley de la palanca para mostrar que los pares de esos triángulos se equilibraban sobre un punto determinado. Puede que incluso hubiera hecho modelos físicos de sus triángulos y hubiera puestos pesos iguales en sus vértices para determinar sus centros de gravedad.

Leonardo no se limitó a investigar figuras planas, como hizo Arquímedes, sino que también determinó los centros de gravedad de muchos sólidos. Y lo más importante, descubrió la ubicación exacta del centro de gravedad del tetraedro, sólido poliédrico regular compuesto por cuatro caras triangulares equiláteras. El razonamiento de la prueba de Leonardo se basa en la simetría del tetraedro e incluso hoy día nos parece una demostración muy moderna (CAr_0218v). Se traza la altura del tetraedro, lo que él llamó "eje", desde el centro de la base de la figura hasta el vértice opuesto (fig. 3.11) y razonó de la siguiente forma, como la base es un triángulo equilátero, la distribución de la masas en torno a este eje es simétrica en todas direcciones. Por lo tanto, el centro de gravedad debe estar en algún lugar del eje. A continuación, escribió que, debido a la simetría del tetraedro como un sólido regular, el mismo razonamiento se podría hacer por cualquiera de sus cuatro ejes (alturas). Por lo tanto, el centro de gravedad debe estar en el punto donde se cruzan. Por último, construyó ese punto de intersección y observó que se encontraba a una distancia de un cuarto de la longitud de la altura de la base.

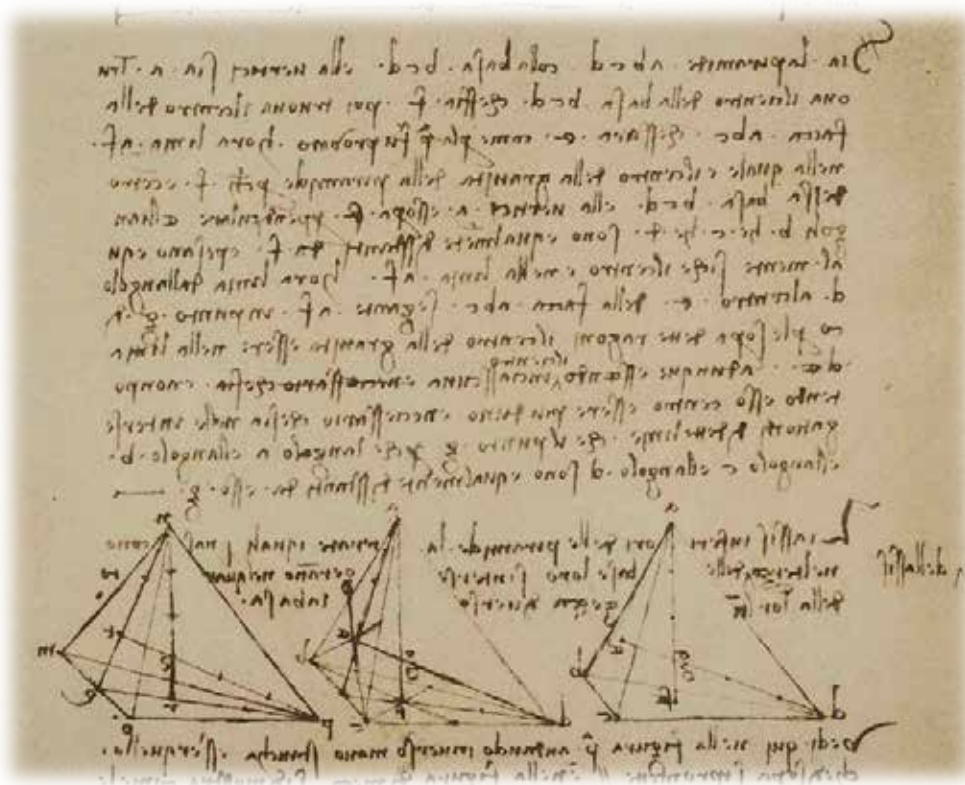


Figura 3.11: Determinación del centro de gravedad del tetraedro..

British Library (Londres). Códice Arundel, f. 0218v

En otro folio del Códice Arundel, Leonardo escribió un resumen escueto de su resultado:

“El centro de gravedad del cuerpo de cuatro bases triangulares se encuentra en la intersección de sus ejes y estará en la cuarta parte de su longitud”. (CAr_0193v)

La demostración del teorema de Leonardo es concisa y elegante, sin duda uno de sus descubrimientos más importantes en geometría.

3.5.13. Caída de los cuerpos.

Durante los últimos años de su primer período en Milán, Leonardo no sólo se dedicó a estudiar concienzudamente la estática (la *"ciencia de los pesos"*), sino que también investigó el movimiento de caída de los cuerpos. De acuerdo con la visión aristotélica de la gravedad, esto era debido al movimiento natural de los *"pesos"* de volver hacia la Tierra, y Leonardo se percató que la caída libre de un cuerpo bajo la influencia de la gravedad era un movimiento acelerado (CAPRA, 2013). Explicó este hecho en términos de la teoría del ímpetu medieval. En la mayoría de los casos, el concepto de ímpetu se había aplicado al movimiento *"violento"*, es decir, el movimiento en el que un objeto se ve obligado a moverse en contra de su tendencia natural. De hecho, el propio Leonardo definió el ímpetu como *"una fuerza impresionada por el motor en el objeto movido"*. Pero como ya había establecido la identidad entre fuerza y peso, era normal que aplicara el concepto de ímpetu también al movimiento bajo la influencia de la gravedad, viendo la aceleración de la caída de los cuerpos como la impresión continua de ímpetus producidas por el peso del cuerpo. *"Los ímpetus surgen igualmente tanto del peso como de la fuerza"* (CA_0480r).

Leonardo creyó durante la mayor parte de su vida que las relaciones "piramidales" o lineales, eran de carácter universal, y por lo tanto no era de extrañar que afirmara que la velocidad de caída de un cuerpo aumentara en proporción directa al tiempo:

"El movimiento natural de las cosas pesadas, en cada grado de su descenso adquiere un grado de velocidad. Y por esta razón, dicho movimiento, ya que adquiere potencia en cada grado de su longitud, y por tanto esta proporción se encuentra en proporción aritmética, porque los incrementos siempre son los mismos." (MsM_0059v).

Sabemos que la frase "cada grado de su descenso" se refiere a unidades de tiempo, ya que en una página anterior del mismo cuaderno, escribe, "Un peso que desciende libremente en todos los grados de tiempo, adquiere... un grado de velocidad." (MsM_0045r). En otras palabras, Leonardo está enunciando la regla matemática que relaciona linealmente la velocidad y el tiempo en los cuerpos de caída libre.

Las declaraciones de Leonardo son del todo correctas. En lenguaje matemático de hoy decimos que la velocidad de caída de un cuerpo es una función lineal del tiempo, y lo escribimos simbólicamente como $\mathbf{v} = \mathbf{g}t$, donde g es la constante gravitacional de la aceleración. Este lenguaje no estaba disponible en la época de Leonardo. El concepto de función como relación entre variables fue desarrollado a finales del siglo XVII. Incluso Galileo describió la relación funcional entre velocidad y tiempo en la caída de los cuerpos con palabras y proporciones, al igual que hiciera Leonardo 140 años antes que él.

Leonardo anticipó otro descubrimiento en el que Galileo es famoso. En lugar de tratar de verificar su afirmación acerca de la aceleración gravitacional experimentalmente con la caída de los cuerpos, lo que habría sido casi imposible con los relojes primitivos de su tiempo, tuvo la misma idea brillante que Galileo llevó a cabo un siglo más tarde, que una pelota que rodara por un plano inclinado aceleraría de la misma manera que un objeto que cayera libremente, sólo que más lentamente, lo que le permitiría medir el movimiento acelerado con una precisión razonable incluso con instrumentos sencillos. "Aunque el movimiento es oblicuo", razonó, "se observa en cada uno de sus grados un aumento en el movimiento y en la velocidad en progresión aritmética." (MsM_0042v).

El boceto de Leonardo al lado de esta afirmación es más ingenioso (fig. 3.13). Se ha dibujado el plano inclinado como un triángulo isósceles (ebc) que está destinado a representar la progresión aritmética de la velocidad con el tiempo. Dicho triángulo es la cara de una pirámide irregular cuya cara opuesta es un triángulo vertical (idéntico al triángulo abc), que representa la relación lineal entre la velocidad y el tiempo de la correspondiente caída vertical. Las relaciones correctas entre las variables relevantes se pueden reconocer fácilmente en el diagrama de Leonardo. Las velocidades al final de los descensos tanto en la vertical como en la oblicua son iguales (ambas representadas por bc), mientras que los tiempos que tardan en alcanzar dichas velocidades (representados por los lados de los dos triángulos) se ven claramente que son diferentes. Además, Leonardo marcó las velocidades intermedias ($mn = op$) para demostrar que las mismas relaciones son válidas para todas las velocidades intermedias a lo largo los descensos verticales y oblicuos.

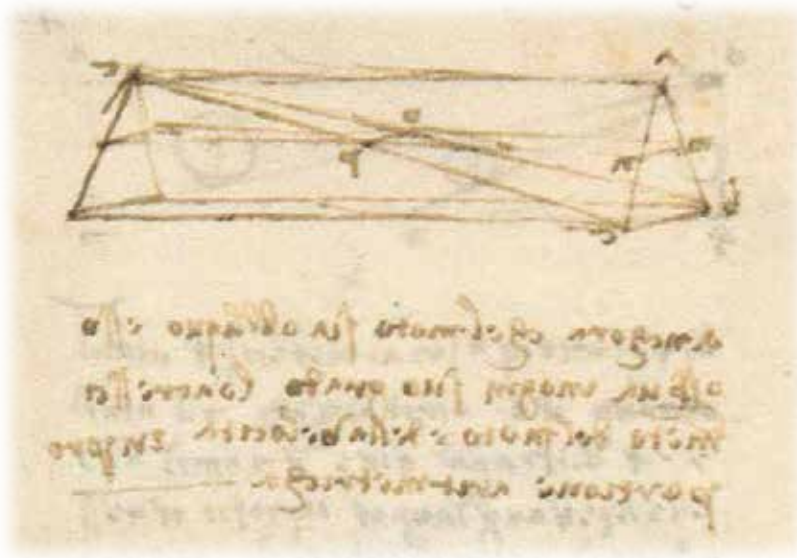


Figura 3.12: Movimiento acelerado en un plano inclinado.
 Instituto de Francia (París), Manuscrito M de Francia, f. 0042v (detalle)

El diagrama del plano inclinado de Leonardo es un impresionante ejemplo de su gran capacidad para analizar los elementos que intervienen en fenómenos complejos y presentarlos visualmente con gran claridad. Sin embargo, se pone en duda que en realidad experimentara con bolas rodando por los planos inclinados, como lo hizo Galileo. Si lo hubiera hecho, Leonardo habría observado sin duda que la distancia de la caída de los cuerpos aumenta con el cuadrado del tiempo y no linealmente. En cambio, él escribió erróneamente que *"en cada cantidad doble de tiempo, la longitud de la bajada se duplica."* (Ms.M_0044v)

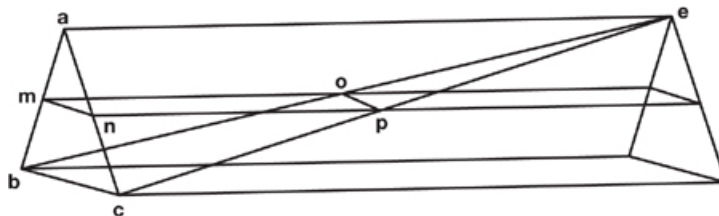


Figura 3.13: Representación gráfica del movimiento acelerado en un plano inclinado.
 (CLAGETT, 1999)

Como ya hemos comentado, Galileo cometió el mismo error en sus primeros trabajos, pero lo corrigió después de experimentar con planos inclinados. El hecho de que Leonardo se aferrara a su creencia de relacionar linealmente las distancias recorridas por la caída de los cuerpos y los tiempos transcurridos, parece indicar que él nunca llevó a cabo los experimentos que había diseñado de manera tan brillante. Marcando las distancias recorridas por las bolas rodando por planos inclinados hacia abajo durante intervalos de tiempo sucesivos habría sido relativamente fácil, mientras que la medición de sus velocidades cada vez mayores, durante los mismos intervalos de tiempo, habría sido un reto considerable. De hecho, Galileo comprendió la relación lineal entre las velocidades y los tiempos instantáneos sólo con mucho esfuerzo y dedicación, y tardó varios años hasta entender que las distancias recorridas por la caída de los cuerpos aumentan con los cuadrados de los tiempos. (BERTOLONI-MELI, 2006)

Además del plano inclinado, Galileo utilizó el péndulo como una herramienta importante para analizar los efectos de la gravedad sobre el movimiento. Leonardo también estudió el movimiento del péndulo y lo utilizó como regulador en los relojes. Pero él no reconoció una de sus propiedades más importantes: el período de la oscilación es independiente de la masa de la lenteja del péndulo. Galileo utilizó esta célebre propiedad del

péndulo para demostrar que en el vacío todos los objetos caerán con la misma aceleración y por lo tanto llegarán a la tierra, al mismo tiempo, independientemente de su masa.

No obstante, Leonardo consiguió algunos descubrimientos importantes sobre el movimiento del péndulo. Lo describió como la interacción entre el movimiento natural (la bajada) y el movimiento accidental (la subida), y se dio cuenta que, a causa de la pérdida de energía inevitable debido a la fricción, "*el movimiento accidental siempre será más corto que el natural.*" (CM1_0147r). Esta anotación escrita un folio del Códice Madrid I, está ilustrado con un dibujo sencillo (fig. 3.14) que muestra claramente la pérdida de energía en la fase de subida. Es otro de los muchos ejemplos de Leonardo de la disipación de energía.

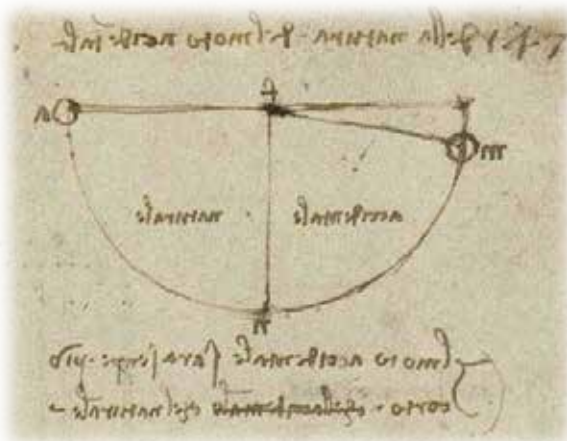


Figura 3.14: .Pérdida de energía en un movimiento pendular.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0147r (detalle)

En el mismo folio, Leonardo analiza la velocidad a la que el arco del péndulo disminuye bajo la influencia de la fricción y toma nota de que para pequeños arcos las oscilaciones serán más uniformes: "*Cuanto menor sea el movimiento natural de un peso suspendido, el movimiento accidental será igual de largo.*" Una vez más, la observación se ilustra claramente en un pequeño dibujo (fig. 3.15). Con este descubrimiento de la mayor regularidad de péndulo oscilando en pequeños arcos, se consigue una mayor regularidad de sus ritmos, Leonardo anticipó las formulaciones teóricas de Galileo y las aplicaciones prácticas para el desarrollo de relojes de péndulo en cerca de un siglo y medio (CAPRA, 2013).

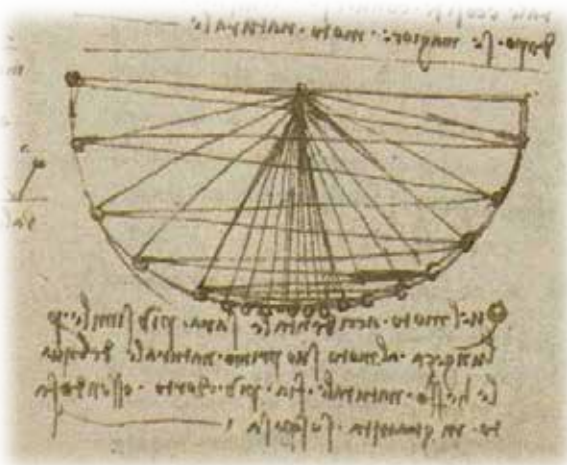


Figura 3.15: .Ritmos regulares del vaivén de un péndulo para arcos pequeños.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0147r (detalle)

Por último, todavía en el mismo folio del Códice Madrid, Leonardo yuxtapone la trayectoria de un péndulo y su interacción de movimiento natural y accidental con la trayectoria de una piedra lanzada en un arco. A pesar de que su comparación detallada de las dos trayectorias contiene algunos errores, su observación de que en ambos casos hay una interacción similar entre la gravedad y el impulso es premonitorio. En el siglo XVII, Galileo haría la misma yuxtaposición en su laureada obra *Diálogo sobre los principales sistemas del mundo*.

3.5.14. Las trayectorias balísticas.

El estudio de las trayectorias balísticas era de especial interés para Leonardo en su trabajo como ingeniero militar. En 1502, cuando tenía cincuenta años y había adquirido gran fama como artista e ingeniero, fue contratado por el papado para viajar por todo el centro de Italia para inspeccionar terraplenes, canales y otras fortificaciones y hacer sugerencias para su mejora. (CAPRA, 2007). Diseñó nuevas fortificaciones ingeniosas. En lugar de castillos con altas paredes verticales él previó bajas bastiones fortalezas dispuestas en una serie de curvas concéntricas a fin de minimizar el impacto de las balas de cañón. (CA_0132r).

Para desarrollar estos diseños militares con mayor eficacia, Leonardo necesitaba tener conocimiento exacto de las trayectorias de los proyectiles, un tema que estaba mal comprendido y repleto de supuestos erróneos en aquella época. A lo largo del Renacimiento y hasta finales del siglo XVII, la trayectoria de una bala de cañón fue descrita en todos los tratados militares que se ocupan de la artillería de la siguiente forma: como el aumento en ángulo a lo largo de una línea recta, seguido de una sección curva corta, y luego cayendo en una línea perfectamente vertical (DIBNER, 1974). Diversas variaciones de esta trayectoria fueron propuestas por los matemáticos en los siglos XVI y XVII. Todos ellos, incluso Galileo en sus primeros trabajos, representaron como una línea recta la trayectoria ascendente del proyectil.

Leonardo, en cambio, reconoció (sin nombrarlo) la naturaleza parabólica de las trayectorias balísticas. En el folio del Códice de Madrid I antes citado, la yuxtaposición de la trayectoria de un péndulo con la de una piedra lanzada en un arco, se acompaña de un bosquejo hermoso de una serie de trayectorias balísticas para diferentes ángulos de lanzamiento (fig. 3.16). (CM1_0147r). Las formas parabólicas de estas trayectorias son claramente visibles.

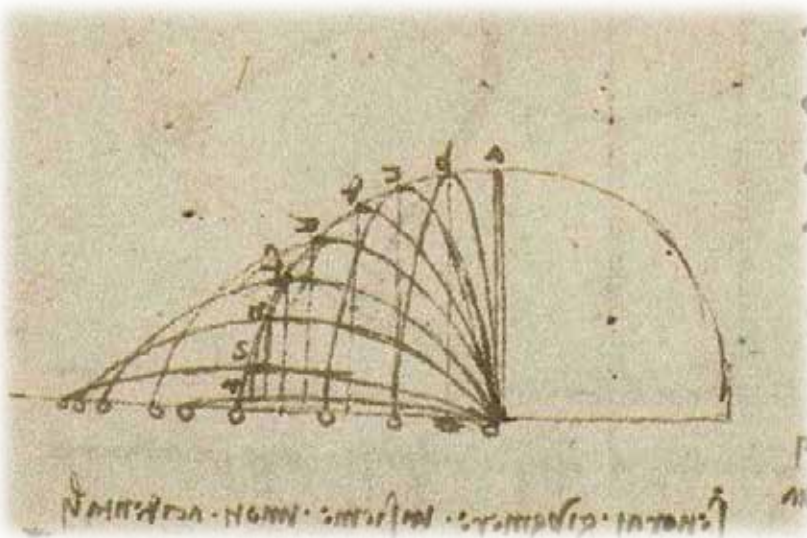


Figura 3.16: .Trayectorias parabólicas para diferentes ángulos de lanzamiento. Como es habitual en los diagramas de Leonardo, la dirección del movimiento es de derecha a izquierda..
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0147r (detalle)

Leonardo no disponía entonces de las herramientas matemáticas para calcular estas formas, y con el equipo experimental disponible en el momento, no podía haberlas determinado siguiendo las trayectorias de las balas de cañón reales. Pero utilizó su fuerza analítica científica y su forma sistémica de pensar para encontrar una solución ingeniosa al problema. En lugar de estudiar las trayectorias de piedras o balas de cañón, estudió chorros de agua, donde las trayectorias de los chorros sí se podían ver. Se dio cuenta que estos chorros estaban compuestos por partículas de agua sujetos a las mismas fuerzas del movimiento natural y accidental (de la gravedad y de la inercia, como diríamos hoy), como las piedras y las balas de cañón.

En el Manuscrito C, escrito poco antes del Códice de Madrid I, Leonardo describe cómo estudió sistemáticamente las trayectorias de los chorros de agua: "*Prueba con el fin de hacer una regla de estos movimientos. Haz la prueba con una bolsa de cuero llena de agua con muchos pequeños tubos del mismo diámetro interior, instalados a lo largo de una línea*" (MsC_0007r). El dibujo adjunto muestra una bolsa de este tipo con agua saliendo de cuatro pequeños caños dispuestos en diferentes ángulos, incluyendo uno en una dirección vertical (fig. 3.17). Es evidente a partir de este dibujo que el ojo agudo de Leonardo percibe no sólo las formas parabólicas correctas de los chorros de agua, sino también, de manera impresionante, sus ligeras distorsiones debidas a la resistencia del aire. El aplanamiento característico de su tramo ascendente y el empinamiento de su tramo descendente son claramente visibles en el dibujo.

La precisión del dibujo de Leonardo de estas trayectorias es verdaderamente asombrosa. Después de Leonardo, la forma parabólica de las trayectorias balísticas fue observada por Galileo en 1609 y fue probada matemáticamente por su discípulo más famoso, Evangelista Torricelli, en 1644. Torricelli también redescubrió, 150 años después de Leonardo, la distorsión de las trayectorias balísticas por la resistencia del aire, mientras que Galileo no tuvo en cuenta este efecto. El cálculo exacto de la curva balísticas de la trayectoria de un proyectil teniendo en cuenta la resistencia del aire tuvo que esperar a que Newton lo publicara en su *Principia* en 1687.

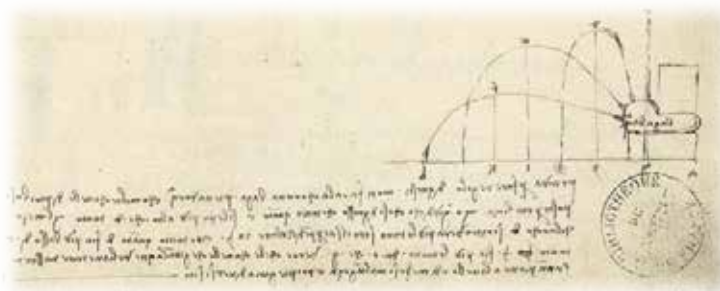


Figura 3.17: Chorros de agua parabólicos con resistencia al aire. Instituto de Francia (París), Manuscrito C de Francia, f. 0007r (detalle)

3.5.15. El origen de las fuerzas físicas.

Después de haber establecido la identidad del peso de un cuerpo con la fuerza de la gravedad que actúa sobre él, era natural que Leonardo considerara la fuerza como su tercera fuerza de la naturaleza, después del movimiento y del peso.

El origen de las fuerzas físicas era una de las preguntas más persistentes y desconcertantes en el desarrollo de la mecánica clásica. Galileo no abordó el problema, lo que limitó sus investigaciones para el movimiento de los cuerpos materiales bajo la influencia de varias fuerzas. Fue criticado por no hacerlo por Descartes, quien promovió enérgicamente una visión completamente mecanicista del mundo en el que tanto los fenómenos vivos como los no vivos se redujeron a los movimientos y contactos mutuos de pequeñas partículas de materia.

La fuerza de la gravedad, en particular, se explica por Descartes en términos de una serie de impactos de partículas diminutas contenidas en sutiles fluidos materiales que impregna todo el espacio.

La teoría de Descartes fue muy influyente en la mayor parte del siglo XVII, hasta que Newton la reemplazó con su concepción de la gravedad como una fuerza fundamental de atracción entre toda la materia, actuando a distancia y disminuyendo con el cuadrado de la distancia. La concepción de Newton, a su vez, fue criticada por muchos de sus contemporáneos, que se sorprendieron por la idea de que una fuerza de atracción actuara a distancia sin ser transmitida por ningún medio. La solución definitiva de este problema tan incómodo se hizo esperar hasta el desarrollo del concepto de campo por Michael Faraday y James Clerk Maxwell en el siglo XIX y de la teoría de la gravedad de Albert Einstein (en su teoría general de la relatividad) en el siglo XX.

Leonardo, que se mantuvo en gran medida en el marco aristotélico, acometió la cuestión del origen de las fuerzas físicas de manera muy diferente. Si los movimientos de caída de los cuerpos, del agua que fluye, del aire ascendente, y del viento, se creen que son producidos por las tendencias naturales de estos elementos para volver hacia sus lugares naturales, el problema se reducía a explicar el origen de las fuerzas "accidentales" o "violentas" que perturban el equilibrio de los elementos.

Para Leonardo, la principal fuerza accidental provenía de la fuerza muscular de los animales y de los seres humanos, que era de hecho una de las principales fuentes de energía en su tiempo. El origen de esta fuerza muscular (tanto para los seres humanos como para los animales) era el alma, desde donde se transmitía a los músculos del cuerpo por los impulsos nerviosos invisibles, inmatriciales que viajaban a través de nervios sensoriales y motores en forma de impulsos (CAPRA, 2007), en otras palabras, el origen de la fuerza era inmaterial. "El peso es corpóreo", explicó, "y la fuerza es incorpórea; el peso es material y la fuerza es espiritual" (CA_0826r). Como ya hemos mencionado, Leonardo a menudo utilizaba la palabra "espiritual" en el sentido de ser inmaterial e invisible, y así es como él describió la naturaleza última de las fuerzas accidentales:

“Fuerza es nada más que un poder espiritual, una potencia invisible, que se crea y se infunde, a través de la violencia desde fuera, por organismos sensibles en los no sensibles.” (CA_0826r).

Definiciones similares de fuerza accidental aparecen repetidamente a lo largo de los manuscritos de Leonardo. Pero debido al uso del término "espiritual", ha habido muchísima confusión sobre su concepción de la fuerza entre los historiadores de la ciencia y la tecnología. Visto desde las perspectivas mecanicistas de estos historiadores, las afirmaciones de Leonardo parecían revelar una dimensión espiritual, o incluso esotérica, de su pensamiento.

“Una dimensión de este tipo puede ser discernida en algunas de sus declaraciones filosóficas, pero no en su concepción de las fuerzas físicas, en mi opinión. La definición de Leonardo de la fuerza no es ambigua, se basa en la evidencia empírica, y está consonancia con el marco general de su pensamiento científico” (CAPRA, 2013)

3.5.16. Fuerza, Movimiento, y Trabajo.

En sus numerosos estudios sobre ingeniería mecánica, Leonardo tuvo la oportunidad de observar muy a menudo los efectos de las distintas fuerzas en las máquinas como la polea y la palanca. En particular, prestó especial atención a la transmisión de la energía y el movimiento de un plano a otro. Su inquietud científica hizo que no sólo usara este conocimiento empírico para mejorar las máquinas existentes, sino que también tratara de enunciar principios generales de la mecánica a partir de sus observaciones.

Uno de esos principios fue la conservación del trabajo, un caso especial de la conservación de la energía. Varios años después de que escribiera sus comentarios sobre la conservación de la energía en el Códice Madrid I, Leonardo volvió a tratar el tema en su pequeño Manuscrito F:

“Si una fuerza mueve un cuerpo en poco tiempo un poco de espacio, la misma fuerza moverá la mitad del cuerpo en el mismo tiempo, dos veces ese espacio”. (MsF_0026r).

“Se una potenza move un corpo in alquanto tempo un alquanto spazio, la medesima potenzi moverà la metà di quel corpo nel medesimo tempo, due volte quello spazio”

Esta declaración de la conservación del trabajo está en consonancia con nuestras definiciones modernas de trabajo como "*fuerza por desplazamiento*" y de la energía como "*el trabajo en el tiempo*".

Leonardo también descubrió un principio que se conocería como la tercera ley de Newton del movimiento doscientos años después. Afirmó que "*por cada acción hay una reacción igual y opuesta*." En otras palabras, las fuerzas físicas siempre vienen por pares iguales y opuestas. Leonardo no formuló esta observación como un principio general, pero aparece reflejado en sus manuscritos con muchos ejemplos concretos.

Uno de sus primeros manuscritos, el Manuscrito A, escrito alrededor de 1490 durante sus primeros años en Milán, contiene una discusión sobre los rebotes de una pequeña bola de cristal en una piedra lisa y pulida. En su análisis, Leonardo afirmó que la fuerza del rebote de la pelota es igual a la fuerza de su impacto (MsA_0024r). Por la misma época, en 1485, estudió el vuelo de los pájaros y desarrolló sus primeros diseños de máquinas voladoras. Observando los movimientos de las alas de un águila, señaló: "*En la medida que una fuerza es ejercida por un objeto contra el aire, el aire ejerce contra el objeto*." (CA_1058v), escrito en 1485.

“Tanta forza si fa colla cosa in contro all'aria, quanto l'aria contro alla cosa”

Unos veinte años más tarde, reconoció el mismo principio en relación con la fuerza del agua sobre un remo: "*La cantidad de movimiento realizado por un remo contra el agua es igual a la cantidad de movimiento realizado por el agua sobre un remo inmóvil*." (CA_0479r, MsF_0037v y CA_0571r).

Por último, hay un principio de la mecánica clásica que es mucho más abstracto y general, que Leonardo anticipó en varios siglos. El Manuscrito G contiene una anotación muy concisa, derivada de observaciones de caída de los cuerpos: "*Cada acción natural se hace por el camino más corto*." (MsG_0075r). Una formulación más elaborada y efusiva se encuentra en un folio del Códice Atlántico, donde Leonardo habla de experimentos con rayos de luz:

"O maravillosa necesidad, con la razón suprema que obliga a todos los efectos a estar vinculados a sus causas, y por la ley suprema e irrevocable cada acción natural que obedece la operación más corta." (CA_0949v).

El entusiasmo de Leonardo sobre este principio estaba plenamente justificado. Casi dos siglos después llegaría a ser uno de los principios más importantes de la mecánica clásica. Fue formulado en el siglo XVII por el gran matemático Pierre de Fermat, que la observó en relación con la óptica y la geometría, como Leonardo había hecho antes que él. Conocido hoy como el principio de Fermat, o el "*principio de menor tiempo*", afirma que la luz siempre sigue el camino de menor tiempo. En el siglo XIX, el principio fue reformulado por el físico y matemático William Rowan Hamilton en lenguaje matemático mucho más abstracto. El principio de Hamilton, también conocido como "*principio de mínima acción*", es válido para todos los sistemas físicos.

Algunos de los textos de Leonardo dan a entender que el camino de menor tiempo para un proceso natural es también el camino más corto, que no siempre es así. En sentido estricto, por lo tanto, el principio de Leonardo no puede ser tratado como una formulación temprana del principio de Fermat o principio de Hamilton. Pero lo que comparte con ambos es la idea de una cierta eficiencia en fenómenos naturales, llamada "*necesidad*" por Leonardo, que se puede medir mediante la observación, de que el valor o alguna cantidad, o variable, pueda llegar a ser mínima. El nivel de abstracción de esta idea, que está claramente articulado en los manuscritos de Leonardo, es verdaderamente excepcional para su época. (CAPRA, 2013)

3.5.17. Percusión: El Cuarto Poder de la Naturaleza.

El concepto de "**percusión**" de Leonardo, su cuarta fuerza de la naturaleza, correspondería con lo que hoy llamamos "**impacto**" y se refiere a una amplia gama de fenómenos. Incluyendo el golpeteo de campanas y placas vibratorias; los impactos de los martillos en sus respectivos clavos y otras superficies; el impacto de choque entre bolas, así como el rebote de una pelota al impactar en una superficie rígida; e incluso los efectos destructivos de los morteros desde las explosiones iniciales hasta los impactos de sus balas de cañón y ondas de choque. Además, Leonardo utiliza "*percusión*", o, más frecuentemente, "*la fuerza de la percusión*" o "*poder o potencia de la percusión*", para referirse a la energía transferida en el proceso de impacto; en otras palabras, equivaldría al concepto moderno de la **energía cinética**.

En todos sus estudios sobre el impacto, Leonardo prestó especial atención a la transferencia de energía de un cuerpo o medio a otro, así como a la eventual disipación de esa energía. Señaló que la transferencia de energía se lleva a cabo en el proceso de impacto cuando un movimiento inicial se detiene de repente:

"El golpe ha nacido de la muerte del movimiento" (MsA_0034v)

En una serie de experimentos, golpeó varios objetos con un martillo y analizó la cantidad de la "*fuerza de percusión*" que era absorbida por el objeto y la probabilidad de que el objeto se rompiera, en función de sus soportes y de la localización del golpe. En un caso, escribió como "*la mano que sostiene una piedra que está golpeado no sufre tanto como lo haría si recibiera el golpe directamente.*" (MsA_0053v). En otro ejemplo de percusión con un martillo, demostró cómo la energía cinética del impacto se transforma en calor:

"Si golpeas una gruesa barra de hierro contra el yunque y martilleas con frecuentes golpes sobre el mismo lugar, serás capaz de encender en el lugar golpeado". (CA_0973v)

“Se batterai uno filo grosso di ferro con ispessi colpi tra l’ancudine e ‘l martello sopra uno medesimo loco, potrai in nel loco battuto apprendere il solfanello”

Para el caso extremo de las explosiones, Leonardo dio descripciones vívidas y detalladas de los efectos destructivos de la onda expansiva, como se puede leer en el siguiente pasaje del Códice Atlántico:

“Si descargas una pequeña bomba en un patio rodeado por un muro conveniente, cualquier vasija que esté allí, o cualquier ventana cubierta con tela, será inmediatamente rota; y los techos se levantarán levemente de sus soportes; las paredes y el suelo temblarán como en un gran terremoto; todas las telas de araña caerán; los pequeños animales perecerán, y todos los cuerpos que contiene aire y estén cercanos sufrirán un daño instantáneo.” (CA_1014v)

La percusión también jugó un papel importante en los estudios de acústica de Leonardo. Observó, a partir de experimentos con campanas, tambores y otros instrumentos musicales, que el sonido siempre se producía por *“un golpe en un objeto resonante”*, y dedujo correctamente que esta percusión provocaba un movimiento oscilante en el aire circundante.(CAPRA, 2007). Por otra parte, describió el fenómeno de la resonancia con detalle:

“El golpe dado a una campana provocará que otra campana similar responda y se mueva un poco. Y la cuerda de un laúd, cuando suena, produce una respuesta y otro movimiento similar en otra cuerda de otro laúd con un tono parecido. Y esto se percibirá mediante la colocación de una paja en la cuerda que será similar a la que sonaba.” (MsA_0022v)

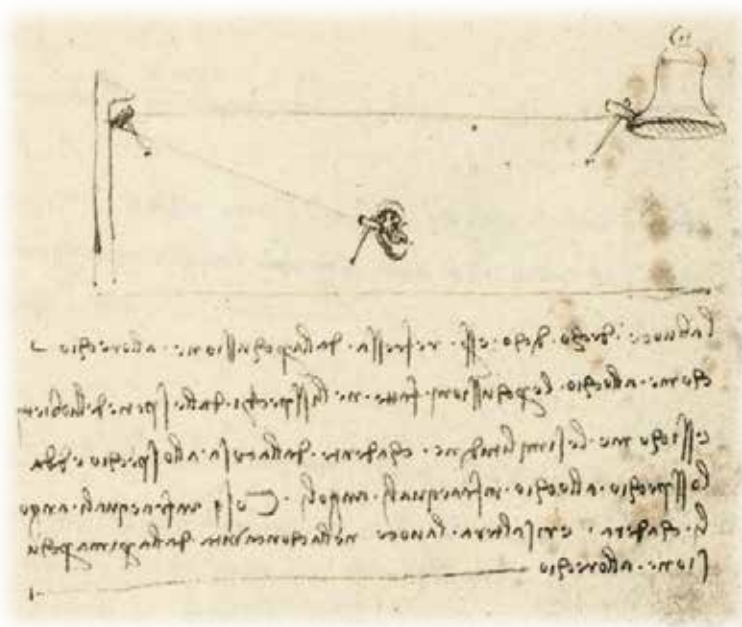


Figura 3.18: Propagación de las ondas de sonido desde una campana hasta una oreja.
Instituto de Francia (París), Manuscrito C de Francia, f. 0016r (detalle)

Las observaciones de resonancia de las campanas y las cuerdas de un laúd, sugirieron a Leonardo el mecanismo general para la propagación y la percepción del sonido, desde la percusión inicial y las ondas resultantes en el aire hasta resonar en el tímpano. En el Manuscrito C, ilustró su descubrimiento con un pequeño y sencillo boceto (fig. 3.18) en la que la generación, propagación y recepción de las ondas de sonido se representa simbólicamente por tres pequeños martillos golpeando una campana, una pared donde rebota el sonido, y una oreja que está escuchando.

La percusión también está en el origen de los experimentos de Leonardo de dejar caer piedras en el agua mansa de un estanque. Su análisis perspicaz de los fenómenos posteriores incluye descripciones detalladas del impacto de la piedra, la generación de un movimiento hacia arriba y hacia abajo de las partículas de agua, la propagación de la "*fuera de la percusión*" en ondas circulares, y su disminución gradual "*potencia*" como la energía cinética del impacto que se disipa por la viscosidad del agua. (CAPRA, 2007).

En sus estudios de percusión, Leonardo no sólo analizó las transferencias y transformaciones de la energía cinética en diversos fenómenos de impacto sino que también trató de determinar las relaciones cuantitativas entre la masa y la velocidad de un objeto en colisión y los daños causados por la "*potencia de la percusión*" (energía cinética) en el impacto. Para ello, dejó caer varios pesos desde diferentes alturas sobre una losa de plomo y midió el tamaño de las abolladuras producidas por su impacto. (MsM_0052r y 0052v; CM1_0188v).

En otra serie de experimentos, disparó flechas de diferentes pesos a varias alturas y midió las penetraciones de sus ejes en la tierra blanda, "*siendo el suelo resistencia uniforme y los ejes de la misma forma.*" (CM1_0059r). Para conseguir esta uniformidad, fabricó flechas con ejes huecos idénticos y les dio diferentes pesos mediante la colocación de piedras en el interior de los ejes. De todos estos experimentos, Leonardo concluyó correctamente que la "*potencia de la percusión*" es proporcional al peso del objeto que cae y a la altura de su caída.

Las colisiones de bolas de billar y objetos similares fueron otro foco importante en las investigaciones de Leonardo sobre la percusión. Distinguió colisiones entre dos objetos en movimiento y las que existen entre una pelota y un muro firme u objeto muy pesado (es decir, el fenómeno del rebote):

“Hay dos clases de percusión: cuando el objeto huye del proyectil que le golpeó, y cuando el proyectil rebota del objeto al que golpeó” (CAr_0083v).

Ècci di due nature percussione, cioè quando l’obietto si fugie dal mobile che lo percosse, e quando tal mobile risalta indiriato dall’obietto percosso.

Leonardo estudió los dos tipos de colisión detalladamente y con muchas variaciones. En un folio del Manuscrito A (fig. 3.19), dibujó más de una docena de ejemplos de dos bolas sólidas y frágiles con diferentes masas que chocaban con diferentes velocidades y ángulos de incidencia. Los escuetos comentario describiendo cada caso, junto a cada boceto evidencian que estos son los registros de experimentos sistemáticos con colisiones elásticas e inelásticas, tal y como se les llama en la actualidad.



Figura 3.19: Estudios de colisiones elásticas e inelásticas.
Instituto de Francia (París), Manuscrito A de Francia, f. 0008r

A partir de estos experimentos, Leonardo trató de buscar las relaciones cuantitativas entre las masas, las velocidades y los ángulos de las bolas que chocan. Muchos de estos experimentos de colisiones los describió con un lenguaje claro y conciso:

“La bola a se mueve con tres grados de velocidad, y la bola b se mueve con cuatro grados de la velocidad. Me pregunto cómo sería la percusión si la bola [b] iba a estar en reposo en lugar de acercarse a ella [a] con los citados cuatro grados de velocidad.” (MsI_0041v)

En otros pasajes, Leonardo determinó reglas generales sobre las colisiones elásticas. En otro folio del Códice Leicester, se puede leer:

“Si el objeto percutor es igual y semejante al objeto percutido, este objeto percutor deja su potencia por completo sobre el percutido, que sale disparado con furia desde el sitio de la percusión, quedándose el percutor allí. Pero si el percutor, similar pero no igual al percutido, es mayor, no perderá su ímpetu por completo después de la percusión, pero sin llegar a ser la cantidad en que excede a la cantidad percutida. Y si el percutor es menor que el percutido, rebotará y regresará a una distancia mayor que el percutido con una cantidad en la que el percutido exceda al percutor.” (CL_0008r)

Es instructivo examinar más detalladamente las tres descripciones que hace Leonardo en el párrafo anterior. La primera es una descripción precisa de una colisión elástica de dos bolas de igual masa, uno en movimiento y la otra quieta, en la que la "potencia" (energía cinética) de la pelota en movimiento se transfiere completamente a la pelota que permanece inmóvil.

Las otras dos descripciones del párrafo del código Leicester describen dos colisiones entre bolas de masa desigual. En la primera, la pelota en movimiento es más pesada que la pelota que está quieta; en la segunda es más ligera. Estas descripciones de Leonardo son cualitativamente correctas, pero era muy difícil que consiguiera extraer conclusiones correctas en sus intentos de formular las relaciones precisas entre cantidades de masa, velocidad e impulso, que tienen magnitudes diferentes. Esto seguiría siendo un gran desafío para los científicos durante otros dos siglos después de Leonardo.

De hecho, el análisis matemático preciso de los fenómenos de impacto tuvo que esperar hasta el siglo XVII, cuando Huygens usó las leyes tanto de la conservación de la energía y la conservación del momento, formulado en términos de ecuaciones algebraicas, para definir las reglas exactas para las colisiones elásticas.

Leonardo estudiando la percusión y el rebote observó que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Desde sus primeras investigaciones sobre la mecánica, describió en muchas ocasiones la regla fundamental, hoy en día conocida, como la ley de la reflexión. Una declaración sucinta, escrita alrededor de 1500, se puede encontrar en el Código Arundel:

“El ángulo generado a partir del movimiento reflejado sobre un cuerpo pesado es igual ángulo del movimiento incidente.” (CAr_0082v)

En el Manuscrito A, escrito diez años antes, encontramos un pasaje similar: "La línea de la percusión y la de su rebote se sitúan en medio de ángulos iguales." (MsA_0019r). El significado de esta descripción es tal vez menos evidente, pero es claramente ilustrativa con un dibujo y acompañada con una explicación más detallada (fig.3.20):

“Si la bola b se lanza sobre la c, regresará de nuevo por la línea cb, por lo que necesariamente formarán ángulos iguales fg sobre la pared. Y lanzas a través de la línea bd, regresará de nuevo por la línea de, y por lo tanto la línea de la percusión y la línea de rebote formarán un ángulo fg en la pared situado en medio entre dos ángulos iguales, como aparece d en el medio, entre m y n.” (MsA_0019r)

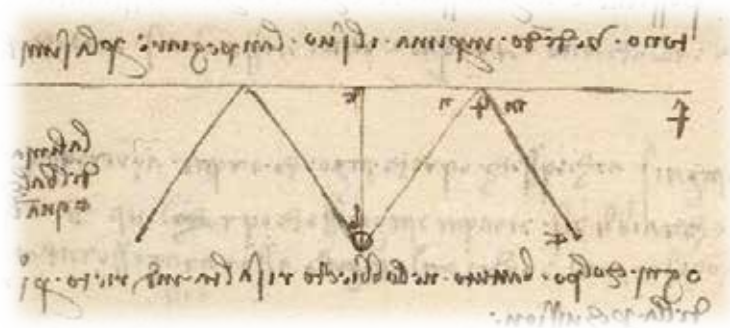


Figura 3.20: Dibujo que explica la ley de la reflexión.
 Instituto de Francia (París), Manuscrito A de Francia, f. 0019r

La ley de la reflexión fue formulada por primera vez en la óptica por el gran matemático árabe Alhazen (Ibn al-Haitham) cuyos siete volúmenes de su obra *Kitab al-Manazir* (Libro de Óptica) estaban disponibles durante el Renacimiento traducido al latín y fue discutida por

varios filósofos europeos. Leonardo se familiarizó con la obra de Alhazen través de estos autores y utilizó la ley de la reflexión en sus diseños de espejos esféricos y parabólicos, realizando una serie de diagramas precisos y bellos. (CAPRA, 2007).

Pero Leonardo fue más allá. Fue el primero en reconocer la generalidad de la ley de la reflexión, aplicándolo no sólo a la mecánica y a la óptica, sino también a la acústica y a la hidrodinámica. En el mismo folio del manuscrito A donde discute el rebote de una pelota lanzada contra una pared, Leonardo añade una breve nota: "*La voz es similar a un objeto visto en un espejo.*" (MsA_0019r). En otras palabras, la ley de la reflexión sirve igualmente para la luz y para el sonido.

Capítulo 4

Leonardo da Vinci

INGENIERO MILITAR

La naturaleza benigna provee de manera que en cualquier parte halles algo que aprender
(Leonardo da Vinci)

4.1. Introducción.

En la famosa carta escrita por Leonardo a Ludovico el Moro, en la que ponía a disposición del poderoso duque de Milán su capacidad como hombre de ciencias y artes, dedica gran parte del texto a inventos de carácter bélico y militar. Describe claramente sus conocimientos sobre el diseño de sistemas para drenar fosos en caso de asedio, la construcción de puentes para uso militar, el diseño de bombardas más potentes y manejables, así como sobre el modo de multiplicar la capacidad de fuego de dichas armas, por no mencionar la construcción de enormes naves de guerra que bien podrían definirse como “acorazados”. Este interés por las armas de fuego novedosas no distrajo la dedicación de Leonardo al estudio de las armas más tradicionales, en particular ballestas y catapultas. Sin embargo, en este caso centró su atención en cómo hacerlas más eficientes y poderosas, tanto en sus dimensiones (algunas veces de un tamaño gigantesco) como en la posibilidad de multiplicar su potencia balística. Prestó también una atención especial a las máquinas de asalto, interesándose en mejorar no sólo la eficiencia, sino también las medidas de seguridad.

Ilustrísimo señor mío: Habiendo visto y juzgado en cantidad suficiente los modelos de todos aquellos que se consideran maestros y constructores de instrumentos bélicos, y como el diseño y las prestaciones de dichos instrumentos no se distinguen en absoluto de las que se usan comúnmente, me atreveré, sin menospreciar a nadie, a reclamar la atención de Vuestra Excelencia, con el propósito de desvelarle mis secretos, y, poniéndome a su completa disposición, me ofrezco para tratar de manera eficaz y en tiempo oportuno sobre todos estos asuntos que, en aras de la brevedad, serán en parte aquí apuntados:

I Dispongo de tipos de puentes muy ligeros y sólidos, adecuados para ser transportados con gran facilidad y, gracias a ellos, seguir o, en alguna ocasión, esquivar a los enemigos. Hay otros que son seguros e indestructibles por el fuego o el fragor de la lucha, fáciles y cómodos de quitar y poner. También conozco las formas de quemar o destruir los puentes de los enemigos.

2 Cuando una plaza es sitiada, sé eliminar el agua de los fosos y hacer numerosos puentes, galerías, escalas y otras máquinas apropiadas para esta clase de empresa.

3 Asimismo, si por razón de la altura de los taludes o por la fortaleza de la plaza o por su posición no fuese posible durante el asedio emplear el recurso de las bombardas, dispongo de procedimientos para destruir cualquier tipo de promontorio o de fortificación, incluso si hubiese sido construida sobre la propia roca.

4 Dispongo, asimismo, de tipos de bombardas muy útiles y fáciles de transportar: con ellas es posible arrojar piedras pequeñas como si se tra-tase de una tempestad, y con la humareda que se forma, causan gran pavor al enemigo, originándole graves daños y confusión.

5 Asimismo, tengo los medios para excavar pasadizos y vías secretas, tortuosas, realizadas sin ningún ruido con el fin de alcanzar [el objetivo] proyectado, incluso si fuese preciso pasar por debajo de un foso o un río.

6 De igual modo, construiré carros cubiertos, seguros e inatacables, los cuales, penetrarán entre los enemigos con su artillería: por grande que sea una compañía de gentes de armas quedarán derrotados. Y tras estos podrá avanzar la infantería sin sufrir daños ni impedimentos.

7 En el caso de que fuese necesario, haré construir bombardas, morteros y pasavolantes, de bellissimo y útil diseño, al margen del tipo común.

8 Allí donde la operación con las bombardas fuese impracticable, construiré brigolas, catapultas, trabuquetes y otras máquinas de admirable eficacia, diferentes de las comunes. En definitiva, según la variedad de las situaciones, construiré diversos y numerosos artificios de carácter ofensivo y [defensivo].

9 (sic) Si la confrontación tuviese lugar en el mar, dispongo de instrumentos de muchas clases, tanto ofensivos como defensivos. Y navíos que resistirán la acción de potentes bombardas, el polvo y las humaredas.

10 En tiempos de paz, creo que puedo compararme a satisfacción con cualquier otro en arquitectura, en construcción de edificios, públicos y privados, y en conducción de aguas de un lugar a otro.

Asimismo, puedo realizar esculturas de mármol, de bronce o de arcilla. Igualmente en pintura puedo hacer tanto y tan bien en comparación con cualquier otro, sea quien sea.

Aún más, resultará posible llevar a cabo la escultura del caballo de bronce, obra que proporcionará gloria inmortal y eterno honor a la feliz memoria del señor, vuestro padre, y a la ínclita casa de los Sforza.

Y si algunas de las cosas sobredichas a alguien pareciesen imposibles e irrealizables, yo estoy dispuesto a hacer una demostración en vuestro parque o en el lugar que le agrade a Vuestra Excelencia, a la cual me encomiendo con muestras de la mayor humildad.

Milán, Biblioteca Ambrosiana. (CA_1082r)

Cuando Leonardo explica en su carta a Ludovico su capacidad para diseñar máquinas bélicas “*fuera de lo común*”, es decir, nuevas, frente a las utilizadas normalmente en el campo de batalla, parecía hacer referencia no sólo a verdaderos “inventos”, nunca vistos, sino también a su habilidad para rediseñar los modelos tradicionales de las armas en uso y proponer otros nuevos con mejoras desde los puntos de vista de mayor tamaño y más eficacia.

Muchos de los diseños de estas máquinas bélicas (armas de fuego, armas tradicionales, máquinas de asedio) destacan de un modo especial por el refinamiento y la belleza artística con que fueron ejecutados. Se suelen considerar “*diseños de presentación*”, es decir, acabados hasta un cierto grado de meticulosidad para la presentación del proyecto al comisionado. Pero en esos diseños, la sofisticación artística y la precisión técnica se combinan en un perfecto equilibrio de un modo fascinante.

De hecho, la búsqueda de lo “*bello*” está íntimamente ligada a la claridad en la presentación del proyecto y a su inteligibilidad para quienes debían proceder a la realización práctica del objeto en cuestión. Por esta razón, junto al diseño de conjunto, aparecen en los dibujos algunos detalles ampliados de la máquina, con esquemas aclaratorios de los dispositivos más importantes.

Tampoco se deben olvidar las fuentes de las que bebió Leonardo en los temas relacionados con el diseño de las máquinas: las leyes de la física; los principios de la estática y la dinámica; la balística, con la búsqueda de fuerzas propulsoras cada vez más poderosas, y el estudio de la tensión de los materiales.

Muchos especialistas han sugerido la hipótesis de que da Vinci preparó el borrador de un tratado sobre el arte militar dedicado a Ludovico el Moro. De hecho, los impresionantes dibujos que se han conservado principalmente en el Códice Atlántico sobre este tema constituyen una confirmación visual sumamente interesante de dicha hipótesis.

4.2. Artefactos y construcciones militares en los manuscritos de Leonardo.

4.2.1. Armas de guerra.

4.2.1.1. Cañones.

4.2.1.1.1. Gran cañón (CA_0059bv).

Se puede apreciar en la parte inferior del folio un gran cañón en posición vertical. Claramente se observa la articulación del mismo a mediados de su longitud permitiendo el balanceo o giro del cañón para poder cambiar sin problemas su ángulo de tiro. La base en forma de arco circular parece limitar el rango de acción del cañón. En la base existen cuatro soportes cúbicos que permiten elevar el punto de oscilación hacia la boca del cañón. Aunque en el dibujo no se contempla explícitamente se podría llegar a entender el dibujo como un enorme compás bigotera donde las patas están sobre los soportes que al acercarlas o alejarlas hace que la guía a la que está solidariamente unido el cañón permita que este ascienda o descienda según se cierre o se abra.

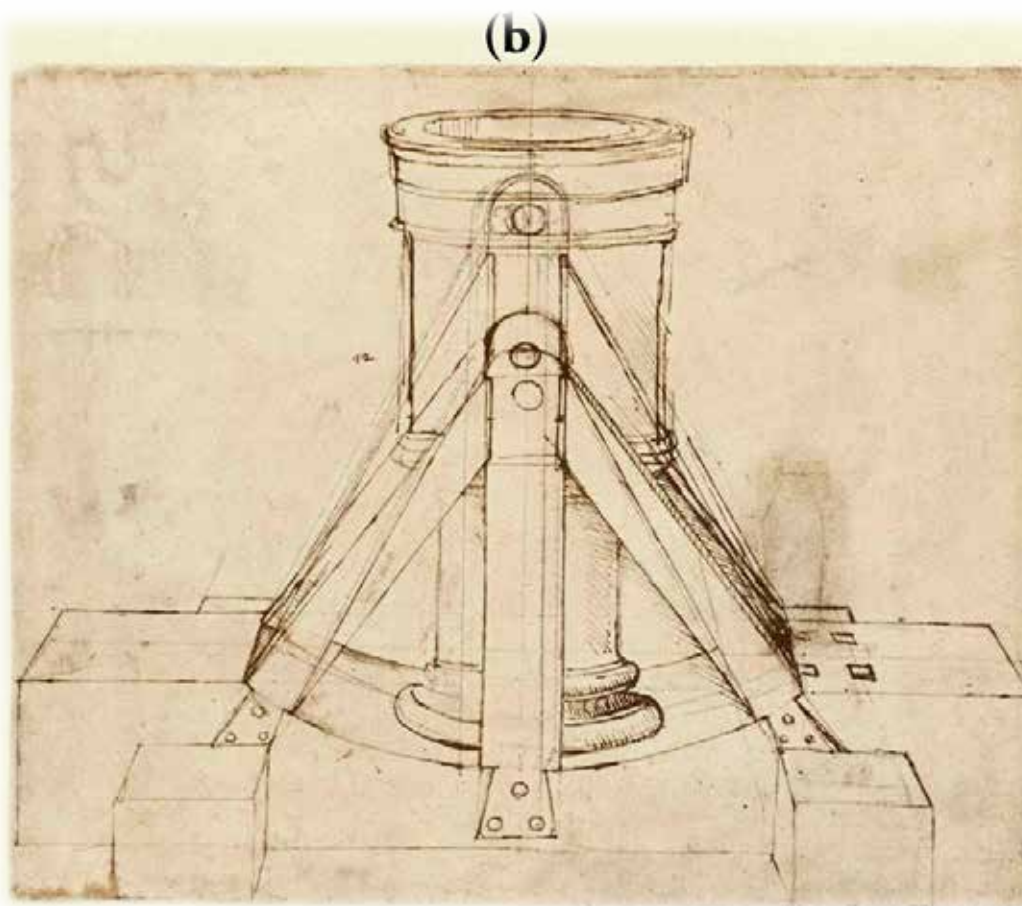


Figura 4.1: Gran cañón.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0059bv

4.2.1.1.2. Bombardas (CA_0154r).

Los bocetos de la izquierda del legajo del folio superior tratan de cómo levantar una bombardas. En el texto que le acompaña de la mano de Leonardo, explica el proceso para levantarla en varias fases sucesivas, usando palancas e insertando cuñas. El dibujo del legajo del folio inferior es mucho más llamativo y con mucho mayor detalle en su realización. La bombardas está dibujada dos veces. El de la izquierda, representada en el suelo, frente al carruaje que lo ha de transportar, antes de ser levantarla tal y como se ha ilustrado en el texto de la parte superior ya comentado. En la parte de la derecha, se aprecia la bombardas ya situada sobre el carruaje de cuatro ruedas especialmente diseñada para abrirse (con caída negativa), lo que le proporciona mucha más estabilidad en el transporte. La tracción será muy probablemente animal, tal y como apunta la viga rematada como si fuera un yugo. No obstante el hecho de que estén bloqueadas las ruedas da a entender que la bombardas está dispuesta para ser usada en ese momento.

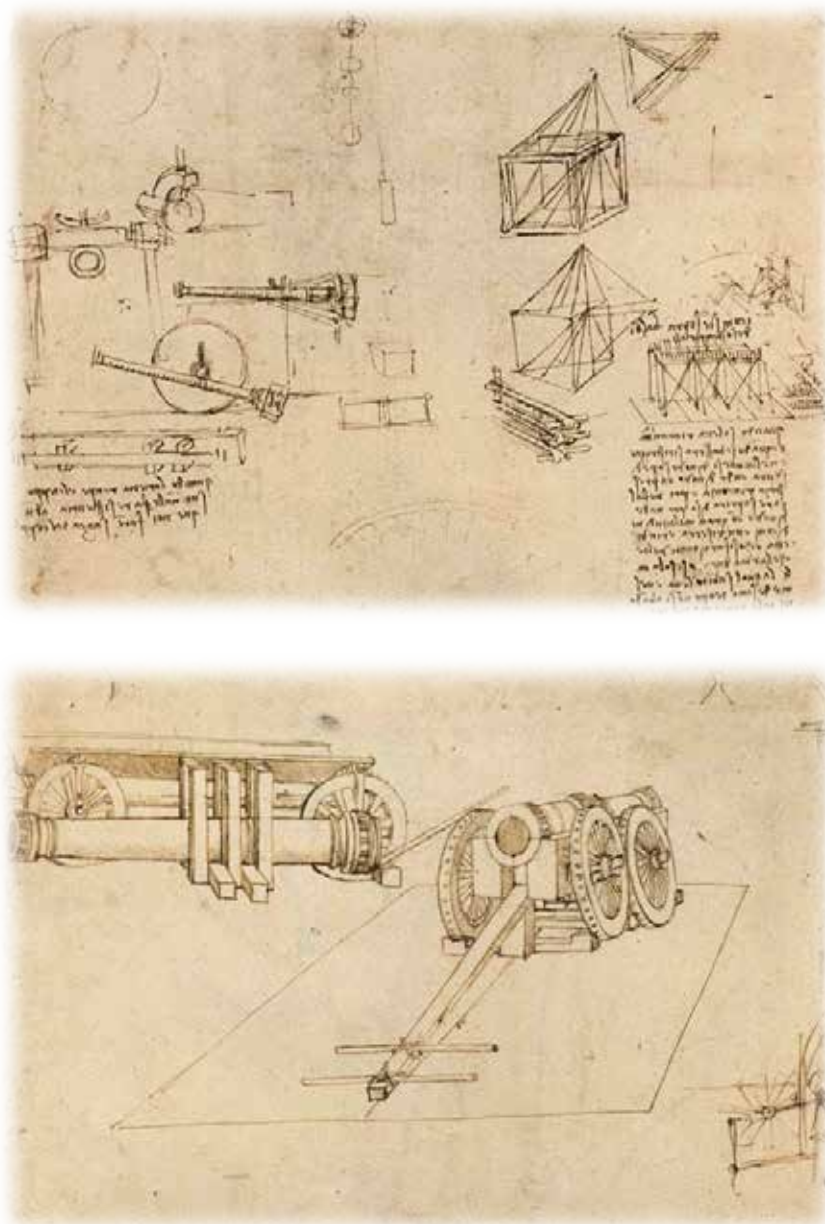


Figura 4.2: Bombardas.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0154r

4.2.1.2. Catapultas.

4.2.1.2.1. Gran catapulta doble (CA_0152r).

Magnífico dibujo de Leonardo. Consta de una estructura cuadrada de madera a modo de armazón donde se sustenta todo el mecanismo que permite articulando una manivela central girar una rueda dentada que al dar vueltas hace girar dos ejes a modo de husillo o tornillos sin fin que transmiten el movimiento a sendas ruedas dentadas dispuestas simétricamente que tienen unidas dos vigas solidarias, la de la izquierda con una honda y la de la derecha con una cuchara trapezoidal en sus extremos. Al mismo tiempo se va tensando unas ballestas a ambos lados unidos también a las ruedas. Cuando se liberan ambas ballestas las vigas se elevan a gran velocidad disparando en ese momento los proyectiles cargados en la honda y en la cuchara.

En la parte inferior del folio se aprecian los detalles que explican el mecanismo para cargar y soltar el disparador. Las dimensiones de las vigas y el peso de los proyectiles aparecen indicados: tras realizar las correspondientes conversiones, se estima que las vigas deberían tener entre 5 y 6 m de longitud, mientras que los proyectiles pesarían hasta 17 kg.

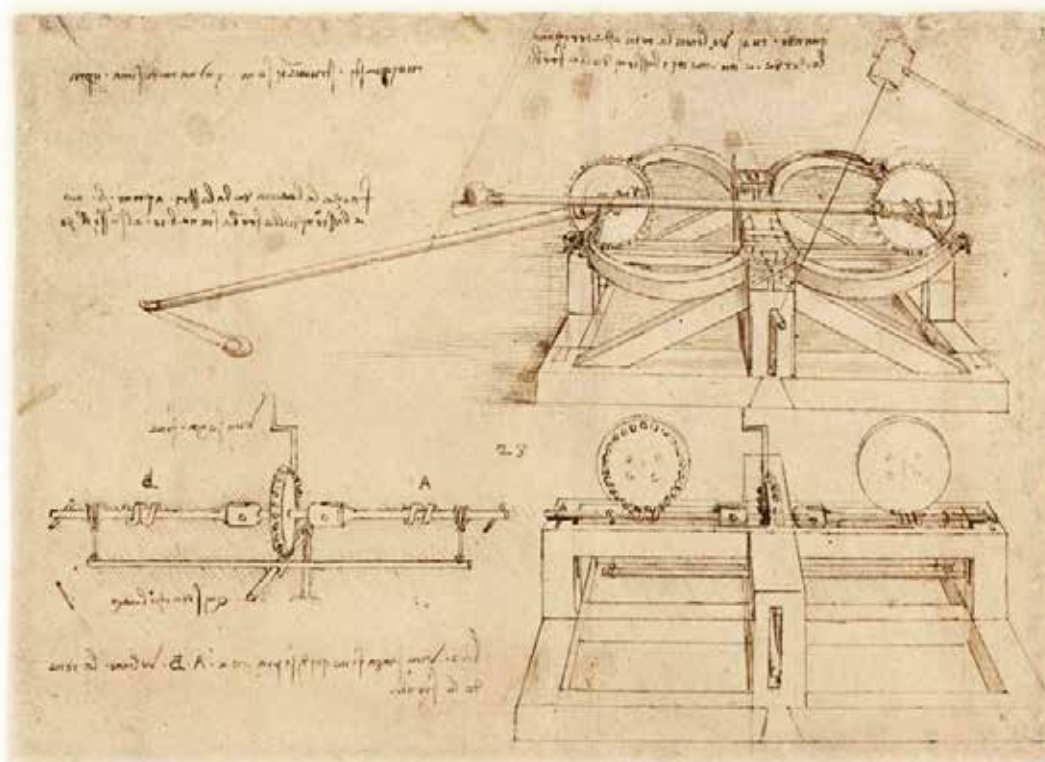


Figura 4.3: Gran catapulta doble.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0152r

4.2.1.2.2. Catapulta múltiple tipo honda (CA_0159r).

El legajo del folio inferior muestra varios diseños de máquinas bélicas con gran detalle, entre ellos la perspectiva de una catapulta tipo honda de grandes dimensiones, pero en este caso particular aumentando la efectividad añadiendo múltiples proyectiles, concretamente 8 brazos con 8 hondas.

Se aprecia una estructura compleja, con una gran rueda central dentada que da vueltas al eje central donde se sostienen en la parte superior los 8 brazos de donde cuelgan las hondas cargadas con sus correspondientes proyectiles. Así mismo la rueda central va unida a una serie de vigas curvas que actúan bajo tensión. Justo en el momento que se acciona el disparo, la rueda giraría velozmente haciendo que el poste central diera vueltas efectuando de esta manera el lanzamiento múltiple de las hondas.

La misión de la larga cuerda que se puede observar en la parte inferior derecha de la catapulta es liberar el bloque de la rueda bajo tensión.

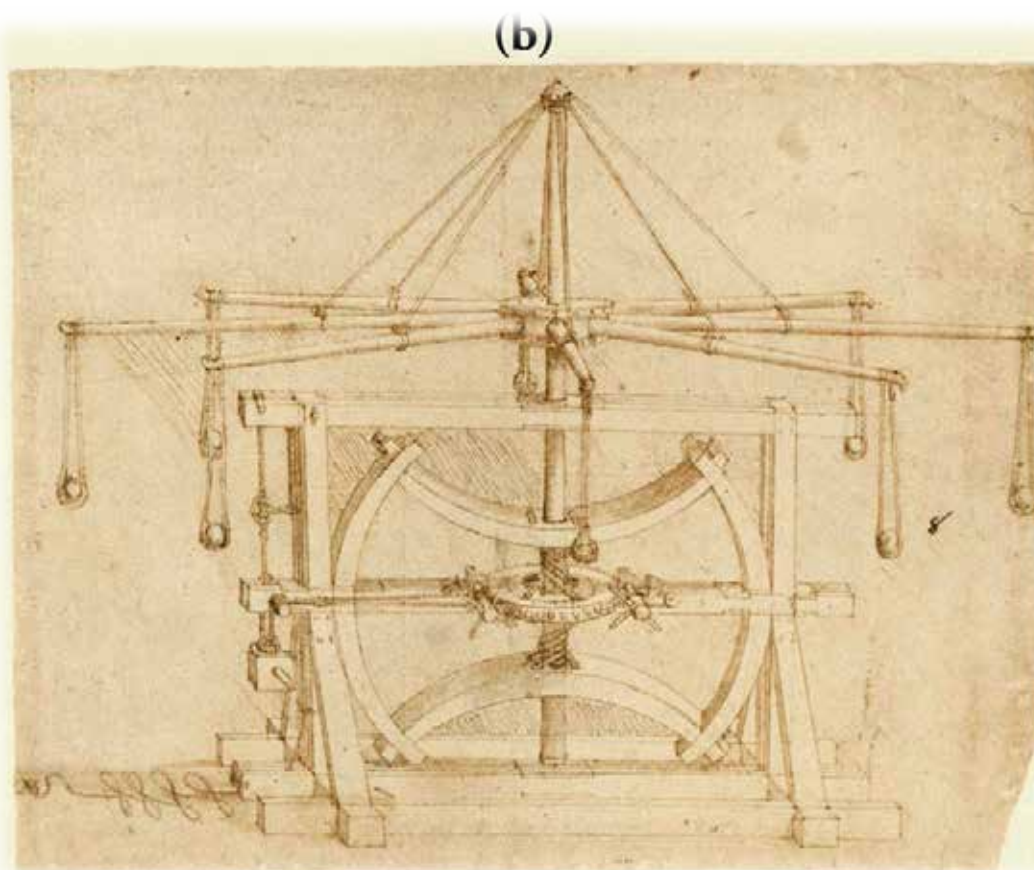


Figura 4.4: Catapulta múltiple tipo honda.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0159r

4.2.1.2.3. Trabuquete, cimitrilla y catapulta tipo honda (CA_0160r).

La mayoría de las armas utilizadas en los asedios durante la Edad Media funcionaban lanzando grandes rocas a distancias enormes intentando ser lo más destructivas posibles. Claramente, Leonardo intenta rediseñar estas armas dotándolas de mayor eficacia y potencia, y estos tres dibujos son un claro ejemplo del intento de Leonardo por mejorar dicho armamento.

En la parte superior izquierda se encuentra el trabuquete. Por medio de un contrapeso se hace girar rápidamente un largo brazo donde se ha colocado al final la honda. En el momento que el brazo alcanza la posición vertical se realiza el lanzamiento del proyectil que estaba alojado en la honda.

En la parte superior derecha se encuentra la “cimitrilla” tal y como Leonardo deja constancia escrita de su denominación. Básicamente se trata de una catapulta múltiple formada por 8 brazos donde se puede observar que la forma de efectuar el disparo se produce por la acción del guerrero que sostiene una gran maza y uno a uno va golpeando el extremo de la catapulta lanzando de esta forma los proyectiles del otro extremo por encima del muro.

En la parte inferior está representada una compleja catapulta tipo honda. Al tirar de la cuerda de la parte frontal, varios mecanismos liberan los brazos tipo ballesta, que al abrirse lanzan con gran violencia hacia adelante la honda con su correspondiente proyectil. Básicamente se podría asemejar a un enorme tirachinas accionado por dos brazos curvos de madera en vez de una goma elástica.

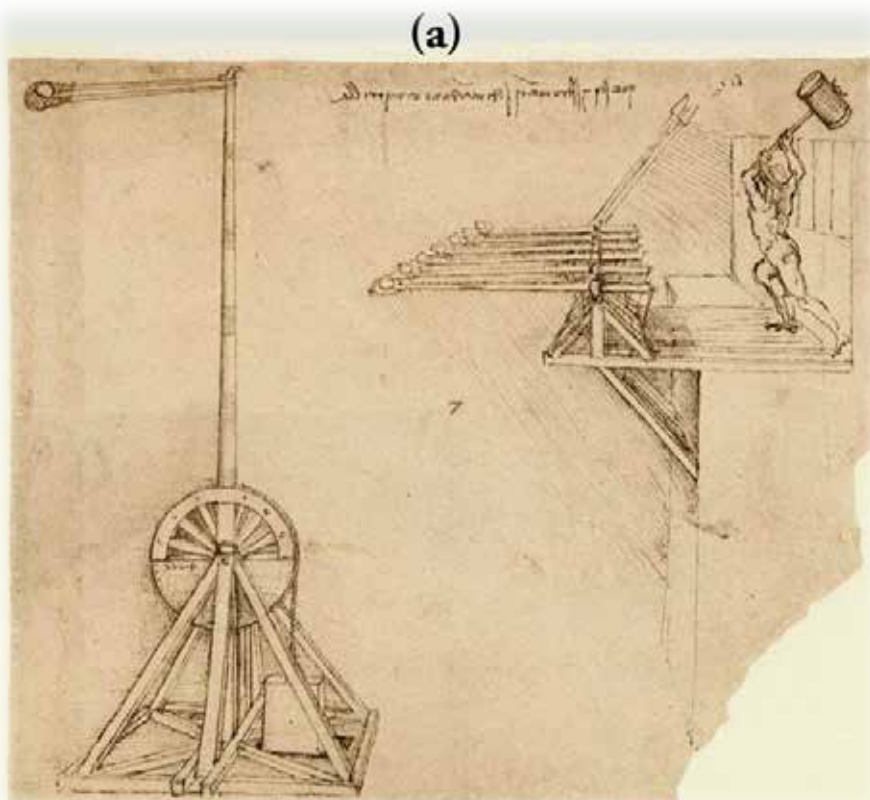


Figura 4.5: Trabuquete y cimitrilla.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0160r

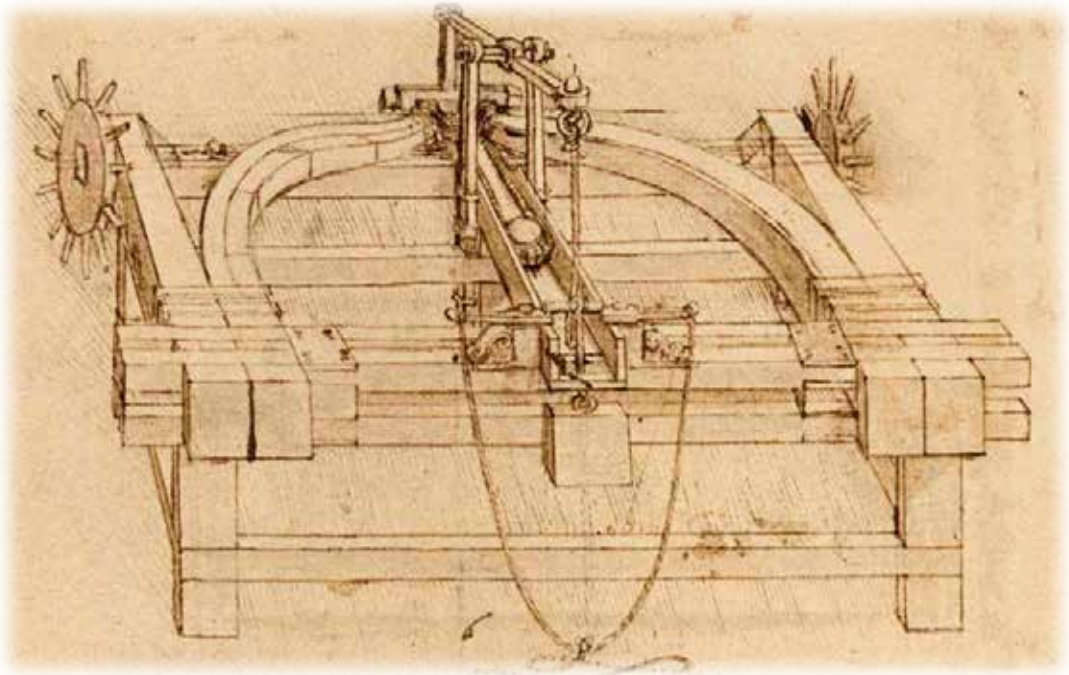


Figura 4.6: Catapulta tipo honda.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0160r

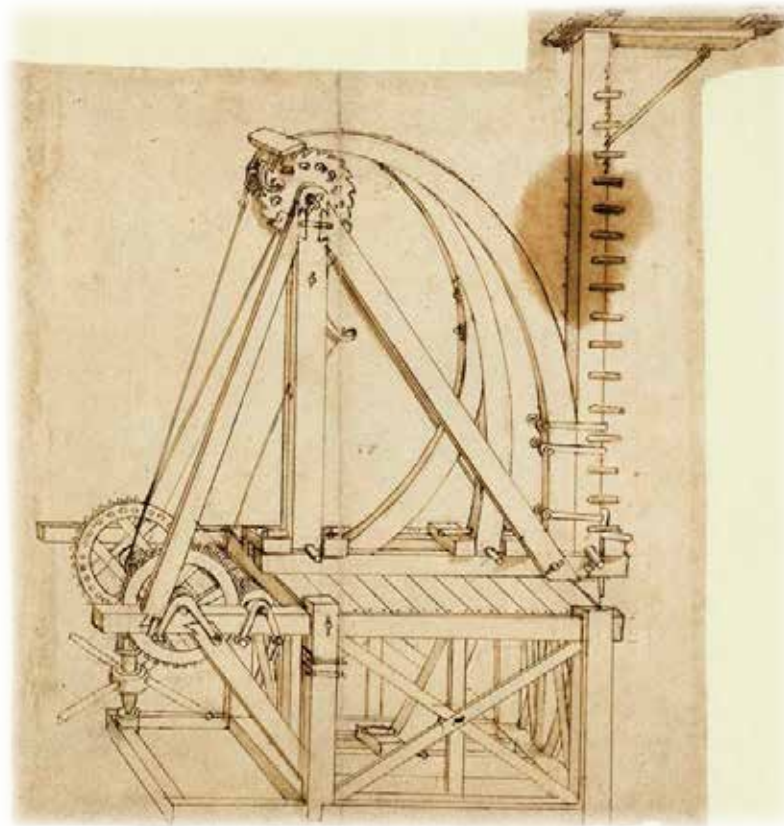


Figura 4.7: Gran catapulta vertical.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0181r

4.2.1.2.4. Gran catapulta vertical (CA_0181r).

Fantástico dibujo representando una enorme catapulta vertical que dispara hasta 8 flechas de gran longitud. Usando un complejo sistema de cabrestantes, engranajes y cuerdas se llega a curvar una enorme viga vertical.

El funcionamiento es bien sencillo, un gran cabrestante de cuatro brazos accionados posiblemente por la acción del hombre hacen girar un eje vertical con una jaula de ardilla que engrana con los travesaños de una gran rueda vertical dentada. Ésta última al girar hace que dé vueltas simultáneamente un eje central al cual se va enrollando una cuerda que va tensando el extremo de la viga vertical que se va flexionando cada vez más, la viga está rematada por una plancha horizontal de madera.

La viga se mantiene fija gracias a la rueda dentada en forma de dientes de sierra de la parte superior. Este eje central al mismo tiempo hace girar otra rueda dentada que engrana con otra jaula de ardilla esta vez dispuesta de forma horizontal, de tal forma que hace girar solidariamente a otro eje donde se va enrollando otra cuerda que se fija a un dispositivo de retención y escape que impide precisamente que se dispare la catapulta.

En la parte derecha de la máquina sale una gran viga vertical con una serie de travesaños para que un soldado pudiera trepar con facilidad y colocar en la parte superior una serie de flechas. Si tenemos en cuenta la altura a la que pudieran estar colocados los travesaños del cabrestante para que fuera cómo impulsarlos por la acción del hombre, se estima que la altura de la catapulta rondaría los 7 metros y que las flechas podrían ser de aproximadamente 2 metros. Cuando se liberaba la rueda dentada, la viga flexionada recuperaba con violencia su posición original golpeando fuertemente las flechas que salían disparadas a gran velocidad.

4.2.1.2.5. Cabestrantes y catapulta doble (CA_0148r).

En el legajo superior, Leonardo diseñó tres tipos de cabestrantes diferentes con la finalidad muy probablemente de servir para la carga de ballestas y catapultas. Las ruedas dentadas en forma de diente de sierra facilitaban sin duda el bloqueo y la aplicación de la fuerza necesaria para que una vez liberado el escape se produjera el lanzamiento con gran violencia.

En el dibujo de la parte inferior se aprecia el diseño de una catapulta con la capacidad de lanzar dos proyectiles casi a la vez. Justo al finalizar el brazo de madera tensado se encuentra alojado el primer proyectil, al cual se le ha enganchado una honda donde se aloja el segundo proyectil. Una vez liberado el sistema que bloquea la honda los proyectiles son lanzados a gran velocidad al recuperar su posición original el brazo lanzador hacia adelante.

Probablemente se pudiera calibrar la catapulta permitiendo corregir el alcance de los proyectiles. En la parte derecha de la misma hay una serie de travesaños que atraviesan el brazo lanzador junto con una polea. Si se van suprimiendo los travesaños uno a uno el brazo lanzador es más largo permitiendo de esta forma hacer que los proyectiles al ser disparados lleguen más lejos.

También se puede apreciar el dibujo de una escalera que se utilizaría para que el soldado de turno pudiera reponer los proyectiles en cada tiro con facilidad. Gracias a la escalera podemos llegar a calcular las dimensiones de la catapulta.

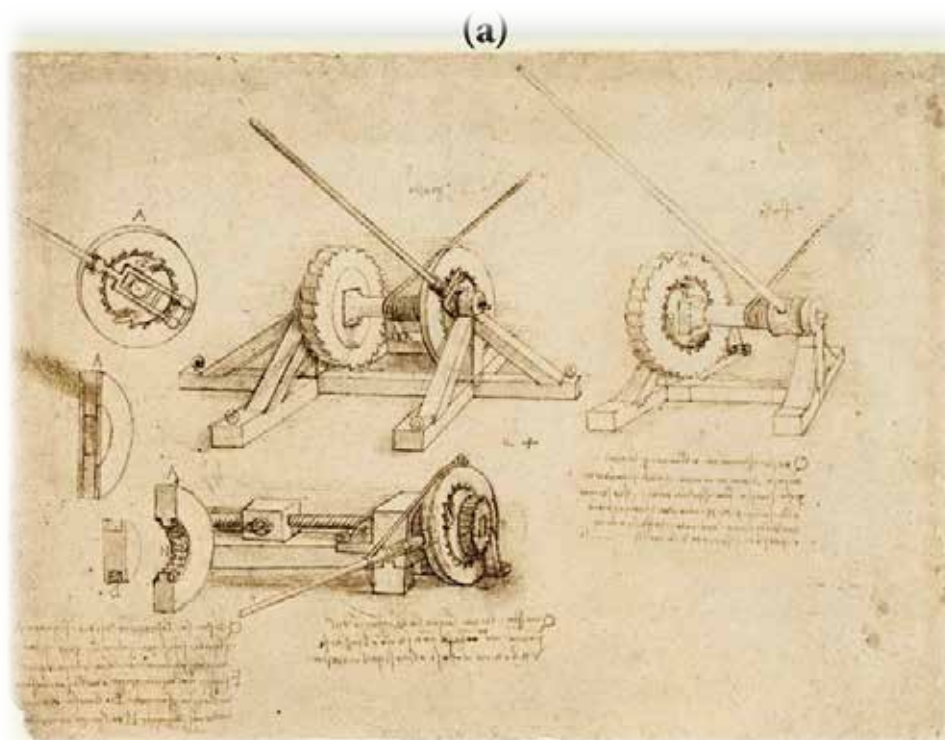


Figura 4.8: Cabestrantes..

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0148ra

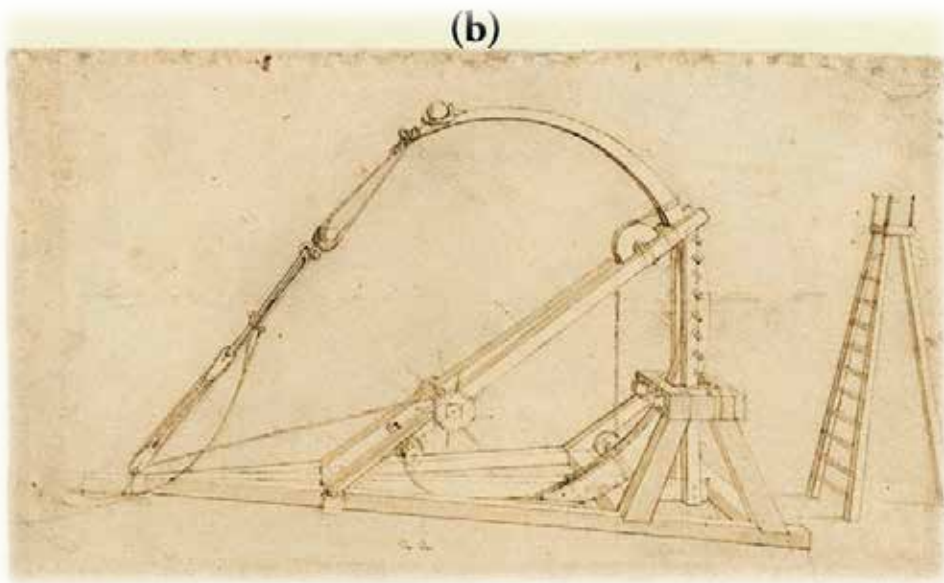


Figura 4.9: Gran catapulta vertical
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0148rb

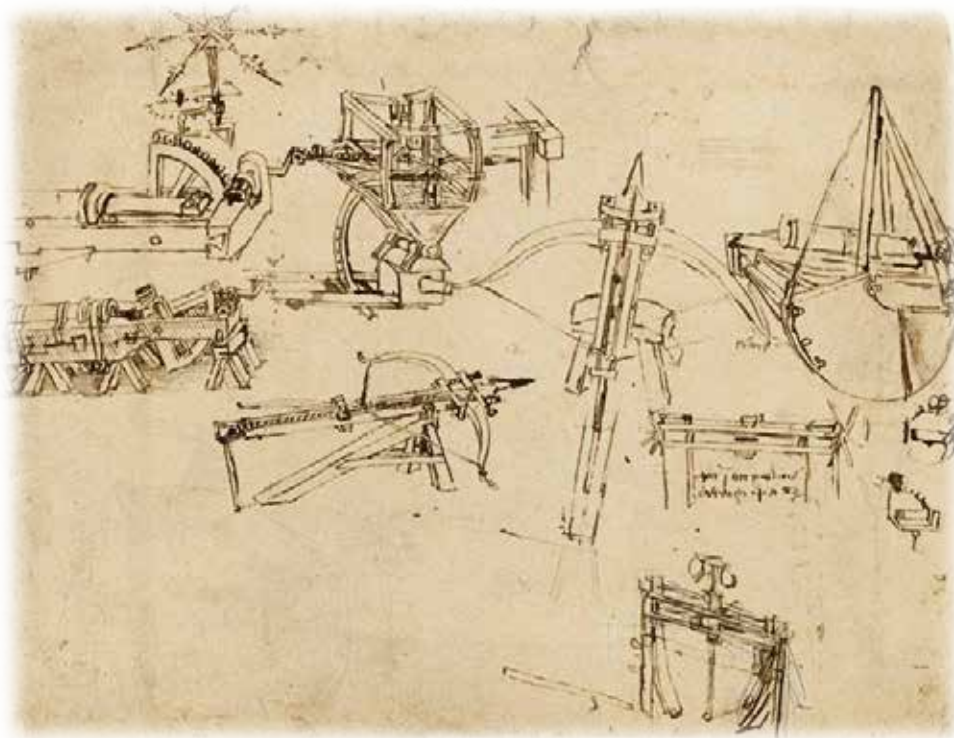


Figura 4.10: Ballestas y bombardas
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0149ra

4.2.1.3. Ballestas.

4.2.1.3.1. Ballesta gigante junto con diversas armas (CA_0149r).

Este folio formado por dos legajos es uno de los más célebres del Códice Atlántico por la ballesta gigante tan minuciosamente detallada en la parte inferior. Aparenta ser un arma mortífera, capaz de lanzar proyectiles de considerable tamaño, a tenor del enorme tamaño de la misma, que Leonardo se encargó de especificar en el texto de la derecha, aproximadamente entre 23 y 24 metros. También el hecho de que Leonardo representara un soldado manipulando la ballesta, nos permite establecer las proporciones correctas. Se aprecia claramente como la descomunal ballesta está situada sobre un enorme carruaje con seis ruedas, con caída negativa para aumentar la estabilidad en los desplazamientos. En la parte inferior derecha, se aprecia el dispositivo para cargar la ballesta y, en la parte izquierda se observan los mecanismos de disparo accionado por un martillo. En el folio superior aparecen numerosos dibujos, en la parte central observamos ballestas montadas sobre caballetes, a ambos lados del folio aparecen dibujos de bombardas, también sobre caballetes; y en la parte superior izquierda una especie de rueda con lanzas afiladas.

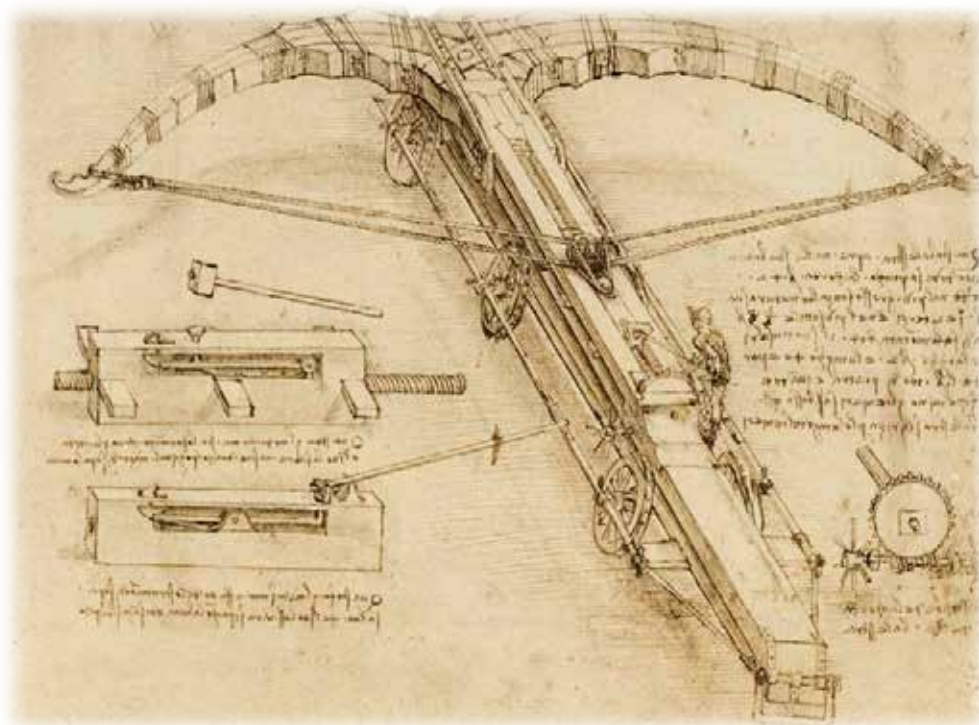


Figura 4.11: Ballesta gigante.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0149rb

4.2.1.4. Armas de fuego.

4.2.1.4.1. Disparador automático con pedernal en el percutor (CA_0158r).

Dibujo de excepcional calidad y detalle que perfectamente se podría utilizar hoy día en cualquier patente. Se aprecia un mecanismo especialmente diseñado para producir el fuego que fuera necesario para una ignición rápida y segura. El muelle interior está conectado a una cadena que a su vez está unida a una rueda, cuando se libera el muelle la rueda gira libremente frotando contra el pedernal, generando de esta forma las chispas de fuego que son necesarias para detonar la pólvora.

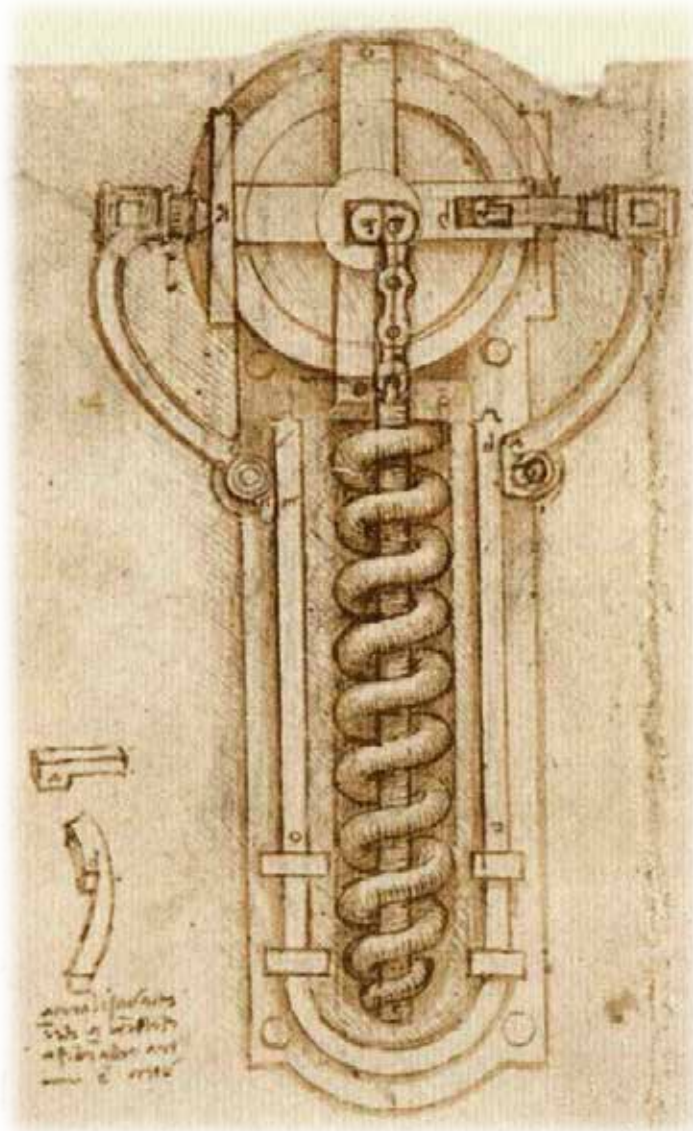


Figura 4.12: Disparador automático con pedernal en el percutor.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0158r

4.2.2. Vehículos armados.

4.2.2.1. Navío de planta circular con cañones (CA_0001r).

La bulliciosa imaginación de Leonardo le llevó a concebir este artefacto naval armado que abre magistralmente el primer folio del Códice Atlántico. En la parte superior se puede observar el dibujo de una forma casi circular –en realidad se trata de un hexadecágono- donde se aprecia en su parte central un rueda de paletas dobles lo que da a entender que se trata de un vehículo flotante, que se podría comparar con los típicos hidropedales que nos encontramos en la actualidad en cualquiera de nuestras playas para pasear de forma ociosa durante el verano.

Las ruedas de paletas proporciona el movimiento a este curioso navío, que se accionan por un sistema de ruedas dentadas que se manipulan por cuatro manivelas, dispuestas tres a un lado y otra en el opuesto. El hecho de que el navío sea casi circular ya es extraño pero lo que le confiere su uso militar es la disposición de 16 cañones que recorren todo el perímetro de la embarcación, distribuidos de forma regular y colocados a pares de forma diametralmente opuestos.

Se le puede dar por tanto el calificativo de “navío de guerra”, un artefacto mortífero capaz de arrasar con sus disparos todo el área circundante, cabría esperar que los cañones se disparasen a pares opuestos para minimizar en lo posible la fuerza de retroceso. Por los tímidos detalles de los dibujos que se aprecian en la parte inferior podríamos imaginarnos toda la embarcación con una cubierta cónica.

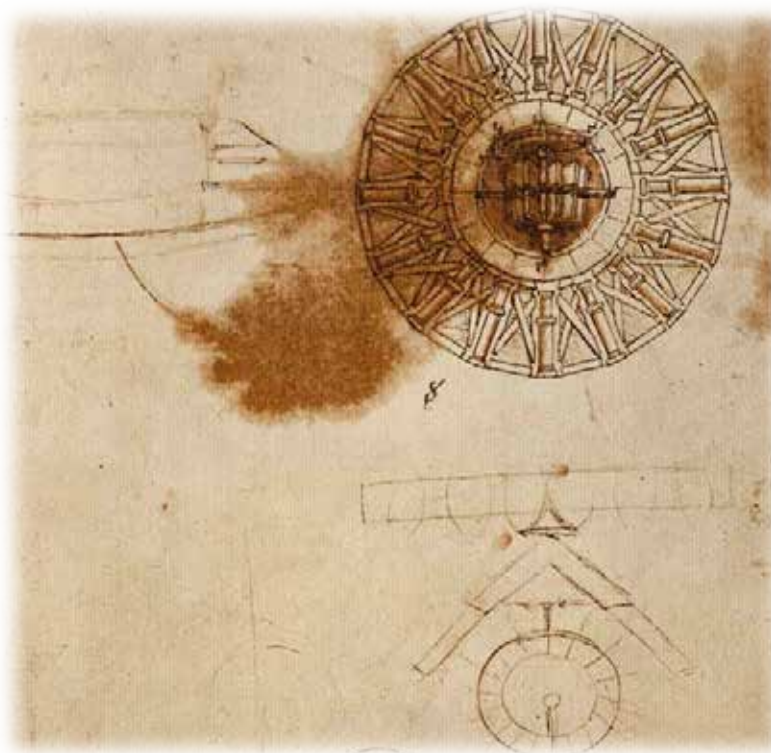


Figura 4.13: Navío de planta circular con cañones.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0001r

4.2.2.2. Barco acorazado (CA_0172r).

En la parte central izquierda del folio, Leonardo ha representado una catapulta, muy similar a las que ha representado en otros muchos folios de sus manuscritos. Sin embargo, en la parte inferior se encuentra dibujado una especie de barco acorazado. Aunque en realidad hay dos dibujos, ambos están referidos al mismo proyecto. En el que está más al fondo, se observa como la embarcación está cubierta con una especie de techo cónico (parte izquierda de la embarcación), y como si hubiera hecho un corte parcial, se aprecia como en la parte derecha, estaría representado el barco (ya sin cubrir, para que se pueda distinguir los que hay en el interior una vez quitado la protección de la coraza cónica).

En el otro dibujo, el que está en primer plano, se aprecia como por medio de un cabrestante se ha girado la coraza cónica, hasta situarla por debajo de la línea de flotación del barco, dejando totalmente al descubierto el navío con su bombardera a la vista, lista para disparar. Las dos estructuras que conforman la coraza tendrían una doble función, cuando están fuera del agua actuarían como pantalla protectora, y cuando están debajo del agua minimizaría la fuerza de retroceso producida por el disparo de la bombardera.



Figura 4.14: Barco acorazado.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0172r

4.2.3. Máquinas de asedio y de asalto a fortificaciones.

4.2.3.1. Máquina de asalto (CA_1084r).

En este folio se aprecia una máquina muy elaborada para asedio y asalto. Se compone de un carruaje móvil equipado con una escala y un puente horizontal cubierto que permite invadir las fortalezas enemigas, con completa seguridad, cruzando el foso defensivo y por encima de las fortificaciones almenadas. Los postes que soportan el puente se prolongan y fijan con alambres para asegurar la estabilidad y el equilibrio de todo el artificio, que de otro modo estaría desequilibrado por su excesivo peso en la parte delantera. También se pueden ver dos detalles muy realistas que confieren gran dinamismo al proyecto. En primer lugar, en el interior del carruaje, se aprecian dos bueyes que lo hacen avanzar; además, el agua en el foso está dibujado con gran precisión, hasta el punto de poderse distinguir las ondas. Por último, en la parte inferior del folio hay varios bocetos a lápiz, probablemente estudios mecánicos para mover la rueda de un molino.

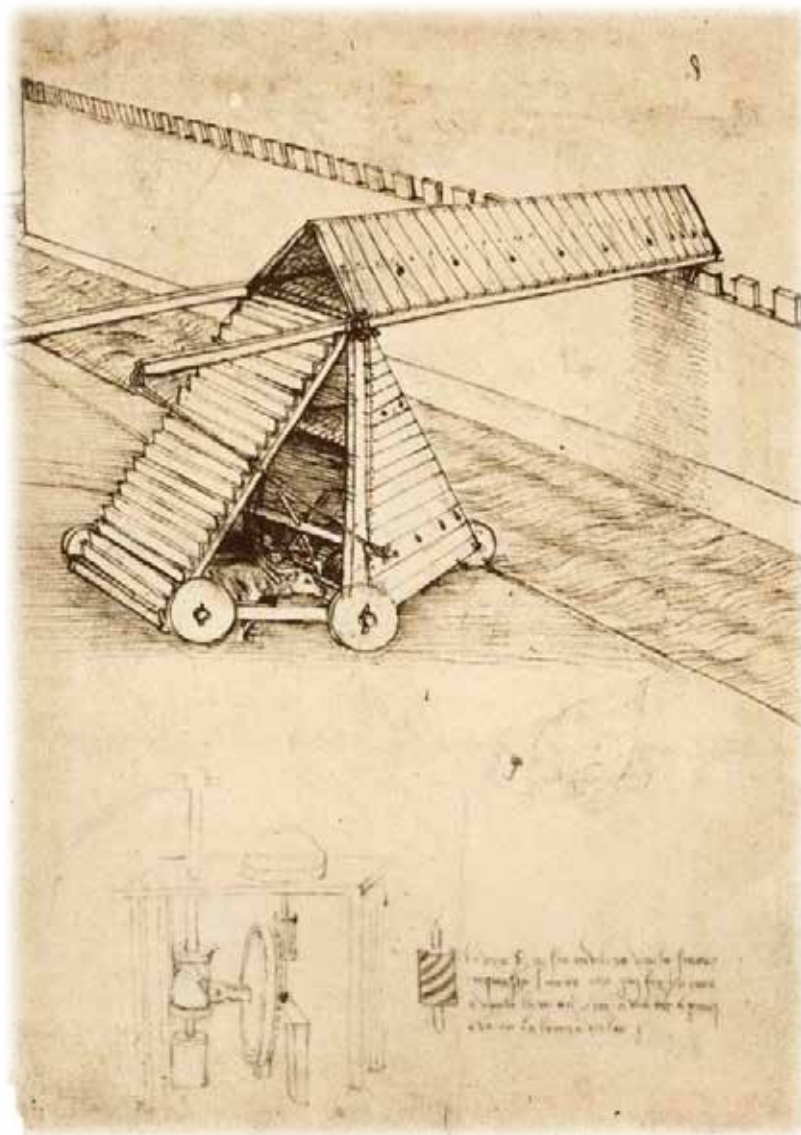


Figura 4.15: Máquina de asalto.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 1084r

4.2.3.2. Sistema para repeler asaltos (CA_139r).

En este folio se muestra un curioso sistema para repeler asaltos, por medio de un sencillo juego de palancas, desde el interior del muro protector, se podía accionar un mecanismo para derribar las escalas de los asaltantes situados fuera de la muralla. La característica singular de este folio es que también incluye los bocetos de cinco hombres ocupados en esta tarea de peculiar defensa.

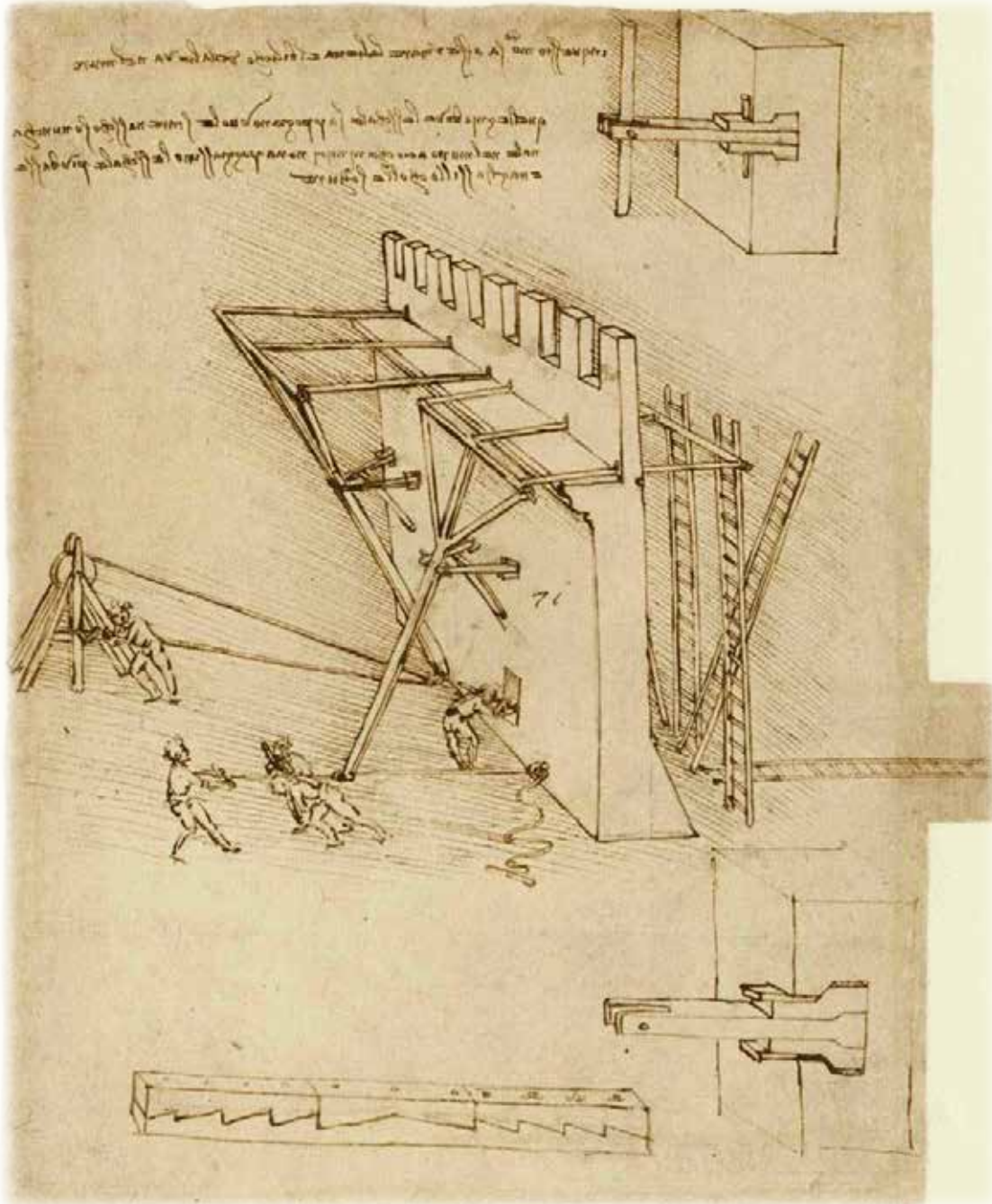


Figura 4.16: Sistema para repeler asaltos.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0139r

4.2.4. Construcciones militares.

4.2.4.1. Puentes.

4.2.4.1.1. Puentes móviles (CA_0855r).

En los asedios era necesario disponer de puentes móviles fáciles de desplazar y montar. En el folio que nos ocupa, Leonardo nos ofrece tres versiones de puente móvil. El que se encuentra en la parte superior, es un puente soportado por pilares, lo que hace que sea más difícil de construir en un breve periodo de tiempo. En segundo, en el centro, tiene la forma de un arco. Sobre el puente se lee claramente, “puente móvil”. Su característica principal es, por tanto, la de ser un puente suspendido. Se mantiene en equilibrio mediante un gran cajón, situado a la derecha, cargado de piedras para hacer contrapeso. Mediante cabrestantes y ruedas, el puente puede girar alrededor del gran poste que sirve de pivote. Entre otras cosas, en la parte superior del puente se puede ver a un jinete sobre un caballo rampante que lo está cruzando. Por último, en la parte inferior, el tercer puente está apenas bosquejado, mostrando unas plataformas apoyadas en barcas o toneles; también se puede ver un gran poste a la derecha que sirve de pivote para que el puente pueda girar sobre sí mismo.

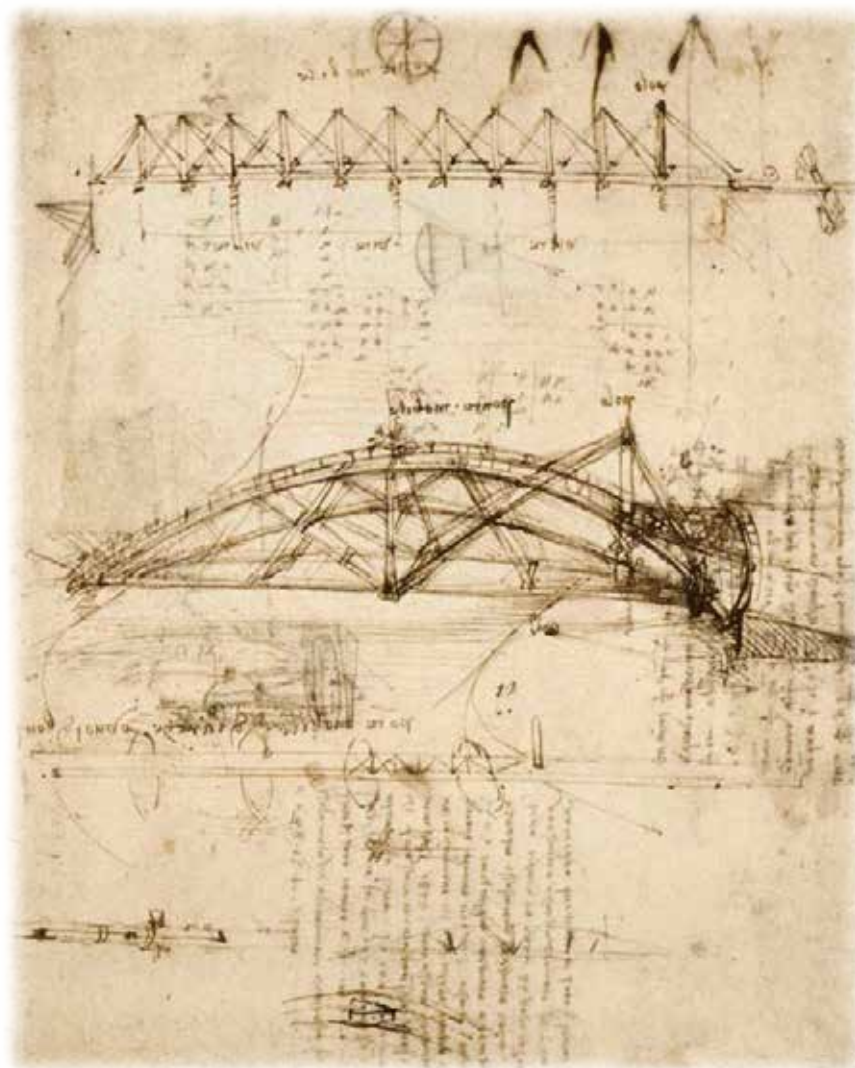


Figura 4.17: Puentes móviles.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0855r

4.2.4.1.2. Puente militar y artillería (CA_0071v).

En los asedios era necesario disponer de puentes móviles para cruzar ríos y fosos; debían ser fácilmente transportables, sencillos de montar y sin necesidad de elementos de fijación. Éste es el caso del diseño que se muestra en el presente folio: los tres cuerpos se fijan uno a otro mediante un procedimiento particular que garantiza la estabilidad y funcionalidad, y forman una estructura en arco que permite a los soldados salvar distintos cursos de agua. En la parte superior del folio destaca el dibujo de un gran cañón, con la boca muy ornada y una recámara enroscable que se muestra en el momento de montaje o desmontaje. La inscripción sobre el dibujo explica la necesidad de guardar una relación precisa entre la cantidad de pólvora que hay que utilizar y las dimensiones y el peso del proyectil que se va a disparar. Por último, en la parte inferior del folio se pueden ver algunos dibujos de detalles del cañón (justo debajo del puente, por ejemplo, podemos ver claramente la recámara enroscada, con proyectil en posición, listo para el disparo) y varios elementos decorativos.

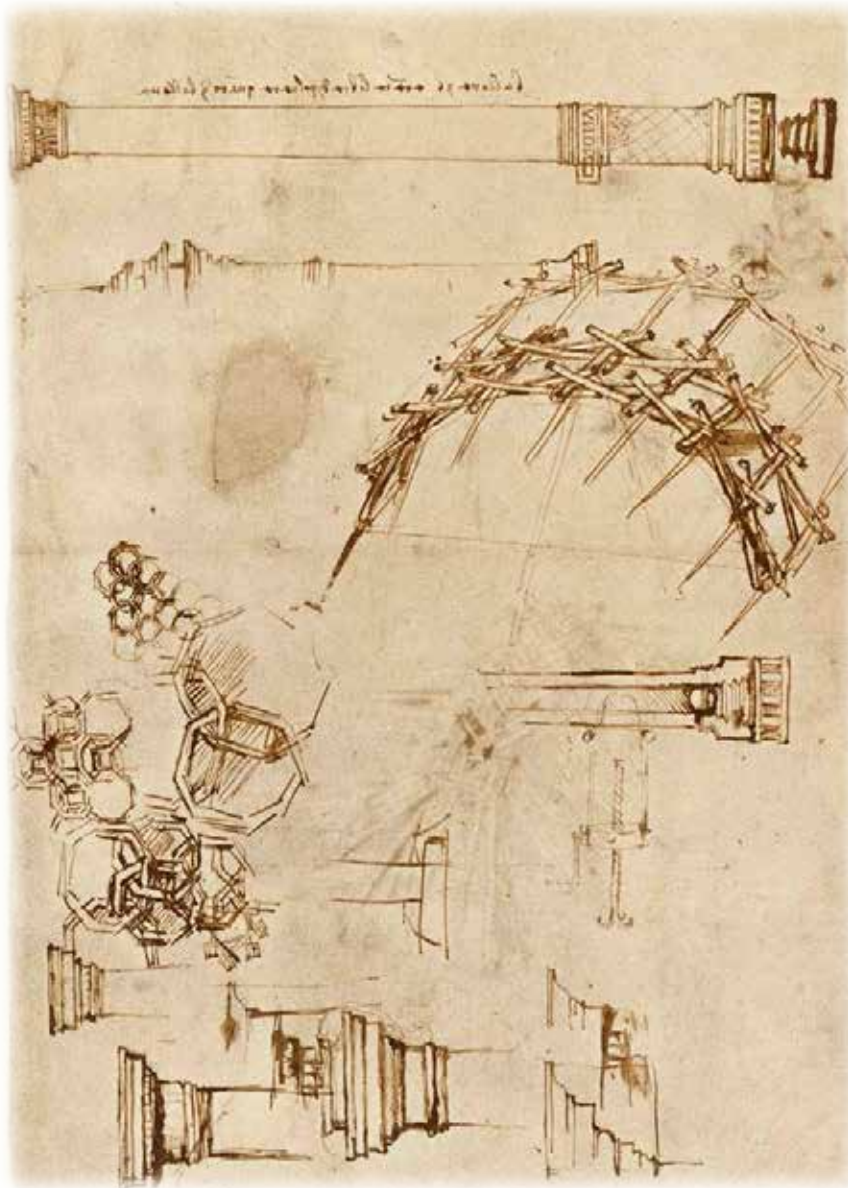


Figura 4.18: Puente militar y artillería.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0071v

4.2.4.2. Baluartes y fortificaciones.

4.2.4.2.1. Estudios de un baluarte (CA_0116r)

Este es uno de los proyectos arquitectónicos militares de Leonardo más elaborado y destaca, asimismo, por el uso que hace de la acuarela. Se muestra la mitad de un bastión grande, en perspectiva oblicua aérea, en la parte central del folio. El baluarte está rodeado por un amplio foso, que a su vez está cercado por dos muros elevados, con un segundo foso intermedio. En la esquina superior izquierda se puede ver detalle del muro defensivo, presentado en sección transversal. Podemos ver que incluso se había planeado un túnel subterráneo, al que se podía acceder por medio de una escalera empinada.

En la parte inferior del folio se puede observar el dibujo de un foso, reproducido igualmente en sección transversal. En su interior, sumergida en el agua, se aprecia una construcción singular con propósitos claramente defensivos; y a la derecha una magnífica perspectiva de un pórtico circular.

Por último hay un curioso boceto pequeño situado entre los dos dibujos más grandes. Representa una pequeña sección del muro defensivo, protegido en su parte exterior por un revestimiento de heno que amortiguaba los golpes de la artillería enemiga, tal como sugiere la breve leyenda “*mojado y cubierto con barro*”.

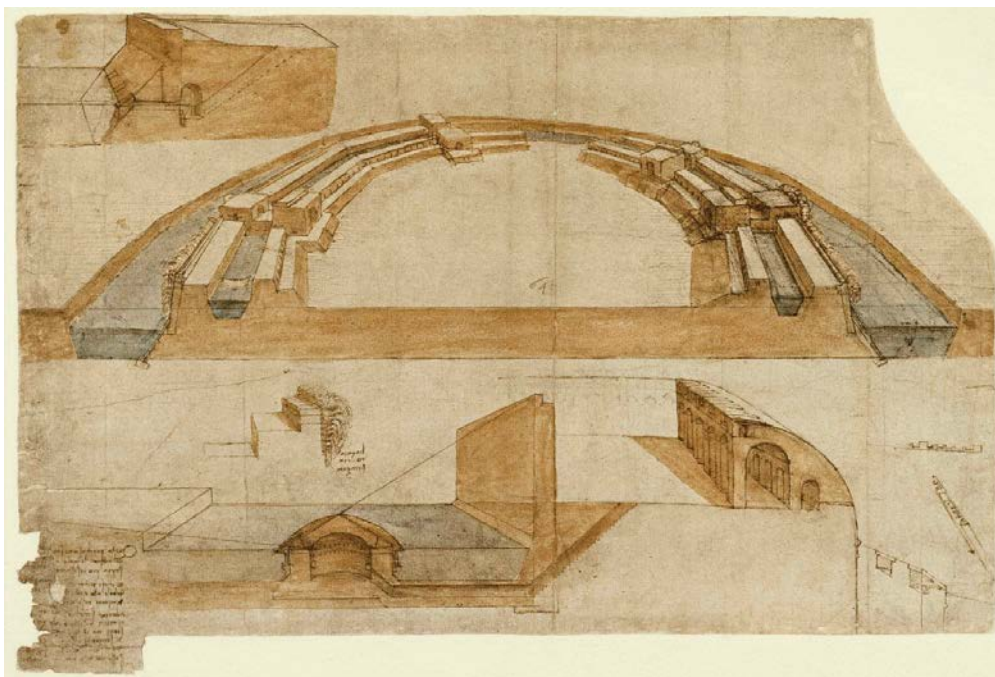


Figura 4.19: Estudios de un baluarte.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0116r

4.2.4.2.2. Fortaleza de planta cuadrada (CA_0117r)

Este folio, aunque por desgracia esté roto, conserva el dibujo de una gran fortaleza, mostrada a vista de pájaro y con una magnífica perspectiva que destaca los detalles y la complejidad arquitectónica del proyecto. Se aprecia claramente un castillo de doble planta (una dentro de la otra), con torres circulares en las esquinas y escarpas muy altas e inclinadas, imposibles de asaltar por el enemigo.

La entrada de la fortaleza, en la parte frontal izquierda, está protegida, además, por un gran revellín, que es una estructura defensiva adicional, por lo general de forma triangular; en este caso, está coronado por dos torres circulares adicionales. Si examinamos a fondo el dibujo, se puede ver que se esbozó a lápiz y que se repasó con pluma, con varias propuestas diferentes respecto a la solución final. Por ejemplo, el revellín originalmente se había concebido como una forma semicircular. Al parecer, este proyecto se realizó para una fortificación que iba a construirse en una zona montañosa, en el actual cantón del Tesino.



Figura 4.20: Fortaleza de planta cuadrada.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0117r

Capítulo 5

Leonardo da Vinci INGENIERO MECÁNICO

*Los que se enamoran de la práctica sin la teoría
son como los pilotos sin timón ni brújula
que nunca podrán saber a dónde van
(Leonardo da Vinci)*

5.1. Introducción.

Las máquinas y sus mecanismos constituyen un pilar fundamental sobre el que se apoya toda la actividad del hombre. El mundo actual se distingue por el uso creciente de máquinas de características diversas y aplicaciones múltiples. Prácticamente nadie queda al margen de este mundo de la máquina, de modo que de una forma u otra todos somos usuarios de ellas. En un futuro próximo, la importancia de la máquina no va a disminuir, pero va a producirse una gran evolución en manos de la electrónica, la informática o los nuevos materiales. En este sentido, las necesidades formativas en el campo de las máquinas son crecientes. En particular, la formación sobre mecanismos y máquinas es esencial para todos los ingenieros.

5.1.1. Descripción y definiciones de la Ingeniería Mecánica.

La Ingeniería Mecánica es la rama del conocimiento y profesión que se ocupa de idear, diseñar, analizar, fabricar, construir y mantener máquinas, instalaciones y plantas industriales, o partes de ellas. Para ello utiliza principalmente los principios de la mecánica de sólidos y de fluidos, la termodinámica y las leyes del comportamiento de los materiales, así como formulaciones matemáticas, técnicas y conocimientos empíricos y criterios económicos.

Así pues, la Ingeniería Mecánica está relacionada con las máquinas y lo que las rodea en una industria, como las estructuras, construcciones e instalaciones industriales. El concepto “máquina” no tiene una definición inequívoca que comprenda a todas las máquinas y distinga claramente las de un tipo de las de otro. El ingeniero y profesor alemán Franz Reuleaux (1829-1905) da una definición que, pese tener más de un siglo de antigüedad, sigue recogiendo bien el concepto mecánico de máquina:

“máquina es un conjunto de elementos sólidos, dispuestos de forma que encaucen las fuerzas mecánicas de la naturaleza para realizar un trabajo como consecuencia de determinados movimientos prefijados”.

Hay otras definiciones similares, como por ejemplo:

“máquina es un sistema formado por partes fijas y móviles que se utiliza para modificar energía mecánica y transmitirla en una forma más útil”.

En estas definiciones aparecen movimientos, fuerzas y energías, que son los principales conceptos físicos con los que se trabaja en ingeniería mecánica.

La definición que hemos dado al comienzo de este apartado no pretende ser completa, ya que es imposible recoger todos los matices de lo que es la Ingeniería Mecánica en un único párrafo, pues como cualquier actividad humana, una profesión en este caso, está interrelacionada con todas las demás existentes en su época. Tampoco pretende ser rigurosa desde un punto lingüístico o entrar en aspectos etimológicos, sino que trata simplemente de describir el núcleo de esta ingeniería, dando a su vez una idea general del ámbito que abarca. Es una ingeniería sólidamente establecida y reconocida en todo el mundo desde hace más de doscientos años, el nombre Ingeniería Mecánica es muy conocido y lo que se entiende por tal, recogido en la definición anterior, tiene muy pocas diferencias en los distintos países.

Existen otras ingenierías, entendidas como profesiones, con tradición y sólidamente establecidas en todo el mundo parte de cuyos campos de trabajo se solapan con los de la Ingeniería Mecánica y que comparten muchos aspectos comunes; tal es el caso de la Ingeniería Aeronáutica (*Aeronautical Engineering, Aerospace Engineering*), Ingeniería Naval (*Marine Engineering*), Ingeniería de Obras Públicas y la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (*Civil Engineering, Structural Engineering, Architectural Engineering*), Ingeniería de Materiales (*Materials Engineering*), Ingeniería de Organización Industrial (*Industrial Engineering*), Ingeniería Eléctrica (*Electrical Engineering*), Ingeniería de Minas.

5.1.2. Breve revisión histórica.

Queda fuera de la finalidad de esta tesis realizar una exhaustiva revisión histórica de la Ingeniería Mecánica, pero como resumen se puede afirmar que tiene raíces muy antiguas ya que el ser humano ha construido herramientas desde sus orígenes, y máquinas más o menos complejas desde hace miles de años, aunque su nacimiento como profesión específica está muy vinculada a la invención y aplicación de la máquina de vapor que se produce con la Revolución Industrial. Su desarrollo posterior fue muy rápido, contribuyendo decisivamente a la aparición y extensión del uso de otros tipos de máquinas como máquinas herramienta, ferrocarriles, ascensores y elevadores, depósitos y conducciones, automóviles, electrodomésticos, aeronaves, vehículos militares de diferentes tipos, generadores, motores, turbinas y otros. Los avances en Ingeniería Mecánica han aprovechado también los de otras áreas como materiales, control, electrónica y computadores por citar algunos. Es sobre todo el computador y su extensión a todos los ámbitos de la actividad humana el que está impulsando el cambio que se ha producido en esta ingeniería en las últimas décadas y es previsible que esta tendencia continúe, a la vez que es también previsible que los avances en nuevos materiales puedan suponer a su vez un impulso adicional en el futuro.

Por enumerar brevemente algunos personajes conocidos que han contribuido especialmente al avance de esta área de actividad humana, y empezando por la antigüedad clásica, se puede citar al griego Arquímedes de Siracusa (*Αρχιμήδης*, 287-212 AC), científico e ingeniero, inventor de la bomba hidráulica de tornillo sin fin, la polea compuesta y diversas máquinas de guerra. El griego Herón de Alejandría (*Ἡρόων*, primer siglo de nuestra era), matemático e ingeniero, ideó entre otras cosas la primera máquina de vapor de la que se tiene constancia, el “*Aeolipilo*”, aunque no le dio aplicación práctica. A veces se suele incluir en esta lista también al famoso florentino Leonardo da Vinci (1452-1519), aunque sus trabajos tuvieron muy escasa, si alguna, repercusión práctica en su época. Es precisamente este tipo de afirmaciones las que pretendemos abordar en la presente tesis doctoral, independientemente de la repercusión que pudieran tener las invenciones que ideó Leonardo

en su época, si se le puede considerar o no como un ingeniero mecánico, y entrar en la lista por derecho propio. Es realmente a partir de la Revolución Industrial del siglo XVIII cuando se puede ya hablar con toda propiedad de Ingeniería Mecánica tal y como se entiende esta profesión hoy día, siendo el escocés James Watt (1736-1819), inventor de la máquina de vapor, el más conocido de esa época y considerado como el “padre” de la ingeniería mecánica moderna. El inglés George Stephenson (1781-1848), calificado a veces también como “padre de los ferrocarriles” y primer presidente de la *Institution of Mechanical Engineers* (IMechE hoy día). El serbio Nikola Tesla (1856-1943), ingeniero eléctrico y mecánico, muy conocido por sus contribuciones a la electricidad y magnetismo. El escocés William John Macquorn Rankine (1820-1872), físico e ingeniero, con importantes contribuciones en termodinámica, máquinas de vapor y estudios de fatiga de materiales. Osborne Reynolds (1842-1912), inglés, con muy importantes contribuciones a la mecánica de fluidos. Rudolf Diesel (1858-1913), alemán nacido en París, inventor del tipo de motor que lleva su nombre. Otros ingenieros mecánicos alemanes con mucha influencia en el desarrollo del automóvil son Gottlieb Daimler (1834-1900), Karl Benz (1844-1929), Ferdinand Porsche (1875-1951) y Felix Wankel (1902-1988). También hay que citar al norteamericano Henry Ford (1863-1947) que desarrolló el concepto de línea de montaje y producción en serie. El ruso-americano Igor Sikorsky (1880-1972), ingeniero aeronáutico y mecánico, inventor del concepto de helicóptero actual con un rotor principal y uno de cola.

En España, los antecedentes de la ingeniería mecánica se remontan al “Siglo de Oro” en el cual el descubrimiento de América supuso un impulso cultural y de actividad industrial muy importante, con desarrollos también en los campos de arquitectura, construcción naval, minería y metalurgia y construcción de armamento. Aunque son generalmente poco conocidos, de esa época destacan nombres como Jerónimo de Ayanz y Beaumont, Pedro Juan de Lastanosa y Juanelo Turriano. Posteriormente, ya a principios del siglo XIX, destaca Agustín de Betancourt quien ya en época tan temprana escribió junto con José María Lanz un libro titulado “*Essai sur la Composition des Machines*” (Ensayo sobre la Composición de las Máquinas).

Por supuesto, hay muchos más nombre notables, sobre todo en el ámbito académico, pero los aquí citados son los más conocidos y pueden dar una idea de la evolución de los resultados más tangibles de la ingeniería mecánica a lo largo del tiempo. En años recientes, el enorme desarrollo que ha experimentado la tecnología y la ingeniería en todos los ámbitos, con un crecimiento exponencial de la tecnología, de la industria y del número de ingenieros en el mundo, hace que no destaquen figuras individuales, lo que justifica la ausencia de nombres correspondientes a las últimas décadas en la lista anterior pese a ser en el período en el que las máquinas en general han experimentado su mayor crecimiento en prestaciones, campos de aplicación, asequibilidad y generalización de su uso.

5.1.3. Asociaciones y Sociedades de Ingeniería Mecánica.

Todos los países desarrollados tienen algún tipo de asociaciones relacionadas con la profesión de ingeniería mecánica. Se citan seguidamente aproximadamente por orden de antigüedad algunas Asociaciones y Sociedades que existen en el campo de la Ingeniería Mecánica; unas son nacionales y otras internacionales y con actividad e influencia diversas.

IMechE (1847), the Institution of Mechanical Engineering, Gran Bretaña. <http://www.imeche.org/>

ASME (1880), the American Society of Mechanical Engineering, USA; ASME International, internacional. <http://www.asme.org/>

VDI (1884), Verein Deutscher Ingenieure, Alemania. <http://www.vdi.eu/>

Colegios Oficiales de Ingenieros Industriales (origen hacia 1905), España.
<http://www.iies.es/>

SAE (1905), Society of Automotive Engineers, USA; SAE International, internacional.
<http://www.sae.org/>

SIMP (1926), Stowarzyszenie Inżynierów Mechaników Polskich (Asociación de Ingenieros Mecánicos Polacos), Polonia. <http://www.simp.pl/>

AFM (1946), Asociación Española de Fabricantes de Máquina-Herramienta, España.
<http://www.afm.es/>

FISITA (1948), Fédération Internationale des Sociétés d'Ingénieurs des Techniques de l'Automobile/ International Federation of Automotive Engineering Societies, internacional. <http://www.fisita.com/>

CIRP (1951), Collège International pour la Recherche en Productique (internacional).
<http://www.cirp.net/>

AIMETA (hacia 1960) Assoziacione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata y GMA (hacia 1990) Grupo di Meccanica Applicata a le Machine, Italia.
<http://www.aimeta.it/>

IFTToMM (1969), International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science (internacional). <http://www.iftomm.org/>

CSME/SCGM (1970), the Canadian Society of Mechanical Engineering/ Société canadienne de génie mécanique, Canada. <http://www.csme-scgmm.ca/>

AEIM (1983), Asociación Española de Ingeniería Mecánica, España.
<http://www.asoc-aeim.es/>

AIP-PRIMECA (1984), Ateliers Inter-établissements de Productique- Pôles de Ressources Informatiques pour la Mécanique, Francia. <http://www.aip-primeca.net/>

IFR (1987), International Federation of Robotics, internacional. <http://www.ifr.org/>

FeIbIM (1995), Federación Iberoamericana de Ingeniería Mecánica.
<http://www.feibim.org/>

ASEPA (1996), Asociación Española de Profesionales de Automoción, España.
<http://www.asepa.es/>

AFM (1997), Association Française de Mécanique, Francia. <http://www.afm.asso.fr/>

Se puede decir que a fecha de hoy es ASME (American Society of Mechanical Engineering) la más conocida y con mayor influencia y difusión a nivel internacional, ya que pese a ser una asociación de los EEUU de América sin embargo tiene secciones y socios en todo el mundo a través de ASME International. También la asociación británica IMechE tiene una influencia directa y muy importante en la profesión de ingeniería mecánica en Gran Bretaña y en otros países de la Commonwealth. Otras de las citadas son de ámbito internacional o limitado a partes concretas de la ingeniería mecánica, como por ejemplo FISITA (automoción), IFTToMM (teoría y ciencia de máquinas y mecanismos), IFR (robótica) o CIRP (fabricación). También se han incluido en la lista anterior los Colegios de Ingeniería Industrial en España, ya que la ingeniería mecánica está considerada desde un punto de vista profesional como una parte de la ingeniería industrial y dichos Colegios han tenido, hasta el momento, una considerable influencia por ser quienes tutelan las profesiones con atribuciones profesionales reguladas por ley.

5.2. Leonardo y la ingeniería mecánica en el renacimiento.

En los albores del siglo XV, tras varios siglos de discriminación, las técnicas volvieron a ser argumento digno de los tratadistas. A partir de Taccola, los ingenieros manifestaron su ambición por convertirse en autores de tratados compuestos de textos e imágenes, como se observa en Francesco di Giorgio, en Giovanni Fontana y, sobre todo, en Leonardo. La antigua tradición técnica se había documentado con textos rara vez acompañados de imágenes; pero una de las innovaciones más importantes del siglo XV fue recurrir cada vez más al dibujo como instrumento de demostración y comunicación. En el transcurso de pocos decenios se definieron las convenciones gráficas necesarias para visualizar máquinas y dispositivos mecánicos complejos.

Leonardo pensaba que la mecánica era la más noble de las ciencias "puesto que vemos que por medio de ella realizan sus acciones todos los cuerpos animados que poseen movimiento". Previó el principio de inercia, que después Galileo demostró experimentalmente, vio la imposibilidad experimental del "movimiento continuo" como fuente de energía, adelantándose en esto a Stevin de Brujas. Aprovechó el conocimiento de esta imposibilidad para demostrar la ley de la palanca por el método de las velocidades virtuales, un principio que ya enunciaba Aristóteles y que utilizaron más tarde Bernardino Baldi y Galileo.

5.3. Clasificación de las máquinas y mecanismos en los Códices de Leonardo.

5.3.1. Introducción.

Sin duda ninguna la tarea más laboriosa que hemos tenido que realizar ha sido la identificación de todas las máquinas y mecanismos que Leonardo da Vinci nos regaló en sus manuscritos.

Para ello hemos tenido que analizar, sintetizar, ordenar y clasificar en base a una serie de criterios. Básicamente hemos tratado de identificar aquellos operadores básicos de las máquinas que contribuyes a transmitir el movimiento, entre los folios de los manuscritos de Leonardo.

Hace mucho tiempo que el ser humano se planteó la necesidad de realizar trabajos que sobrepasaban su propia capacidad física o intelectual. Ejemplos tenemos a millares: mover rocas enormes, elevar coches para repararlos, transportar objetos o personas a grandes distancias, extraer sidra de la manzana, cortar árboles, resolver gran número de problemas en poco tiempo. Para solucionar estos grandes retos se inventaron las máquinas: una grúa o una excavadora son máquinas; pero también lo son una bicicleta, o los cohetes espaciales; sin olvidar tampoco al simple cuchillo, las imprescindibles pinzas de depilar, el adorado ordenador o las obligatorias escaleras. Todos ellos son máquinas y en común tienen, al menos, una cosa: todos son inventos humanos cuyo fin es reducir el esfuerzo necesario para realizar un trabajo.

Prácticamente cualquier objeto puede llegar a convertirse en una máquina sin más que darle la utilidad adecuada. Por ejemplo, una cuesta natural no es, en principio, una máquina, pero se convierte en ella cuando el ser humano la usa para elevar objetos con un menor esfuerzo (es más fácil subir objetos por una rampa que elevarlos a pulso); lo mismo sucede con un simple palo que nos encontramos tirado en el suelo, si lo usamos para mover algún objeto ya lo hemos convertido en una máquina.

5.3.2. Tipos de máquinas.

Analizando nuestro entorno podemos encontrarnos con máquinas sencillas (como las pinzas de depilar, el balancín de un parque, un cuchillo, un cortaúñas o un motor de gomas), complejas (como el motor de un automóvil o una excavadora) o muy complejas (como un cohete espacial o un motor de reacción), todo ello dependiendo del número de piezas empleadas en su construcción.

También nos podemos fijar en que el funcionamiento de algunas de ellas nos resulta muy fácil de explicar, mientras que el de otras solo está al alcance de expertos. La diferencia está en que algunos de ellos solo emplean un paso para realizar su trabajo (máquinas simples), mientras que otros necesitan realizar gran cantidad de trabajos encadenados para poder funcionar correctamente (máquinas compuestas). La mayoría de nosotros podemos describir el funcionamiento de una escalera (solo sirve para subir o bajar por ella) o de un cortaúñas (realiza su trabajo en dos pasos: una palanca le transmite la fuerza a otra que es la encargada de apretar los extremos en forma de cuña); pero nos resulta imposible explicar el funcionamiento de un ordenador, un motor de automóvil o un satélite espacial.

Por último podemos ver que algunas de ellas son esencialmente mecánicas (como la bicicleta) o electrónicas (como el ordenador); pero la mayoría tienen mezcladas muchas tecnologías o tipos de energías (una excavadora dispone de elementos que pertenecen a las tecnologías eléctrica, mecánica, electrónica, hidráulica, neumática, térmica, química... todo para facilitar la extracción de tierras).

5.3.3. Máquinas simples y compuestas.

5.3.3.1. Máquinas simples.

Cuando la máquina es sencilla y realiza su trabajo en un solo paso nos encontramos ante una máquina simple. Muchas de estas máquinas son conocidas desde la prehistoria o la antigüedad y han ido evolucionando incansablemente (en cuanto a forma y materiales) hasta nuestros días.

Algunos inventos que cumplen las condiciones anteriores son: cuchillo, pinzas, rampa, cuña, polea simple, rodillo, rueda, manivela, torno, hacha, pata de cabra, balancín, tijeras, alicates, llave fija...

Las máquinas simples se pueden clasificar en tres grandes grupos que se corresponden con la principal aplicación de la que derivan: rueda, palanca y plano inclinado.

5.3.3.1.1. Palanca.

Es un operador compuesto de una barra rígida que oscila sobre un eje. Según los puntos en los que se aplique la potencia (fuerza que provoca el movimiento) y las posiciones relativas del eje y de la barra se pueden conseguir tres tipos diferentes de palancas a los que se denomina: de primero, segundo y tercer género (o grado). El esqueleto humano está formado por un conjunto de palancas cuyo punto de apoyo (fulcro) se encuentra en las articulaciones y la potencia en el punto de unión de los tendones con los huesos; es por tanto un operador presente en la naturaleza.

De este operador derivan multitud de máquinas muy empleadas por el ser humano: cascanueces, alicates, tijeras, pata de cabra, carretilla, remo, pinzas...

5.3.3.1.2. Plano inclinado.

Es un operador formado por una superficie plana que forma un ángulo oblicuo con la horizontal. Las rampas que forman montañas y colinas son planos inclinados, por tanto este operador también se encuentra presente en la naturaleza.

De este operador derivan máquinas de gran utilidad práctica como: cuña, hacha, sierra, cuchillo, rampa, escalera, tornillo-tuerca, tirafondos...

5.3.3.1.3. Rueda.

Es un operador formado por un cuerpo redondo que gira respecto de un punto fijo denominado eje de giro.

Normalmente la rueda siempre tiene que ir acompañada de un eje cilíndrico (que guía su movimiento giratorio) y de un soporte (que mantiene al eje en su posición).

Aunque en la naturaleza también existen cuerpos redondeados (troncos de árbol, cantos rodados, huevos...), ninguno de ellos cumple la función de la rueda en las máquinas, por tanto se puede considerar que esta es una máquina totalmente artificial.

De la rueda se derivan multitud de máquinas de las que caben destacar: rodillo, tren de rodadura, noria, polea simple, polipasto, rodamiento, engranajes, sistema correa-polea...

5.3.3.2. Máquinas compuestas.

Cuando no es posible resolver un problema técnico en una sola etapa hay que recurrir al empleo de una máquina compuesta. Estas máquinas son, en realidad, una sabia combinación

de diversas máquinas simples, de forma que la salida de cada una de ellas se aplica directamente a la entrada de la siguiente hasta conseguir cubrir todas las etapas necesarias.

La práctica totalidad de las máquinas empleadas en la actualidad son compuestas, y ejemplos de ellas pueden ser: polipasto, motor explosión interna (diésel o gasolina), impresora de ordenador, bicicleta, cerradura, candado, vídeo...

5.3.3.3. Esquema sobre máquinas simples.

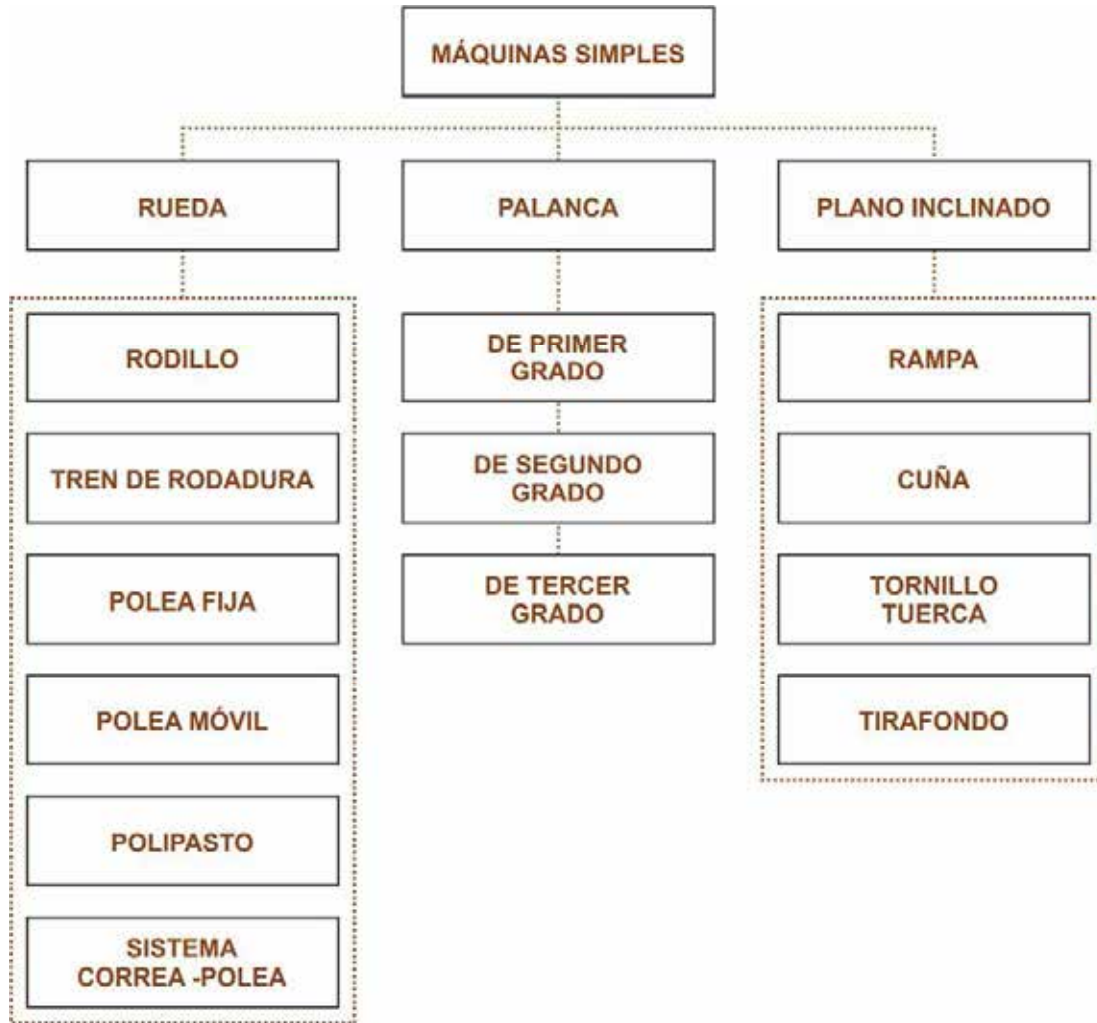


Figura 5.0: Esquema sobre máquinas simples.
(Elaboración propia)

5.3.4. Movimiento en máquinas.

Introducción.

En las máquinas se emplean 2 tipos básicos de movimientos, obteniéndose el resto mediante una combinación de ellos:

Movimiento giratorio, cuando el operador no sigue ninguna trayectoria (no se traslada), sino que gira sobre su eje.

Movimiento lineal, si el operador se traslada siguiendo la trayectoria de una línea recta (la denominación correcta sería *rectilíneo*).

Estos dos movimientos se pueden encontrar, a su vez, de dos formas:

Continuo, si el movimiento se realiza siempre en la misma dirección y sentido.

Alternativo, cuando el operador está dotado de un movimiento de vaivén, es decir, mantiene la dirección pero va alternando el sentido.

Movimiento giratorio.

Si analizamos la mayoría de las máquinas que el ser humano ha construido a lo largo de la historia: molinos de viento (empleados para moler cereales o elevar agua de los pozos), norias movidas por agua (usadas en molinos, batanes, martillos pilones...), motores eléctricos (empleados en electrodomésticos, juguetes, máquinas herramientas...), motores de combustión interna (usados en automóviles, motocicletas, barcos...); podremos ver que todas tienen en común el hecho de que transforman un determinado tipo de energía (eólica, hidráulica, eléctrica, química...) en energía de tipo mecánico que aparece en forma de movimiento giratorio continuo en un eje.

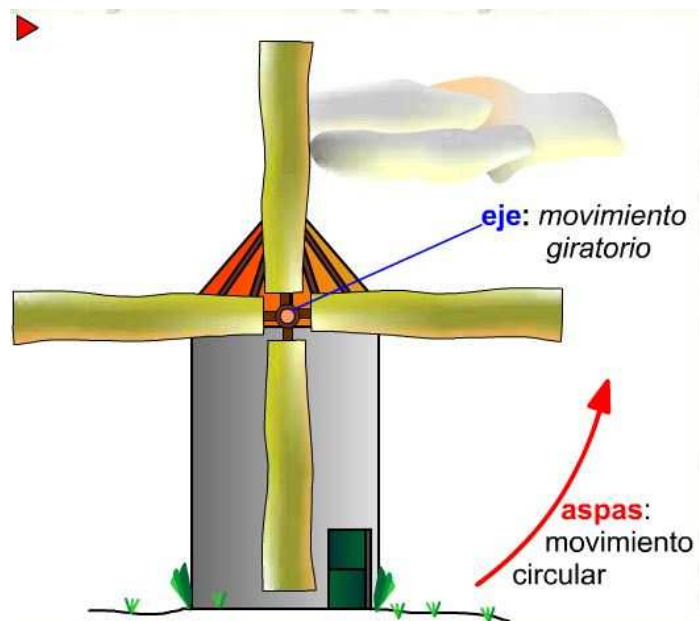


Figura 5.1: Movimiento giratorio o de rotación del eje de un molino y circular de sus aspas.
(Fuente: © CEJAROSU)

Por otra parte, si nos fijamos en los antiguos tornos de arco, los actuales exprimidores de cítricos, el mecanismo del péndulo de un reloj o el eje del balancín de un parque infantil, podemos observar que los ejes sobre los que giran están dotados de un movimiento giratorio de vaivén; el eje gira alternativamente en los dos sentidos, es el denominado movimiento giratorio alternativo.

Movimiento giratorio y movimiento circular.

Cando hablamos de movimiento giratorio nos estamos refiriendo siempre el movimiento del eje, mientras que cuando hablamos de movimiento circular solemos referirnos a cuerpos que giran solidarios con el eje describiendo sus extremos una circunferencia. En los ejemplos anteriores podemos observar que las aspas del molino y el péndulo del reloj son los que

transmiten el movimiento giratorio a los ejes a los que están unidos. Pero los extremos de las aspas del molino describen una circunferencia, mientras que el péndulo del reloj traza un arco de circunferencia. Se dice entonces que las aspas llevan un movimiento circular y el péndulo uno oscilante (o pendular, o circular alternativo). Este movimiento circular (sea continuo o alternativo) aparece siempre que combinemos un eje de giro con una palanca.

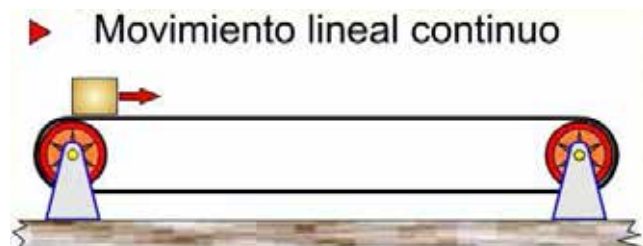
Se puede afirmar que el movimiento giratorio (de rotación, rotativo o rotatorio) es el más corriente de los que pueden encontrarse en las máquinas y casi el único generado en los motores.



Figura 5.2: Movimiento giratorio alternativo y oscilante del péndulo de un reloj
(Fuente: © CEJAROSU)

Movimiento lineal

Analizando el funcionamiento de una cinta transportadora (como las empleadas en aeropuertos o en las cajas de los supermercados) vemos que todo objeto que se coloque sobre ella adquiere un movimiento lineal en un sentido determinado, lo mismo sucede si nos colocamos en un peldaño de una escalera mecánica. Es el denominado movimiento lineal continuo. Este mismo tipo de movimiento lo encontramos también en las lijadoras de banda o las sierras de cinta.



colocamos en un peldaño de una escalera mecánica. Es el denominado movimiento lineal continuo. Este mismo tipo de movimiento lo encontramos también en las lijadoras de banda o las sierras de cinta.

Figura 5.3: Movimiento lineal continuo.
(Fuente: © CEJAROSU)

Si ahora nos paramos a estudiar el movimiento de la aguja de una máquina de coser podemos ver que esta sube y baja siguiendo también un movimiento lineal, pero a diferencia del anterior, este es de vaivén; lo mismo sucede con las perforadoras que se emplean para abrir las calles, las bombas de hinchar balones o el émbolo de las máquinas de vapor. A ese movimiento de vaivén que sigue un trazado rectilíneo se le denomina movimiento lineal alternativo.

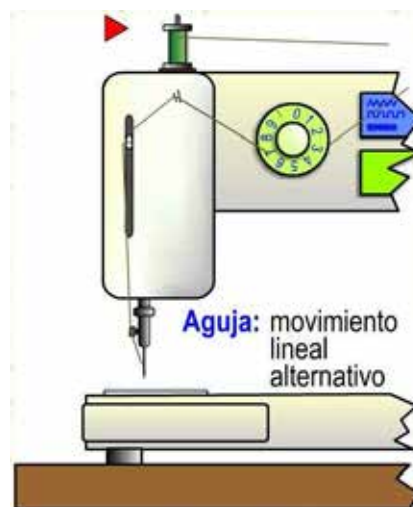


Figura 5.4: Movimiento lineal alternativo.
(Fuente: © CEJAROSU)

5.3.5. Operadores mecánicos transformadores de movimiento.

Consideramos que los operadores básicos necesarios para la transformación del movimiento serían:

El plano inclinado.

La rueda.

La polea. La polea fija y móvil.

Ruedas dentadas, engranajes, piñones.

Cremallera

El tornillo y la tuerca.

El tornillo sinfín.

La leva.

La palanca.

La excéntrica.

La manivela.

La biela.

El cigüeñal

5.3.5.1. El plano inclinado: descripción y utilidad.

Descripción:

El plano inclinado es una superficie plana que forma con otra un ángulo muy agudo (mucho menor de 90°). En la naturaleza aparece en forma de rampa, pero el ser humano lo ha adaptado a sus necesidades haciéndolo móvil, como en el caso del hacha o del cuchillo.

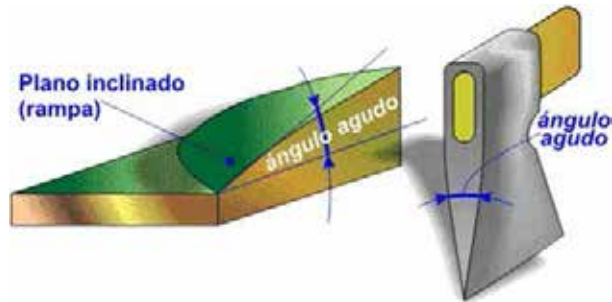


Figura 5.5: Plano inclinado en la naturaleza y en un hacha.
(Fuente: © CEJAROSU)

Utilidad:

El plano inclinado es el punto de partida de un nutrido grupo de operadores y mecanismos cuya utilidad tecnológica es indiscutible. Sus principales aplicaciones son tres:

Se emplea en forma de rampa para reducir el esfuerzo necesario para elevar una masa (carreteras, subir ganado a camiones, acceso a garajes subterráneos, escaleras...).



Figura 5.6: Plano inclinado usado como rampa.
(Fuente: © CEJAROSU)

En forma de hélice para convertir un movimiento giratorio en lineal (tornillo de Arquímedes, tornillo, sinfín, hélice de barco, tobera...); y en forma de cuña para apretar (sujetar puertas para que no se cierren, ensamblar piezas de madera...), cortar (cuchillo, tijera, sierra, serrucho...) y separar o abrir (hacha, arado, formón, abrelatas...).



Figura 5.7: Plano inclinado como husillo (izq.) y como cuña (hacha de la der.)
(Fuente: © CEJAROSU)

5.3.5.2. El plano inclinado en los manuscritos de Leonardo (CM1_0064v).

El plano inclinado aprovecha el peso de un objeto que se desliza o rueda por encima para trasladarlo en dirección opuesta a la perpendicular. Leonardo estudió su teoría y su aplicación en cada campo hasta formular la tesis correcta: el tornillo es en realidad un plano inclinado enrollado en torno a un eje (tal y como se describe más adelante en el folio 86 verso del Códice de Madrid I).

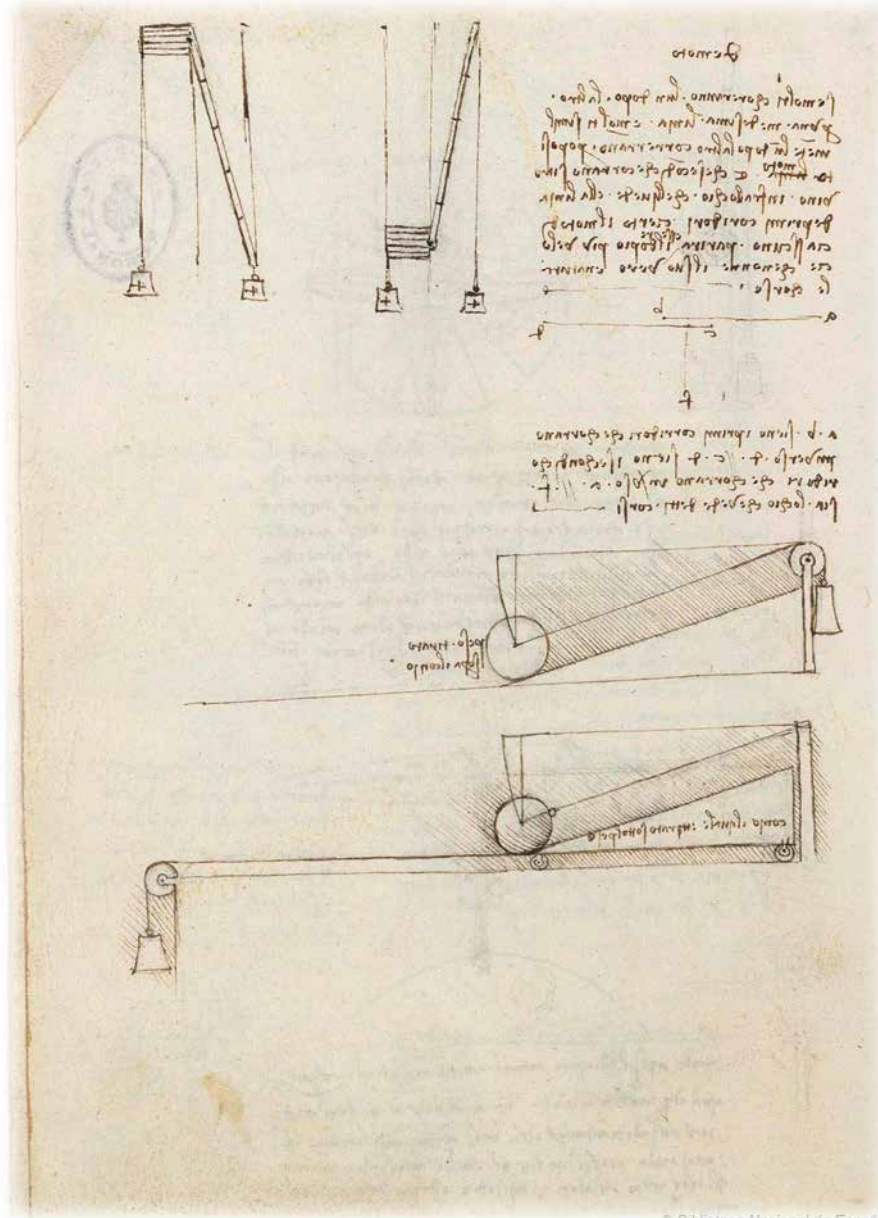


Figura 5.8: Estudio del plano inclinado

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0064v

5.3.5.3. La rueda: descripción y utilidad.

Descripción:

La rueda es un disco con un orificio central por el que penetra un eje que le guía en el movimiento y le sirve de sustento.

La parte operativa de la rueda es la periferia del disco, que se recubre con materiales o terminaciones de diversos tipos con el fin de adaptarla a la utilidad correspondiente.

Algunas de las ruedas más empleadas son:

Rueda dentada, empleada principalmente para la transmisión del movimiento giratorio entre ejes.

Rueda de transporte, empleada para reducir el rozamiento con el suelo. Unas muy empleadas con las de *cámara de aire*.

Polea, muy empleada tanto para la transmisión de movimientos como para la reducción del esfuerzo al elevar o mover pesos.

Turbinas (rueda de palas), empleadas para la obtención de un movimiento giratorio a partir del movimiento de un fluido (agua, aire, aceite...)

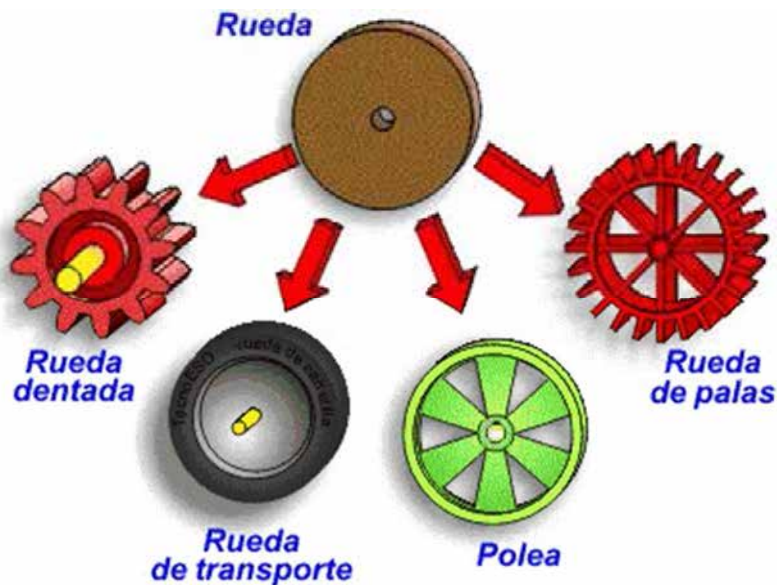


Figura 5.9: Rueda y sus derivados.
(Fuente: © CEJAROSU)

Composición de la rueda:

Desde el punto de vista tecnológico, la rueda es un operador dependiente. Nunca puede usarse sola y siempre ha de ir acompañada de, al menos, un **eje** (que le guía y sirve de sustento) y de un **soporte** o armadura (que es el operador que controla la posición del eje y sirve de sostén a todo el conjunto).

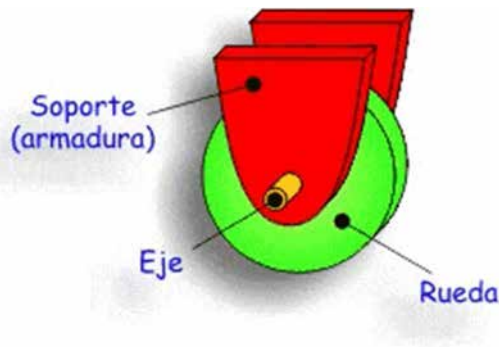


Figura 5.10: Composición de la rueda.
(Fuente: © CEJAROSU)

El **eje** es una barra, normalmente cilíndrica, que guía el movimiento giratorio de la rueda. Dependiendo del diseño adoptado, se pueden presentar dos tipos de ejes:

Ejes que giran solidarios con la rueda (p. ej. las carretillas), en cuyo caso el soporte es el que guía el movimiento. Si el eje se emplea para la transmisión del movimiento giratorio entre la rueda y otro operador (o viceversa), entonces recibe el nombre de **árbol**.

Ejes que están unidos directamente al soporte (caso de las bicicletas, patinetes...), en cuyo caso la rueda gira libremente sobre el eje, que es el que le guía en el movimiento.

El **soporte** es un operador cuya misión es mantener al eje solidario con la máquina. En muchas aplicaciones suele tener forma de horquilla (patinetes, bicicletas, carros...).

Además, para reducir el rozamiento entre el eje y el soporte (o entre la rueda y el eje si este permanece fijo), se suele recurrir al empleo de casquillos o de rodamientos (de bolas, rodillos o agujas).

Un poco de historia

Es importante apuntar que aunque el conocimiento y uso de la rueda como operador aplicado al transporte suele ser un indicador de clasificación cultural, existieron culturas que llegaron a un alto nivel técnico y artístico desconociendo el uso práctico de la rueda (caso de las culturas precolombinas).

Desde el punto de vista técnico se supone que la rueda evolucionó a partir de un rodillo al que se le había colocado un eje a través de un agujero central, y aunque no existen pruebas concluyentes, se supone que rodillos de madera fabricados a partir de troncos de árbol ya fueron empleados por los egipcios hacia el 3500 a.C. para el transporte de cargas pesadas.

No obstante, parece ser que la primera aplicación de la rueda como tal corresponde a los tornos de alfarería (hacia el 3300 a. de C. en el oriente medio), en forma de sencillo disco de madera montado sobre un cono giratorio impulsado a mano.

Hacia el 3200 a. de C. empieza a aplicarse como elemento de transporte (en forma de rueda maciza de piedra que formaba cuerpo con ejes de madera y se sujetaba a la carreta por medio de tiras de cuero) formando parte de carros de tracción animal.

Hacia el 2900 a. de C. se aplicó en Sumeria para la molienda de trigo (molino de ruedas).

Hacia el 1500 a. de C. empezó a emplearse como elemento motor accionado por la fuerza muscular del hombre (rueda de varios metros de diámetro por la que se mueven varios hombres haciéndola girar).

Es posible ha hacia el 1500 a. de C. ya se empleara la polea (en forma de polea simple) en Mesopotamia y Egipto.

Hacia el 260 a. de C. ya se empleaban las ruedas hidráulicas (norias) como elemento que aprovecha el movimiento lineal de la gua de los ríos para producir un movimiento giratorio que sirve como fuerza motriz.

Hacia el 250 a. de C. ya se usaban las ruedas dentadas (engranajes) para la transmisión de movimientos rotativos entre ejes separados (reloj hidráulico de Ctebiso).

Hacia el 900 empiezan las ruedas eólicas (aprovechan la fuerza del viento para producir un movimiento giratorio) para el accionamiento de molinos de piedra en Pekín y Persia.

Utilidad:

Las ruedas se emplean en multitud de aplicaciones, algunas muy usuales son:

Facilitar el desplazamiento de objetos reduciendo el rozamiento entre superficies (tren de rodadura, rodillo, rodamiento); como en carretillas, coches, bicicletas, patinetes, pasillos rodantes...

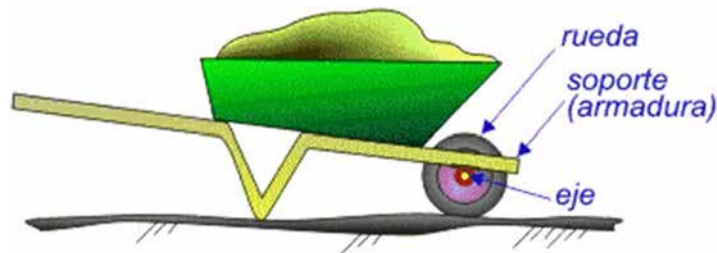


Figura 5.11: Rueda de transporte, en una carretilla.
(Fuente: © CEJAROSU)

Obtener un movimiento rotativo en un eje a partir del movimiento del agua (rueda de palas, noria, turbina o rodete); como en contadores de agua, molinos de agua, norias de regadío, centrales hidroeléctricas, turbinas...

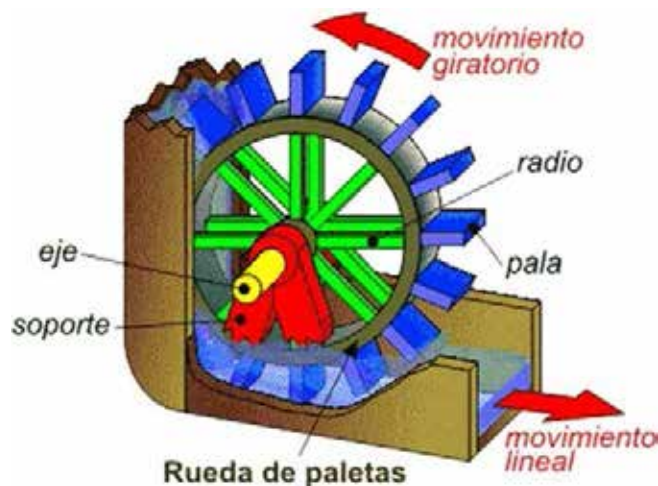


Figura 5.12: Rueda de palas, en una noria.
(Fuente: © CEJAROSU)

Transmitir un movimiento giratorio entre ejes (polea, piñón, ruedas de fricción...); como en lavadoras, neveras, bicicletas, motos, motores de automóvil, taladros, tocadiscos...

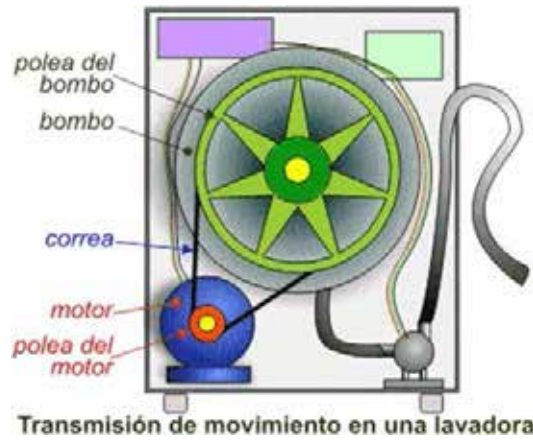


Figura 5.13: Ruedas como operador transmisor de movimiento de giratorio entre ejes.
(Fuente: © CEJAROSU)

Reducir el esfuerzo necesario para elevar una masa (polea de cable, polea móvil, polipasto...); como en pozos de agua, grúas, ascensores...

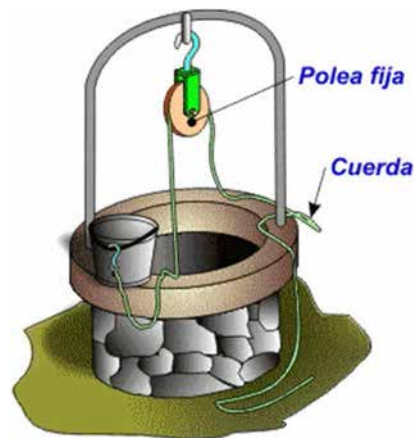


Figura 5.14: Rueda como polea, para elevar pesos.
(Fuente: © CEJAROSU)

Transformar en giratorio otros movimientos o viceversa (excéntrica, leva, torno); como en piedras de afilar, máquinas de coser, ruedas de timón, programadores de lavadora, cabrestantes...

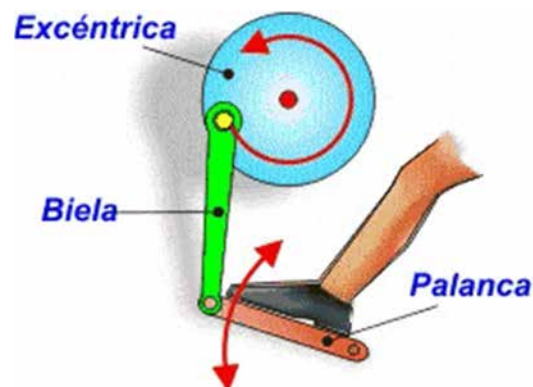


Figura 5.15: Rueda como excéntrica.
(Fuente: © CEJAROSU)

5.3.5.4. La rueda en los manuscritos de Leonardo.

La rueda evidentemente está omnipresente en todos los manuscritos de Leonardo y la vamos a ir desarrollando en sus múltiples formas: rueda de transporte, polea, rueda dentada, excéntrica, etc..., a lo largo de los sucesivos apartados.

A continuación simplemente mostramos algunos diseños que desarrolló Leonardo en sus manuscritos.

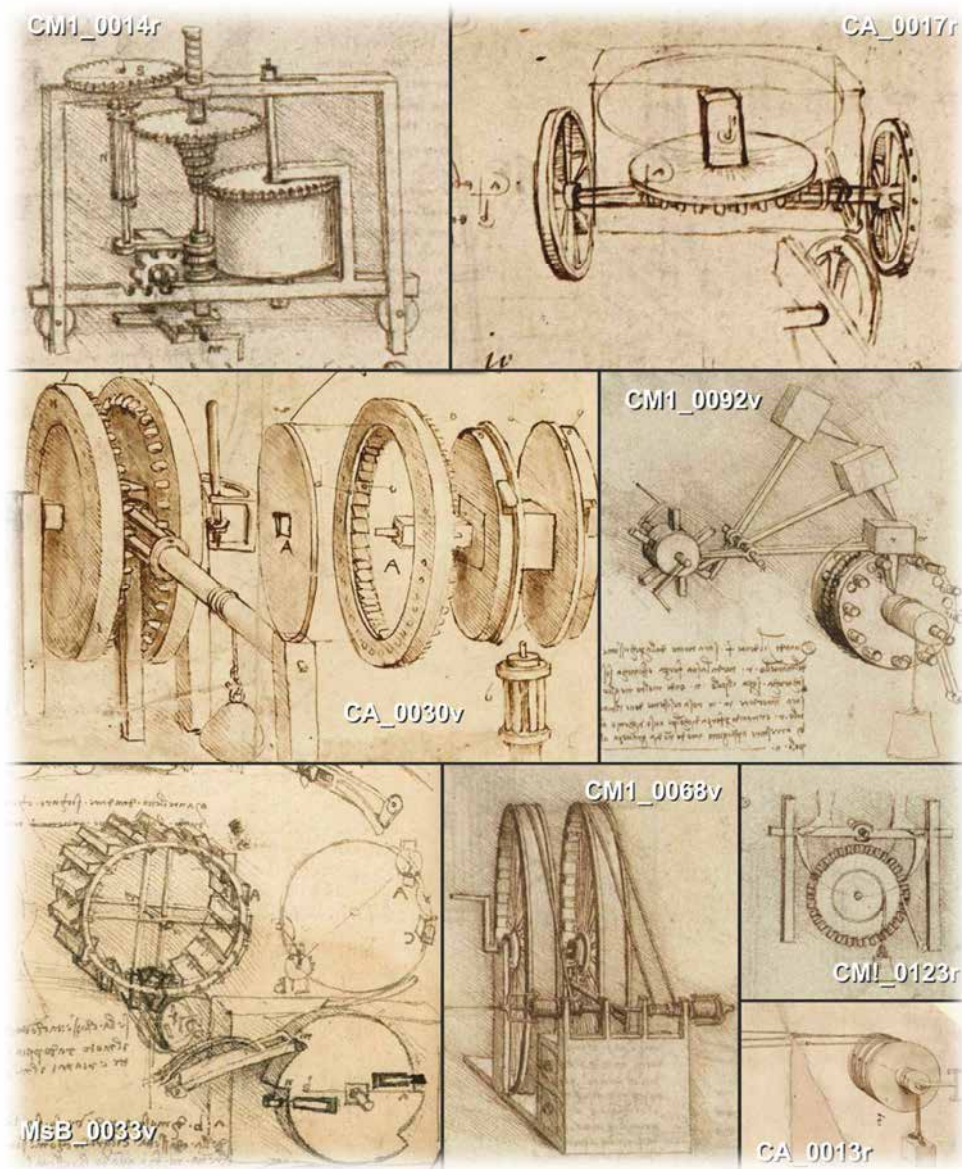


Figura 5.16: Diferentes muestras de tipos de ruedas en los manuscritos de Leonardo..
(Fuente: Elaboración propia)

5.3.5.5. La polea: descripción y utilidad.

Descripción

Las poleas son ruedas que tienen el perímetro exterior diseñado especialmente para facilitar el contacto con cuerdas o correas.

En toda polea se distinguen tres partes: cuerpo, cubo y garganta.

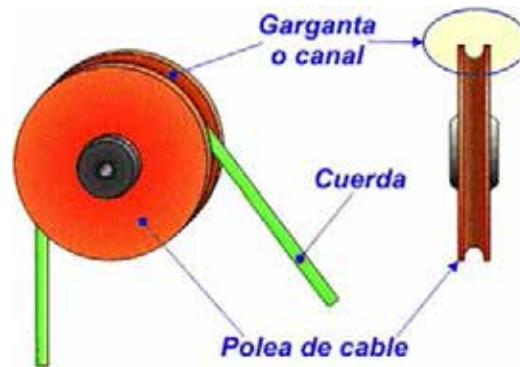


Figura 5.17: Partes de una polea.
(Fuente: © CEJAROSU)

El cuerpo es el elemento que une el cubo con la garganta. En algunos tipos de poleas está formado por radios o aspas para reducir peso y facilitar la ventilación de las máquinas en las que se instalan.

El cubo es la parte central que comprende el agujero, permite aumentar el grosor de la polea para aumentar su estabilidad sobre el eje. Suele incluir un chavetero que facilita la unión de la polea con el eje o árbol (para que ambos giren solidarios).

La garganta (o canal) es la parte que entra en contacto con la cuerda o la correa y está especialmente diseñada para conseguir el mayor agarre posible. La parte más profunda recibe el nombre de llanta. Puede adoptar distintas formas (plana, semicircular, triangular...) pero la más empleada hoy día es la trapezoidal.

Las poleas empleadas para tracción y elevación de cargas tienen el perímetro acanalado en forma de semicírculo (para alojar cuerdas), mientras que las empleadas para la transmisión de movimientos entre ejes suelen tenerlo trapezoidal o plano (en automoción también se emplean correas estriadas y dentadas).

Para cuerdas	Para correas		
Semicircular	Trapezoidal	Plana	Estriada

Figura 5.18: Formas del perímetro acanalado de las poleas.
(Fuente: © CEJAROSU)

Utilidad

Básicamente la polea se utiliza para dos fines: cambiar la dirección de una fuerza mediante cuerdas o transmitir un movimiento giratorio de un eje a otro mediante correas.

En el primer caso tenemos una polea de cable que puede emplearse bajo la forma de polea fija, polea móvil o polipasto. Su utilidad se centra en la elevación de cargas (pastecas, grúas, ascensores...), cierre de cortinas, movimiento de puertas automáticas, etc.

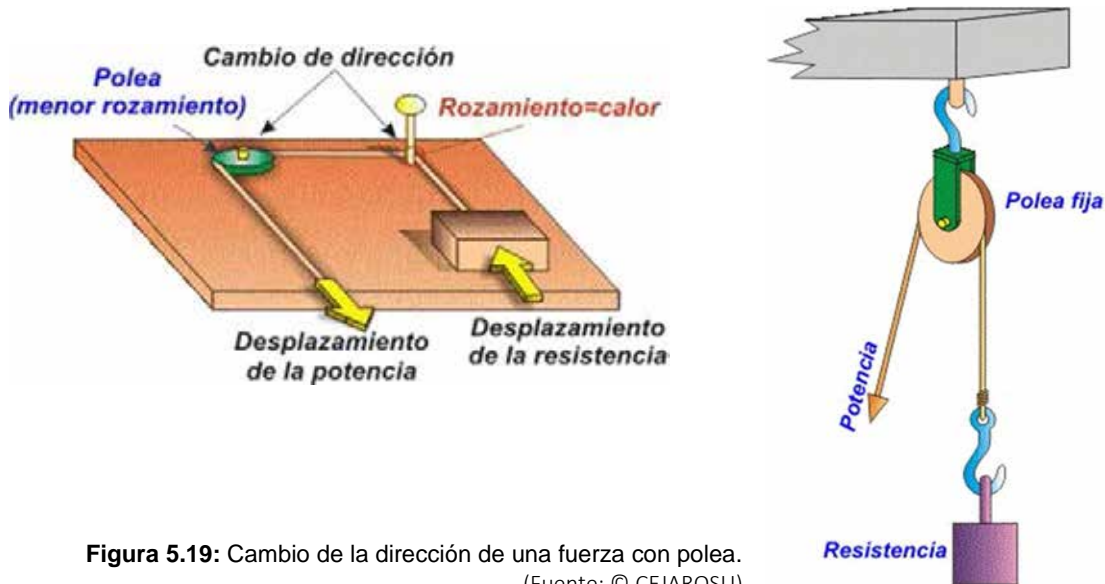


Figura 5.19: Cambio de la dirección de una fuerza con polea.
(Fuente: © CEJAROSU)

En el segundo caso tenemos una polea de correa que es de mucha utilidad para acoplar motores eléctricos a otras máquinas (compresores, taladros, ventiladores, generadores eléctricos, sierras...) pues permite trasladar un movimiento giratorio de un eje a otro. Con este tipo de poleas se construyen mecanismos como el multiplicador de velocidad, la caja de velocidad y el tren de poleas.

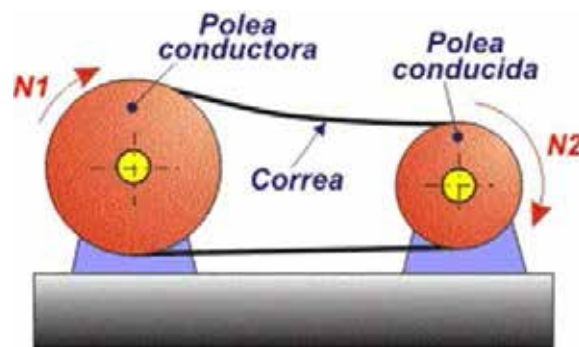


Figura 5.20: Polea de correa para la transmisión de movimiento giratorio entre dos ejes.
(Fuente: © CEJAROSU)

Este tipo de poleas tiene que evitar el deslizamiento de la correa sobre ellas, pues la transmisión de potencia que proporcionan depende directamente de ello. Esto obliga a que la forma de la garganta se adapte necesariamente a la de la sección de la correa empleada.

El aparejo de poleas (combinación de poleas de cable y cuerda) se emplea bajo la forma de polea fija, polea móvil o polipasto:

La **polea fija** de cable se caracteriza porque su eje se mantiene en una posición fija en el espacio evitando su desplazamiento. Debido a que no tiene ganancia mecánica su única utilidad práctica se centra en:

Reducir el rozamiento del cable en los cambios de dirección (aumentando así su vida útil y reduciendo las pérdidas de energía por rozamiento).

Cambiar la dirección de aplicación de una fuerza.

Se encuentra en mecanismos para el accionamiento de puertas automáticas, sistemas de elevación de cristales de automóviles, ascensores, tendales, poleas de elevación de cargas... y combinadas con poleas móviles formando polipastos.

La **polea móvil** de cable es aquella que va unida a la carga y se desplaza con ella. Debido a que es un mecanismo que tiene ganancia mecánica (para vencer una resistencia "**R**" es necesario aplicar solamente una potencia "**P**" ligeramente superior a la mitad de su valor " $P > R/2$ ") se emplea en el movimiento de cargas, aunque no de forma aislada, sino formando parte de polipastos.

El **polipasto** es una combinación de poleas fijas y móviles. Debido a que tiene ganancia mecánica su principal utilidad se centra en la elevación o movimiento de cargas. La podemos encontrar en grúas, ascensores, montacargas, tensores...

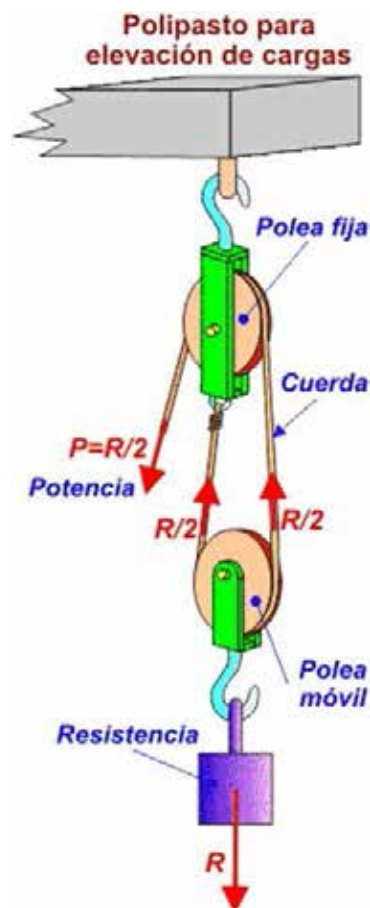


Figura 5.21: Polipasto.
(Fuente: © CEJAROSU)

5.3.5.6. Poleas y aparejos de poleas en los códices de Leonardo.

Leonardo comprende perfectamente las leyes que rigen las poleas. Vio claramente la ventaja de estos dispositivos en la transmisión de movimientos y, especialmente, su utilidad para facilitar el levantamiento de cargas pesadas. Las poleas, simples y compuestas, se utilizan desde la antigüedad. Sirven para elevar pesos realizando un menor esfuerzo con una combinación adecuada. La polea se utiliza para dirigir la fuerza de tiro de una cuerda en el sentido inverso a la fuerza de tracción. Varias poleas compuestas pueden aumentar proporcionalmente la fuerza de tracción.

5.3.5.6.1. Principios mecánicos del funcionamiento de los polipastos (MsG_0082r).

Las anotaciones y los dibujos de este folio definen rigurosamente las variables de los polipastos que siempre son ratios proporcionales entre la carga, la fuerza necesaria para levantarlo, el ángulo y el desplazamiento de la cuerda, y el tiempo requerido para el levantamiento.



Figura 5.22: Principios mecánicos del funcionamiento de los polipastos. Instituto de Francia (París), Ms. G, f. 0082r

5.3.5.6.2. Polipasto compuesto por 33 poleas (CM1_0036v).

El bloque consta de 33 poleas, de los cuales 17 son fijas y 16 móviles. Leonardo afirma que una carga de una libra aplicada al bloque se equilibra con un contrapeso de 33 libras. Leonardo no tuvo en cuenta la enorme fuerza de rozamiento.



Figura 5.23: Polipasto compuesto por 33 poleas.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0036v

5.3.5.6.3. Sistema de frenado de poleas que controla la caída de la plomada de un reloj (CM1_0027r).

Un sistema de poleas regula el descenso del peso. El artefacto fue pensado para reducir el largo espacio del camino de bajada del mecanismo del reloj impulsado por el peso, para garantizar un funcionamiento prolongado.

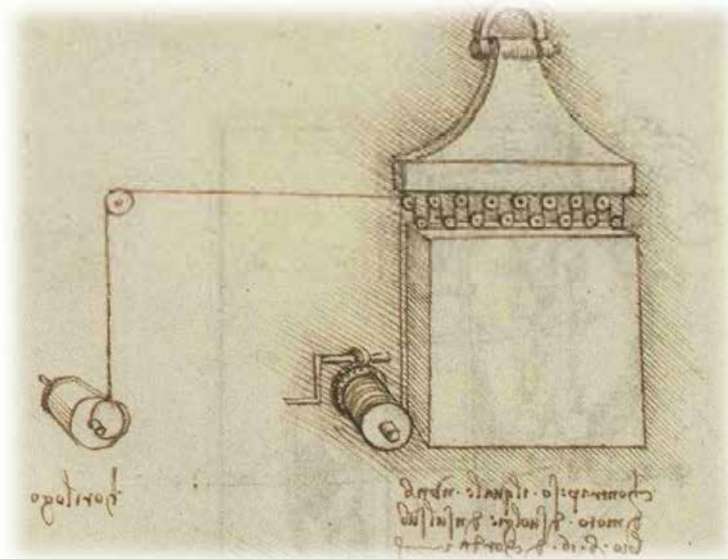


Figura 5.24: Mecanismo de frenado por poleas de la plomada de un reloj.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0027r

5.3.5.6.4. Poleas múltiples para conducir engranajes y transmitir movimientos a grandes distancias (CM1_0087r y CM1_0088r).

El sistema de polea o garrucha puede ser utilizado también para mover engranajes y no sólo para elevar pesos. Además, las posibilidades de combinar movimientos diversos son infinitas y se puede aprovechar el largo de la cuerda para transmitir movimiento muy lejos. Se elimina también la fricción y el ruido que generan los engranajes. Según cómo llegue la cuerda y según la inclinación de la polea, se pueden obtener giros en todas las direcciones. Un requisito fundamental es que la cuerda rodee al menos la mitad de la polea así pueda engranarla por rozamiento.

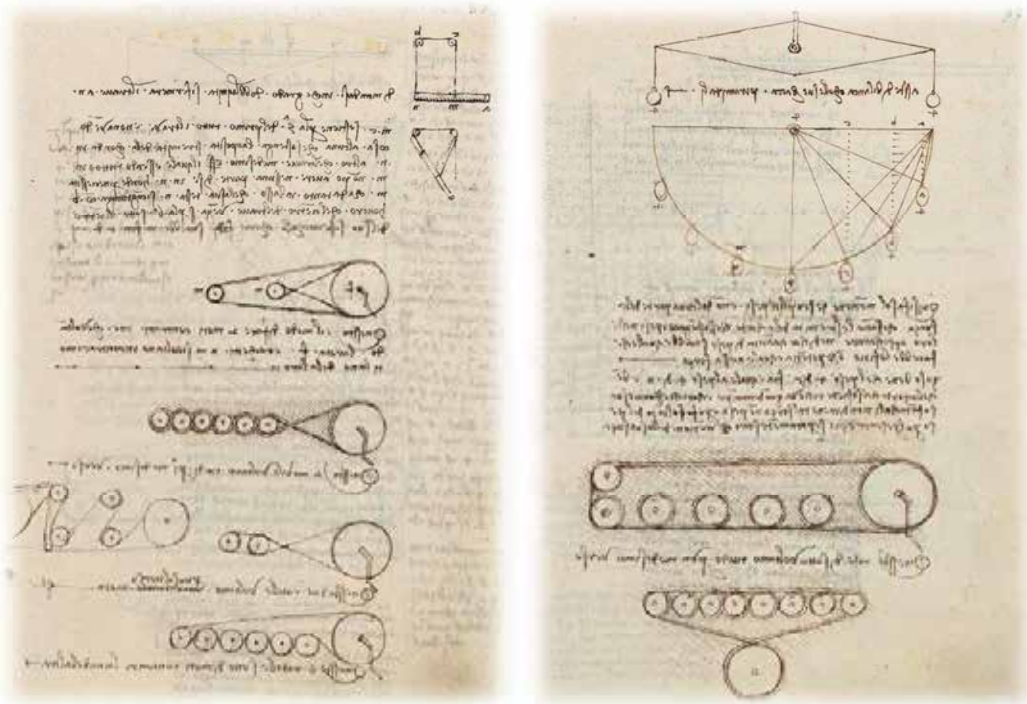


Figura 5.25: Poleas múltiples.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0087r (izq.) y f. 0088r (der.)

5.3.5.6.5. Tensador de poleas (CM1_0044v).

La figura muestra una sencilla máquina empleada para tensar. Consta de una corona exterior de poleas fijas y una corona interior de poleas móviles, unidas a las varillas verticales tensadoras. Al dar vueltas a la manivela las poleas interiores se aproximan a las exteriores, con lo que se abren las varillas tensadoras.

Aunque en este caso Leonardo dibujó una figura circular, era consciente que no había limitaciones en cuanto a la forma. Así en su comentario escribió lo siguiente: “*Este instrumento puede hacerse de cualquier forma, tanto cuadrada, triangular como redonda y de cualquier otra forma que se pueda imaginar*”

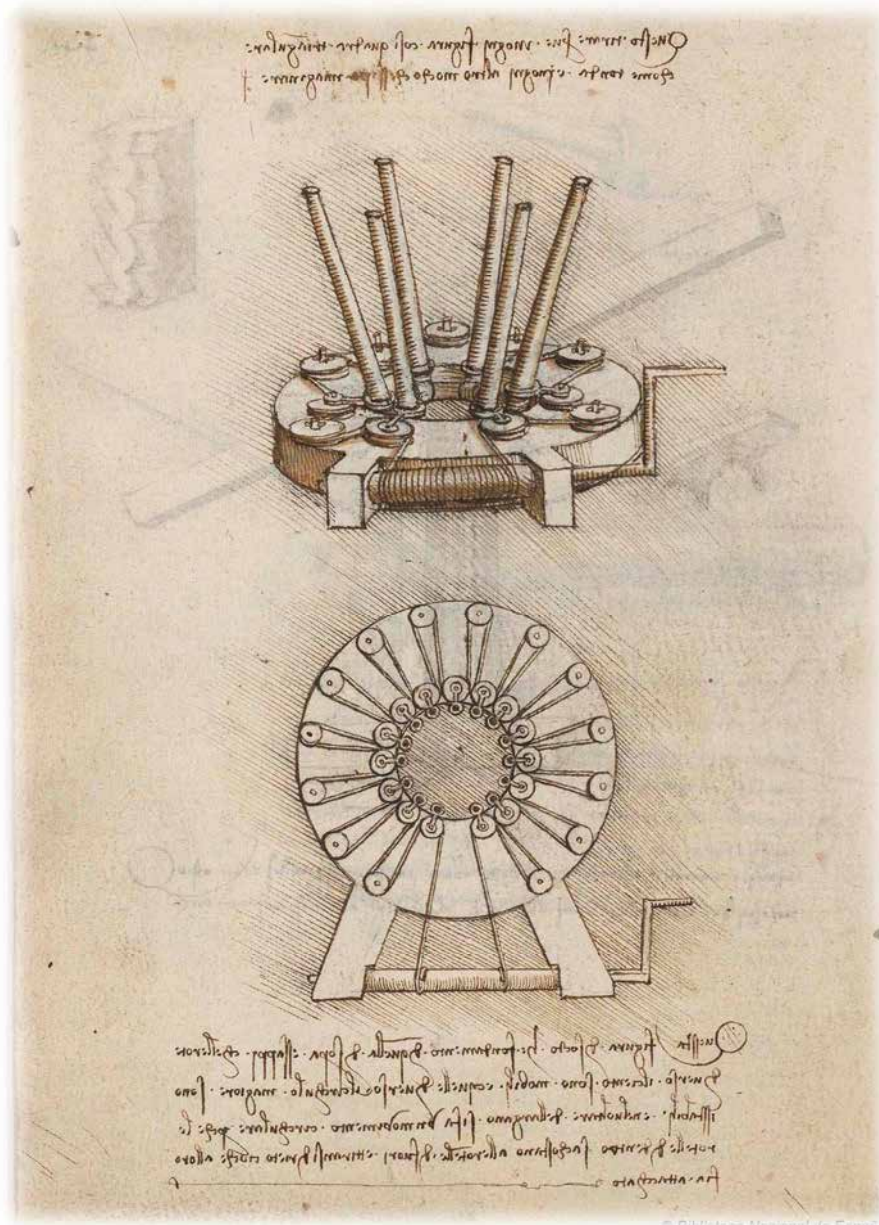


Figura 5.26: Dispositivo de estiramiento por poleas.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0044v

5.3.5.7. Ruedas dentadas, engranajes y piñones: descripción y utilidad.

Descripción:

La rueda dentada (engranaje, piñón) es, básicamente, una rueda con el perímetro totalmente cubierto de dientes. El tipo más común de rueda dentada lleva los dientes rectos (longitudinales) aunque también las hay con los dientes curvos, oblicuos...

Para conseguir un funcionamiento correcto, este operador suele girar solidario con su eje, por lo que ambos se ligan mediante una unión desmontable que emplea otro operador denominado chaveta.

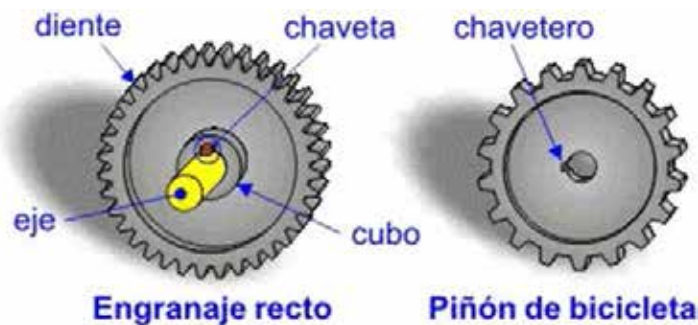


Figura 5.27: Engranaje recto y piñón.
(Fuente: © CEJAROSU)

Casos particulares de las ruedas dentadas son el tornillo sinfín y la cremallera.

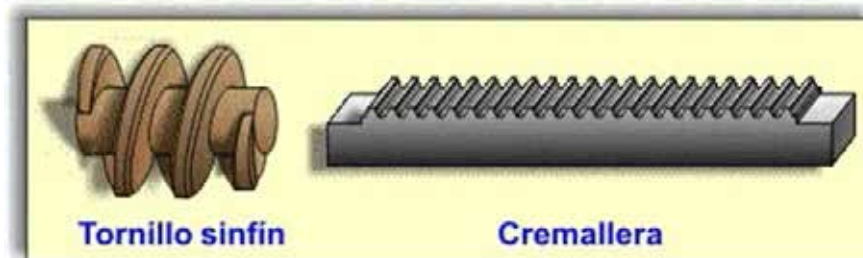


Figura 5.28: Tornillo sinfín y cremallera.
(Fuente: © CEJAROSU)

Utilidad:

Este operador se puede emplear para dos funciones básicas:

Transmitir un movimiento giratorio entre dos ejes con la idea de modificar su sentido de giro, velocidad o dirección, bien acoplándose directamente varias ruedas dentadas entre sí (rueda dentada-linterna, tren de engranajes, sinfín-piñón) o empleando una cadena articulada (mecanismo cadena-piñón).

Sistema de transmisión “rueda-linterna”:

Durante la edad media se empleaban mecanismos de rueda dentada-linterna que eran de uso común en todos los ingenios hidráulicos de la época (molinos, mazos...).

Permite acoplar ejes paralelos o cruzados a 90°

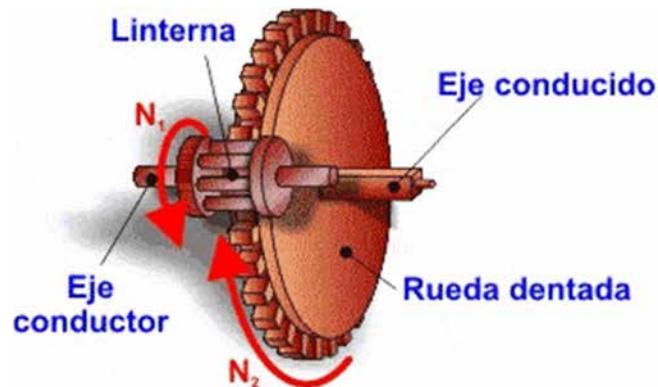


Figura 5.29: Sistema de transmisión rueda-linterna.
(Fuente: © CEJAROSU)

El sistema de engranajes se emplea mucho en automóviles (cambio de marchas), máquinas herramientas (taladros, tornos, fresadoras...), relojería... como reductor de velocidad, pues permite acoplar ejes paralelos o que se crucen con cualquier ángulo.

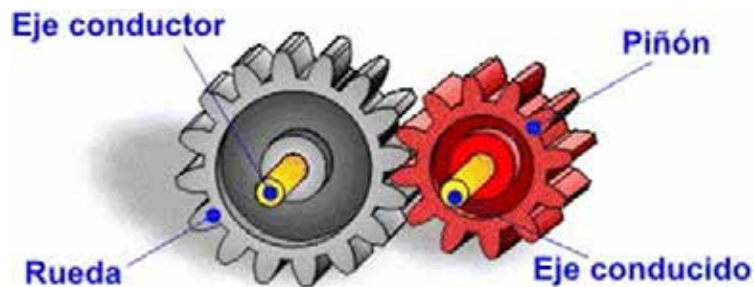


Figura 5.30: Sistema de engranajes rectos.
(Fuente: © CEJAROSU)

El sinfín-piñón se emplea en los reductores de velocidad para motores eléctricos; también se emplea en elementos de gran precisión (tornillos micrométricos).

Este sistema no es reversible (el árbol conductor siempre tiene que estar unido al sinfín) y presenta la ventaja de proporcionar una gran reducción de velocidad en el mínimo espacio. Solamente permite acoplar ejes a 90°.

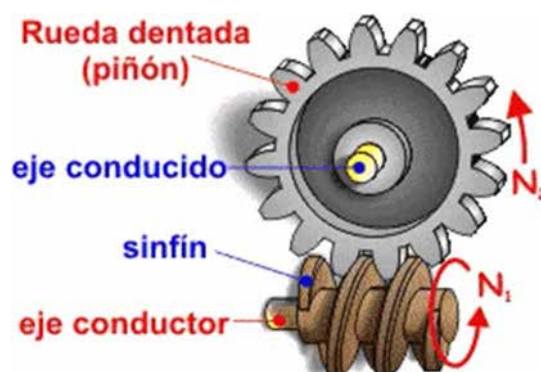


Figura 5.31: Sistema sinfín-piñón.
(Fuente: © CEJAROSU)

El sistema cadena-piñón podemos verlo en bicicletas, motos, puertas de apertura automática (ascensores, supermercados, aeropuertos...), mecanismos internos de motores...; pero solamente permite acoplar ejes paralelos entre sí.

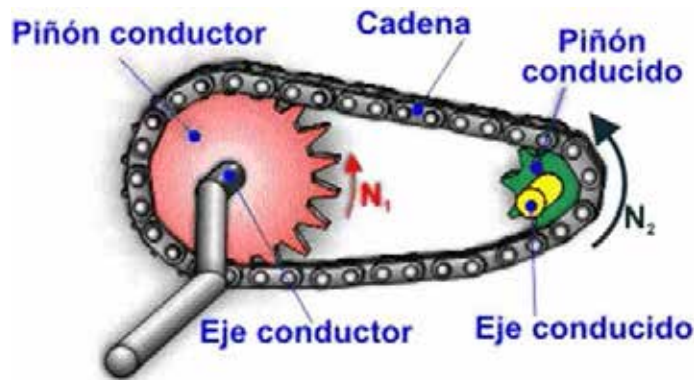


Figura 5.32: Sistema cadena-piñón.
(Fuente: © CEJAROSU)

Transformar movimientos giratorios en alternativos (o viceversa), empleando mecanismos que combinan la rueda dentada con la cremallera (sistema cremallera-piñón) Este montaje se emplea en cerraduras, juegos infantiles, microscopios, taladros sensitivos, sacacorchos, motores fueraborda...

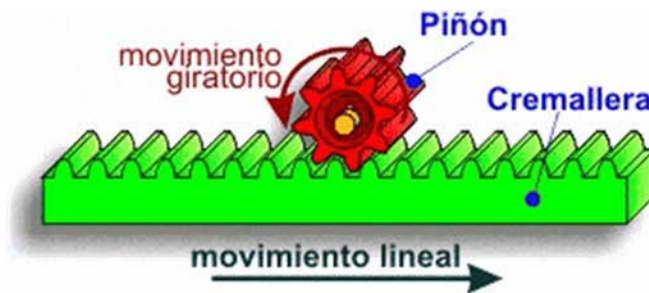


Figura 5.33: Sistema cremallera-piñón.
(Fuente: © CEJAROSU)

5.3.5.8. Ruedas dentadas, engranajes y piñones en los manuscritos de Leonardo.

Las ruedas dentadas, engranajes y piñones, jugaron un papel clave en la aplicación técnica del Renacimiento. Molinos, máquinas herramientas, grúas, y muchos otros dispositivos fueron casi siempre equipados con engranajes de este tipo. Leonardo trató de dar una descripción estrictamente metódica de la naturaleza y el funcionamiento de estos dispositivos. Se centró en los perfiles de los dientes y con precisión clasificó los diferentes tipos de movimiento producidos por diversas combinaciones de ruedas dentadas, engranajes y piñones.

Análisis de los dientes de engranaje:

- La potencia de los dientes.
- Los contactos entre los dientes y las entalladuras.
- Dientes cuadrangulares.
- Dientes asimétricos en forma de sierra.
- Dientes helicoidales: corona y piñón con engrane helicoidal.
- Dientes cilíndricos antifricción

Estudio de los efectos combinados entre dos o más ruedas dentadas:

- Dos ruedas exteriores.
- Tres ruedas exteriores.
- Una rueda dentro de otra.
- Cuatro ruedas (tres de ellas interiores).
- Cinco ruedas (cuatro exteriores).

5.3.5.8.1. Análisis de los dientes de engranaje.

5.3.5.8.1.1. La potencia de los dientes (CM1_0005r).

En la hoja 5r del Códice de Madrid I, Leonardo abordó científicamente el concepto de transmisión del movimiento por medio de engranajes dentados. Estudió la interacción de los dientes entre dos ruedas de distinto tamaño y extrajo algunas reglas geométricas de ello. Este estudio es la base de todos los engranajes presentes en todas las máquinas del pasado y del presente. En otras páginas del códice, Leonardo dibujó también engranajes cónicos, con dientes doblados y de corona.

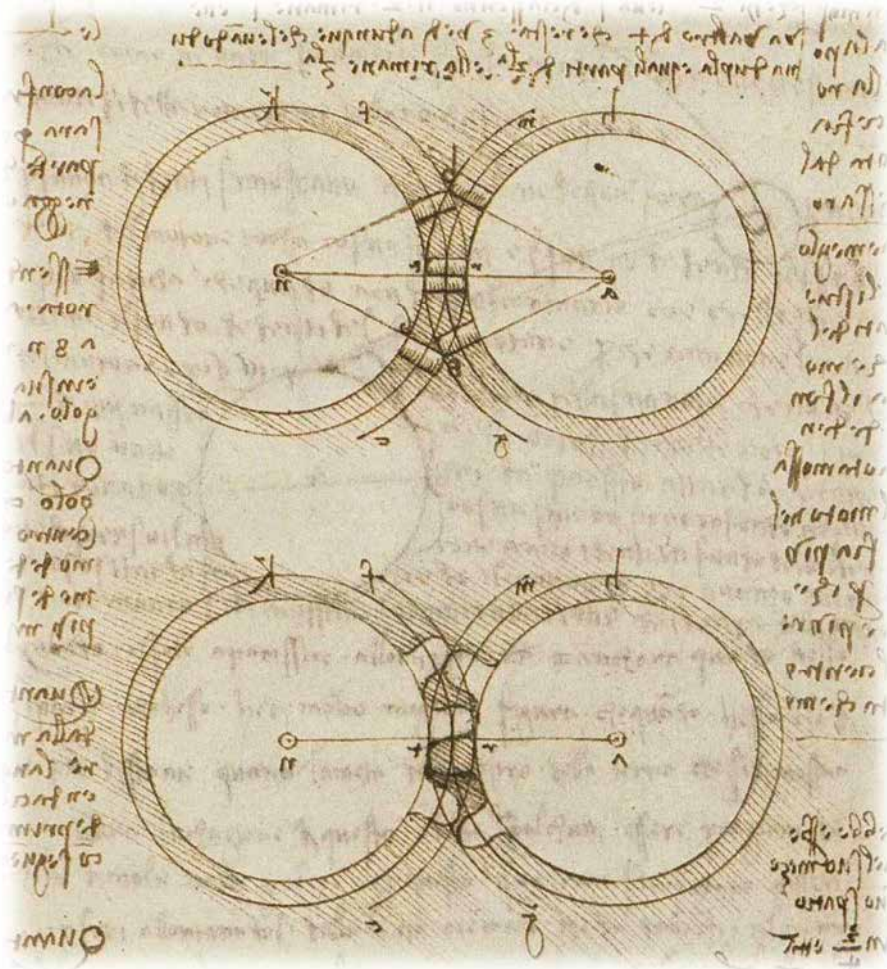


Figura 5.34: Detalle del engrane de ruedas dentadas.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0005r

Leonardo explica que "la potencia del movimiento transmitida con la ayuda de ruedas dentadas varía en función de si los dientes de una rueda engranan con las bases, con el medio o con las puntas de los dientes de la rueda opuesta. La potencia máxima se obtiene de la combinación de punta a punta".

5.3.5.8.1.2. Los contactos entre los dientes y las entalladuras (CM1_0116r).

En el folio 116 recto del Códice de Madrid I, Leonardo escribió lo siguiente: “*la parte superior del diente no debe tocar el fondo del espacio que deja el diente, hasta que el diente llegue al punto central de la línea*”.

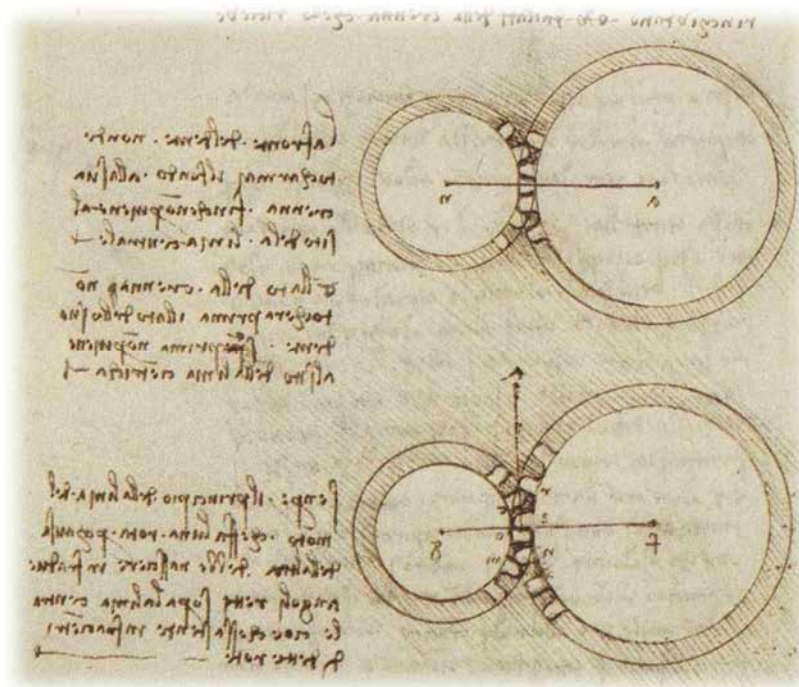


Figura 5.35: Contacto entre dientes de engranaje.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0116r

5.3.5.8.1.3. Dientes cuadrangulares (CM1_0118v).

Leonardo afirma que se trata de uno de los perfiles de diente más comúnmente empleados y describe sus características: “*La distancia desde el centro de la parte inferior de un espacio del diente hasta el otro será igual a la longitud de un diente*”.

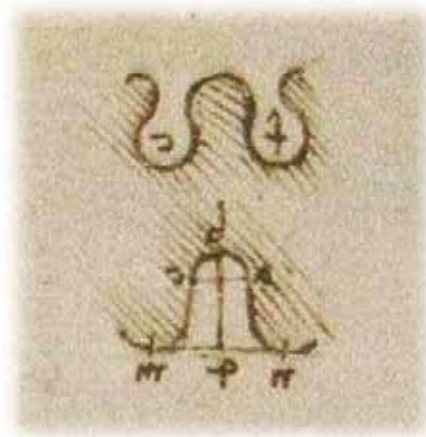


Figura 5.36: Distancia entre dientes y longitud del diente.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0118v

5.3.5.8.1.4. Dientes asimétricos en forma de sierra (CM1_0005r).

Leonardo destaca su resistencia: "Estos son un tipo de dientes muy duradero, más que cualquier otro."

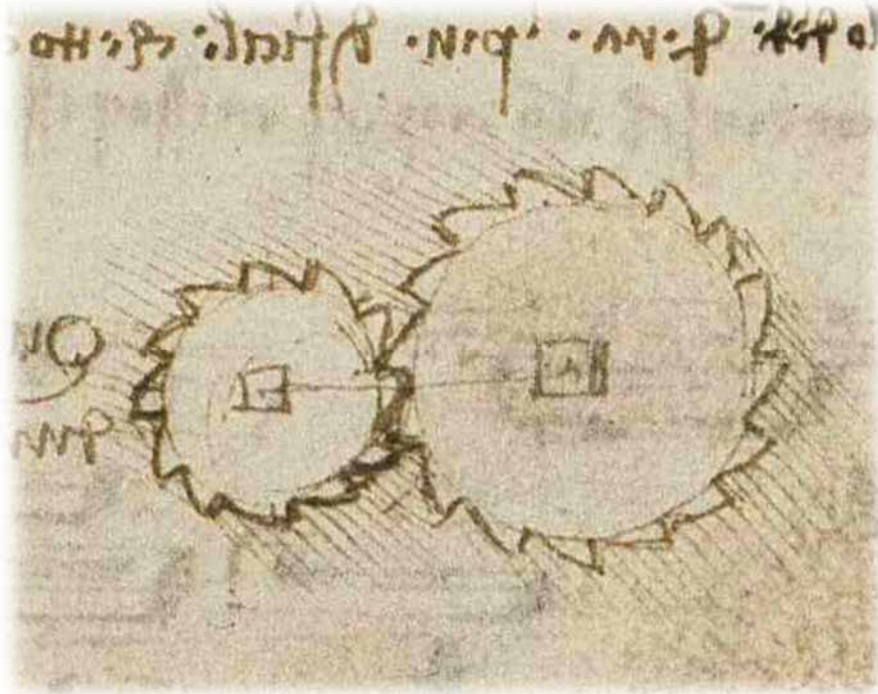


Figura 5.37: Ruedas con dientes de sierra.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0005r.

5.3.5.8.1.5. Dientes helicoidales: corona y piñón con engrane helicoidal (CA_1103r).

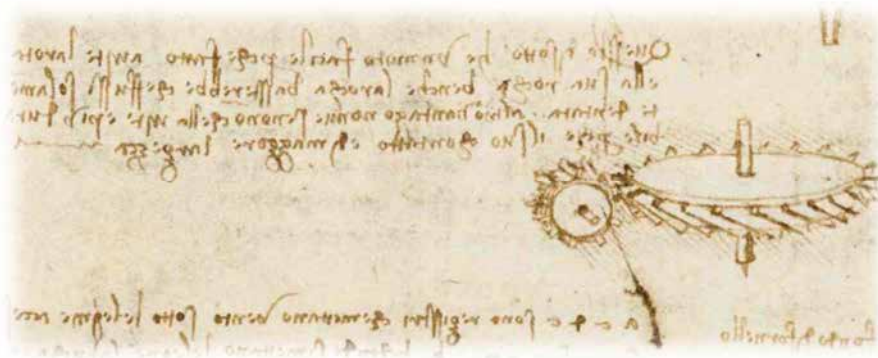


Figura 5.38: Detalle de engrane helicoidal.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 1103r

5.3.5.8.1.6. Dientes cilíndricos antifricción (CA_0091r).

Los dientes de la rueda que accionan las dos muelas se componen de un cilindro giratorio libremente sobre un pasador unido a la rueda. Este dispositivo disminuye los efectos de la fricción entre los engranajes. Leonardo copió el diseño de Brunelleschi, que lo utilizó en el polipasto de tres velocidades para la construcción de la cúpula de la catedral de Florencia. En su dibujo del mecanismo, Leonardo hizo un análisis estructural detallado de estos dientes tan innovadores.

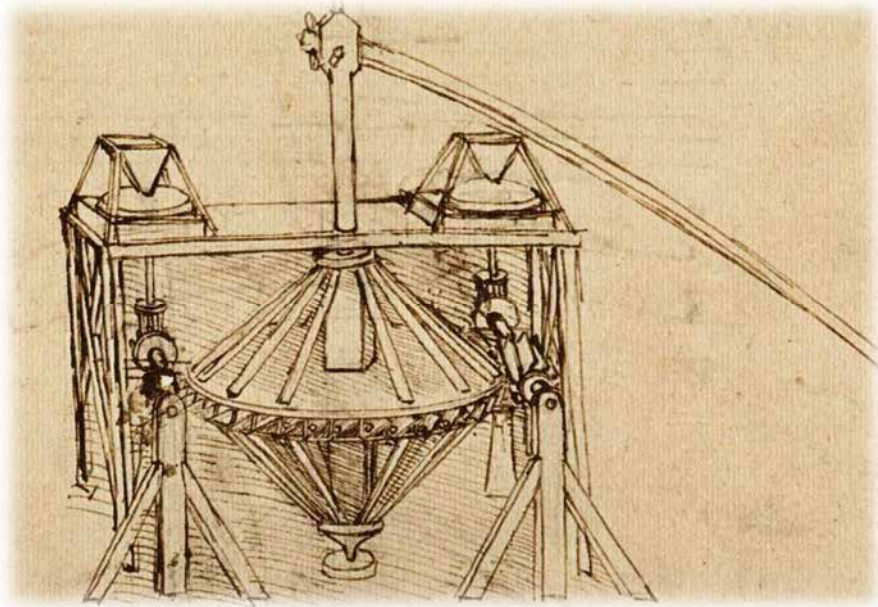


Figura 5.39: Dientes cilíndricos antifricción.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0091r

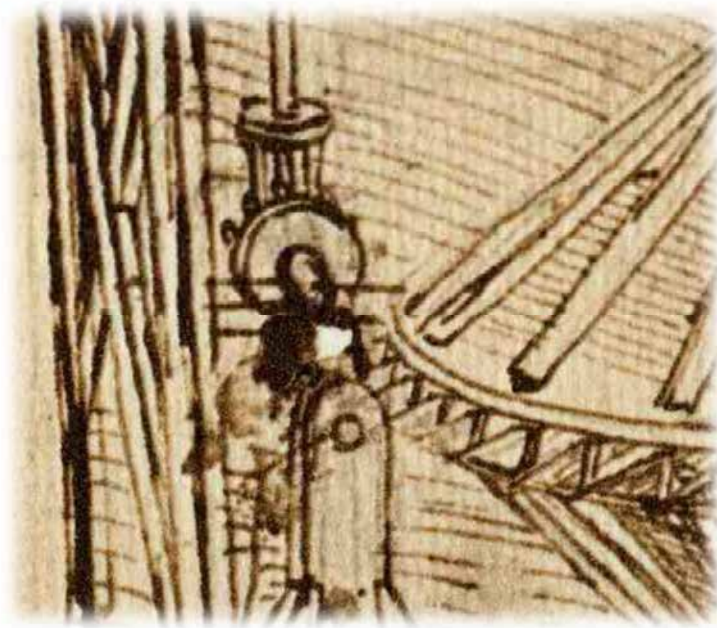


Figura 5.40: Dientes cilíndricos antifricción. Detalle ampliado.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0091r

5.3.5.8.2. Estudio de los efectos combinados entre dos o más ruedas dentadas.

5.3.5.8.2.1. Dos ruedas exteriores (CM1_0015v).

"Si gira una de estas ruedas, la otra, que engrana con ella, dará vueltas en la dirección opuesta."

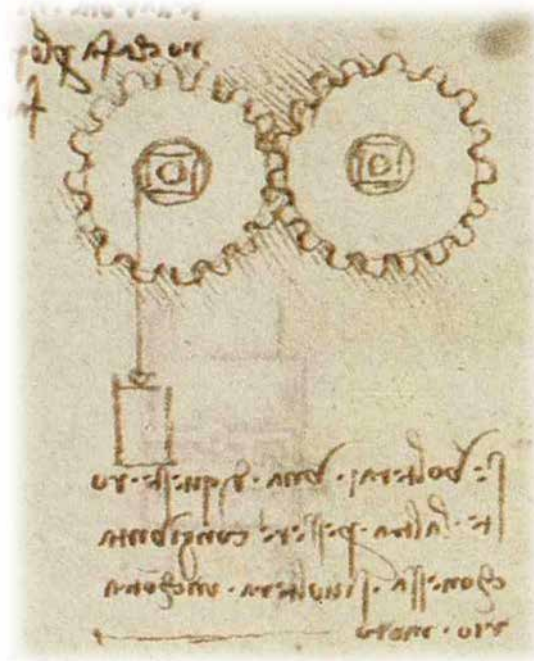


Figura 5.41: Dos ruedas que engranan exteriormente.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0015v (detalle)

5.3.5.8.2.2. Tres ruedas exteriores (CM1_0015v).

Leonardo explica que, para tener una rueda que gire en la misma dirección que la rueda motriz, la tercera rueda debe ser colocada entre los dos. Es el ya clásico diseño de la rueda loca.

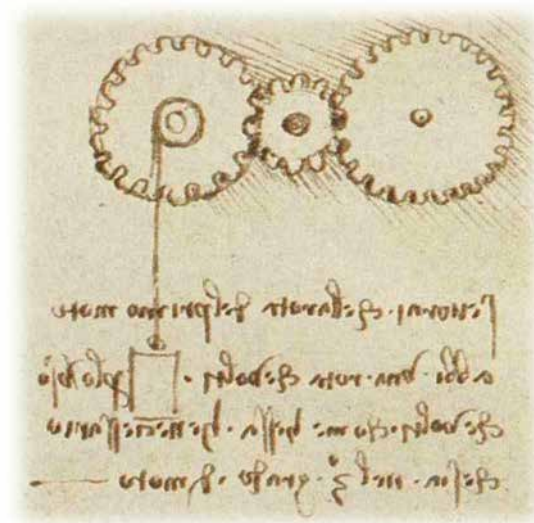


Figura 5.42: Tres ruedas que engranan exteriormente.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0015v (detalle)

5.3.5.8.2.3. Una rueda dentro de otra (CM1_0015v).

"Si una de las ruedas gira en el interior de la otra rueda exterior, entonces ambas ruedas darán vueltas en la misma dirección independientemente de la rueda que causa el movimiento".

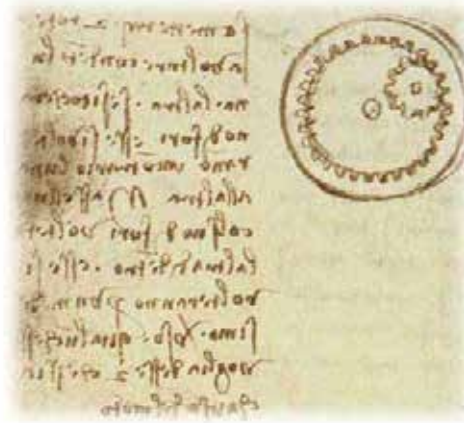


Figura 5.43: Rueda engranando interiormente.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0015v (detalle)

5.3.5.8.2.4. Cuatro ruedas (tres de ellas interiores) (CM1_0015v).

Leonardo observa que la rueda externa junto con dos de las ruedas internas giran en la misma dirección, mientras que la rueda central dará vueltas en sentido contrario.

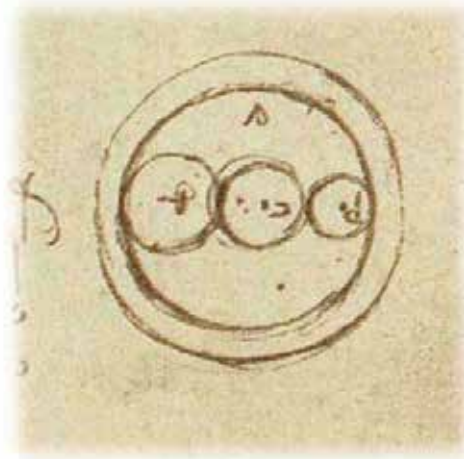


Figura 5.44: Engrane de 4 ruedas, tres de ellas interiormente.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0015v (detalle)

5.3.5.8.2.5. Cinco ruedas (cuatro exteriores) (CM1_0015v).

“Cada rueda colocada en medio de la gran rueda central, girará en una dirección opuesta a las ruedas movidas por la otra mitad”

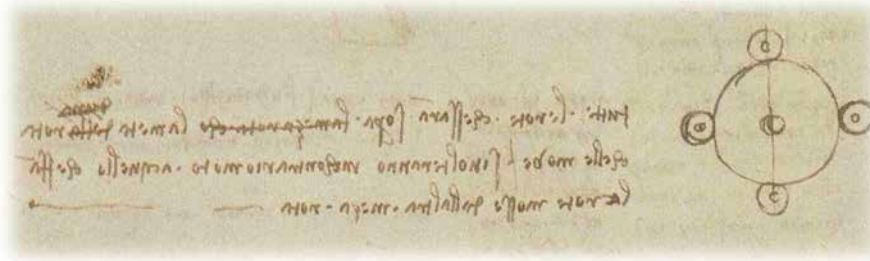


Figura 5.45: Engrane de 5 ruedas, 4 de ellas exteriormente.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0026v (detalle)

5.3.5.9. La cremallera: descripción y utilidad.

Descripción:

En mecánica, una **cremallera** es un prisma rectangular con una de sus caras laterales tallada con dientes. Estos pueden ser rectos o curvados y estar dispuestos en posición transversal u oblicua.



Figura 5.46: Cremallera.
(Fuente: © CEJAROSU)

Desde el punto de vista tecnológico podemos considerarla como un caso particular de la rueda dentada, pues puede suponerse que es un engranaje de radio infinito.

Utilidad:

Se emplea, junto con un engranaje (piñón), para convertir un movimiento giratorio en longitudinal o viceversa. Tiene gran aplicación en apertura y cierre de puertas automáticas de corredera, desplazamiento de órganos de algunas máquinas herramientas (taladros, tornos, fresadoras...), cerraduras, microscopios, gatos de coche...

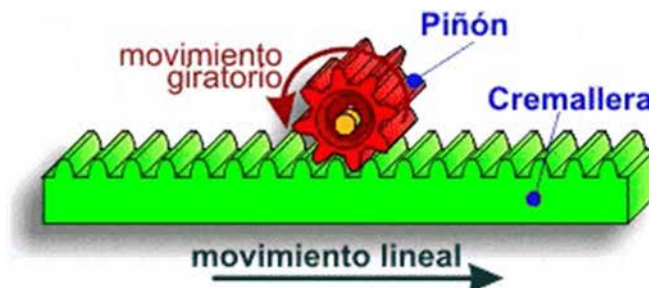


Figura 5.47: Mecanismo cremallera-piñón.
(Fuente: © CEJAROSU)

5.3.5.10. La cremallera en los manuscritos de Leonardo.

Un ejemplo típico de utilización de una cremallera nos lo encontramos en el diseño del siguiente artilugio que nos dejó Leonardo en folio 359 verso del Códice Atlántico.

5.3.5.10.1. Gato mecánico (CA_0998r).

La figura adjunta muestra el esquema del gato mecánico que ideó Leonardo. Todo aquél que haya tenido que cambiar alguna vez un neumático encontrará este diseño completamente familiar. Al girar la manivela, el piñón provoca el movimiento de la rueda dentada que, a su vez, asciende por la cremallera. De esta manera, si se apoya el objeto a elevar sobre la caja que contiene al piñón y a la rueda, éste podrá elevarse (IRIONDO, 1997)

Resumiendo el funcionamiento, la clave de esta máquina simple consiste en mantener fija o quieta la cremallera. Leonardo no explicó claramente este objetivo, pero es fácilmente comprensible a la vista de sus dibujos, en los cuales queda claramente sugerido en el diseño de la caja que rodea y contiene al mecanismo piñón-rueda; por lo tanto, es de suponer dicho objetivo. Sea como fuere, no completó totalmente su diseño como máquina elevadora. O, dicho de otra manera, superó dicho diseño con el correspondiente a las máquinas de elevación mediante husillo que se comentan más adelante, en las que prefirió la utilización de tornillos sinfín, seguramente por ser un mecanismo mucho más seguro –evitando el riesgo de caída de los pesos- y ser adecuados para obtener buenas relaciones de reducción.

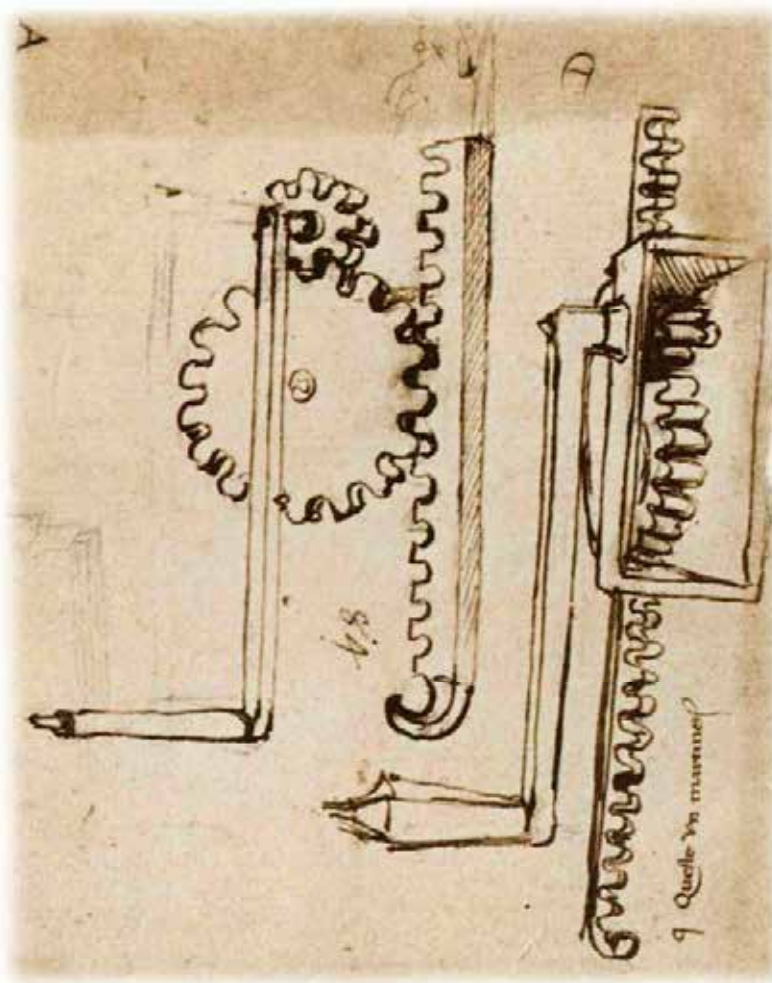


Figura 5.48: Gato mecánico.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0998r

5.3.5.11. El tornillo: descripción y utilidad.

Descripción:

El tornillo es un operador que deriva directamente del plano inclinado y siempre trabaja asociado a un orificio roscado.



Figura 5.49: Tornillo, rosca y plano inclinado
(Fuente: © CEJAROSU)

Básicamente puede definirse como un plano inclinado enrollado sobre un cilindro, o lo que es más realista, un surco helicoidal tallado en la superficie de un cilindro (si está tallado sobre un cilindro afilado o un cono tendremos un tirafondo).

Partes de un tornillo:

En él se distinguen tres partes básicas: cabeza, cuello y rosca:



Figura 5.50: Partes de un tornillo
(Fuente: © CEJAROSU)

La cabeza permite sujetar el tornillo o imprimirle un movimiento giratorio con la ayuda de útiles adecuados; el cuello es la parte del cilindro que ha quedado sin roscar (en algunos tornillos la parte del cuello que está más cercana a la cabeza puede tomar otras formas, siendo las más comunes la cuadrada y la nervada) y la rosca es la parte que tiene tallado el surco.

Además cada elemento de la rosca tiene su propio nombre; se denomina filete o hilo a la parte saliente del surco, fondo o raíz a la parte baja y cresta a la más saliente.

Rosca derecha o izquierda:

Según se talle el surco (o, figuradamente, se enrolle el plano) en un sentido u otro tendremos las denominadas rosca derecha (con el filete enrollado en el sentido de las agujas del reloj) o rosca izquierda (enrollada en sentido contrario).

La más empleada es la rosca derecha, que hace que el tornillo avance cuando lo hacemos girar sobre una tuerca o un orificio roscado en el sentido de las agujas del reloj (el tornillo empleado en los grifos hace que estos cierren al girar en el sentido de las agujas del reloj, lo mismo sucede con los tapones de las botellas de bebida gaseosa o con los tarros de mermelada).

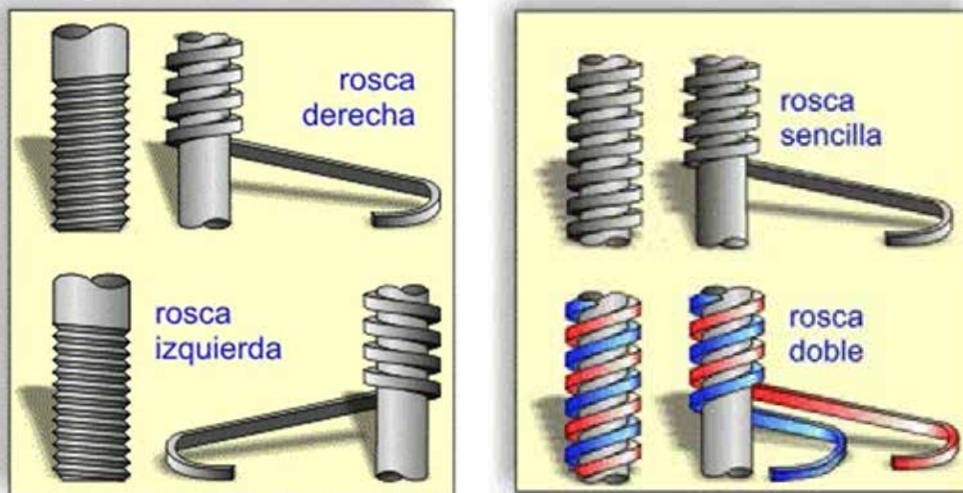


Figura 5.51: Rosca a derecha o izquierda (fig. de izq.) y roscas sencilla y doble (fig. der.)
(Fuente: © CEJAROSU)

Rosca sencilla o múltiple:

Se pueden tallar simultáneamente uno, dos o más surcos sobre el mismo cilindro, dando lugar a tornillos de rosca sencilla, doble, triple... según el número de surcos tallados sea uno, dos, tres...

La más empleada es la rosca sencilla, reservando las roscas múltiples para mecanismos que ofrezcan poca resistencia al movimiento y en los que se desee obtener un avance rápido con un número de vueltas mínimo (mecanismos de apertura y cierre de ventanas o trampillas).

Identificación:

Todo tornillo se identifica mediante 5 características básicas: cabeza, diámetro, longitud, perfil de rosca y paso de rosca.

La cabeza permite sujetar el tornillo o imprimirle el movimiento giratorio con la ayuda de útiles adecuados (Los más usuales son llaves fijas o inglesas, destornilladores o llaves Allen). Las más usuales son la forma hexagonal o cuadrada, pero también existen otras (semiesférica, gota de sebo, cónica o avellanada, cilíndrica...).

El diámetro es el grosor del tornillo medido en la zona de la rosca. Se suele dar en milímetros, aunque todavía hay algunos tipos de tornillos cuyo diámetro se da en pulgadas.

La longitud del tornillo es lo que mide la rosca y el cuello juntos.

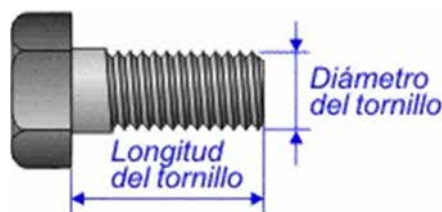


Figura 5.52: Diámetro y longitud del tornillo.
(Fuente: © CEJAROSU)

El perfil de rosca hace referencia al perfil del *filete* con el que se ha tallado el tornillo. El paso de rosca es la distancia que existe entre dos *crestas* consecutivas. Si el tornillo es de rosca sencilla, se corresponde con lo que avanza sobre la tuerca por cada vuelta completa. Si es de rosca doble el avance será igual al doble del paso.

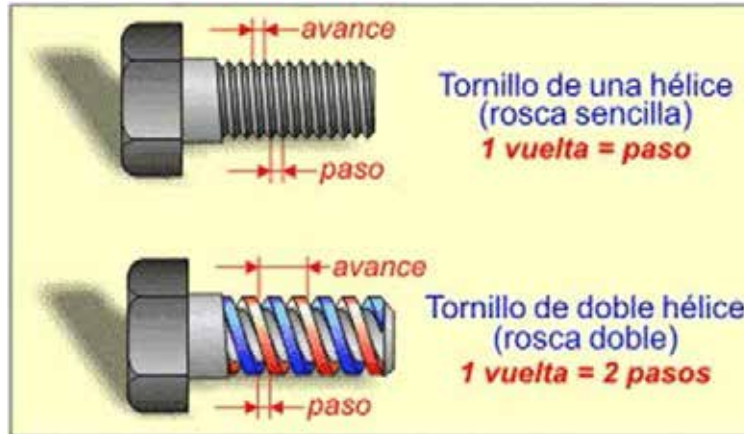


Figura 5.53: Paso y avance de un tornillo

(Fuente: © CEJAROSU)

Utilidad:

El tornillo es en realidad un mecanismo de desplazamiento (el sistema tornillo-tuerca transforma un movimiento giratorio en uno longitudinal), pero su utilidad básica es la de unión desmontable de objetos, dando lugar a dos formas prácticas de uso:

Combinado con una tuerca permite comprimir entre esta y la cabeza del tornillo las piezas que queremos unir. En este caso el tornillo suele tener rosca métrica y es usual colocar arandelas con una doble función: proteger las piezas y evitar que la unión se afloje debido a vibraciones. Lo podemos encontrar en la sujeción de farolas o motores eléctricos, abrazaderas, estanterías metálicas desmontables...

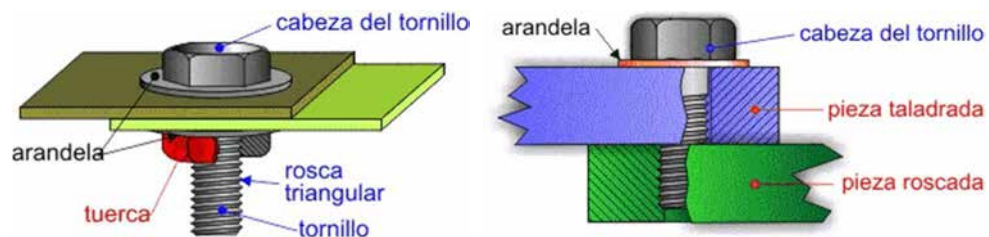


Figura 5.54: Utilidad del tornillo como elemento de unión.

(Fuente: © CEJAROSU)

Empleando como tuerca las propias piezas a sujetar. En este caso es usual que el agujero de la pieza que toca la cabeza del tornillo se taladre con un diámetro ligeramente superior al del tornillo, mientras que la otra pieza (la que hace de tuerca) esté roscada. Se emplea para sujetar chapas (lavadoras, neveras, automóviles...).

El tornillo empleado como Husillo:

Descripción:

El husillo es un tornillo sin cabeza, muy largo en relación a su diámetro.

Puesto que es un operador diseñado para la transmisión de movimiento emplea un perfil de rosca cuadrado o trapezoidal para reducir al máximo el rozamiento.

Utilidad:

En combinación con una tuerca o un *orificio roscado* en otro operador, se emplea para convertir un movimiento giratorio en uno longitudinal, dando lugar al denominado sistema tornillo-tuerca. Lo podemos encontrar en tornos, fresadoras, presillas, prensas, pegamento en barra...

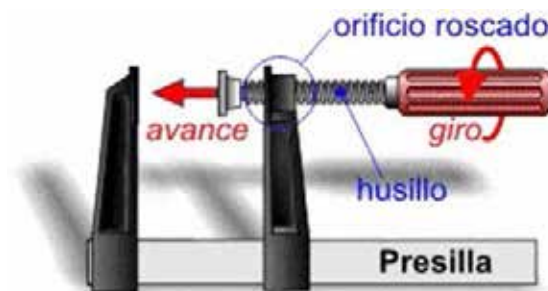


Figura 5.55: Utilidad del husillo, convierte el movimiento giratorio en lineal.
(Fuente: © CEJAROSU)

5.3.5.12. El tornillo en los manuscritos de Leonardo.

Muchas páginas de los manuscritos de Leonardo y muy especialmente el Códice de Madrid I, contienen un análisis detallado sobre los tornillos. Leonardo estaba fascinado con este dispositivo, e hizo un amplio uso del mismo. Él trató de clasificar los diferentes tipos de tornillos, para determinar sus actuaciones con precisión mediante métodos geométricos, y para ilustrar sus posibles aplicaciones en máquinas y operaciones mecánicas. También diseñó varias máquinas para roscar tornillos.

Equivalencia entre un tornillo y un plano inclinado.

Potencia del tornillo.

Medición estática de la potencia del tornillo.

Máquina de enroscado automático.

Tornillo de rosca invertida.

Sistema formado por una secuencia de tornillos de rosca invertida.

Tornillo como diferencial.

5.3.5.12.1. Equivalencia entre un tornillo y un plano inclinado (CM1_0086v).

Leonardo analizó matemática y geoméricamente el tornillo y lo describió como un plano inclinado enrollado en torno a un eje. En estos términos, la “tuerca” se desliza y sube por el plano del tornillo; cuando la tuerca es bloqueada, el “plano” es el que se mueve. Un trozo de tornillo puede usarse para engranar una rueda dentada y en este caso toma el nombre de tornillo sinfín.

En palabras de Leonardo: “*Es exactamente lo mismo, mover un peso a lo largo de un tornillo, de m a n ; que moverlo a lo largo de una línea p m (plano inclinado)*”

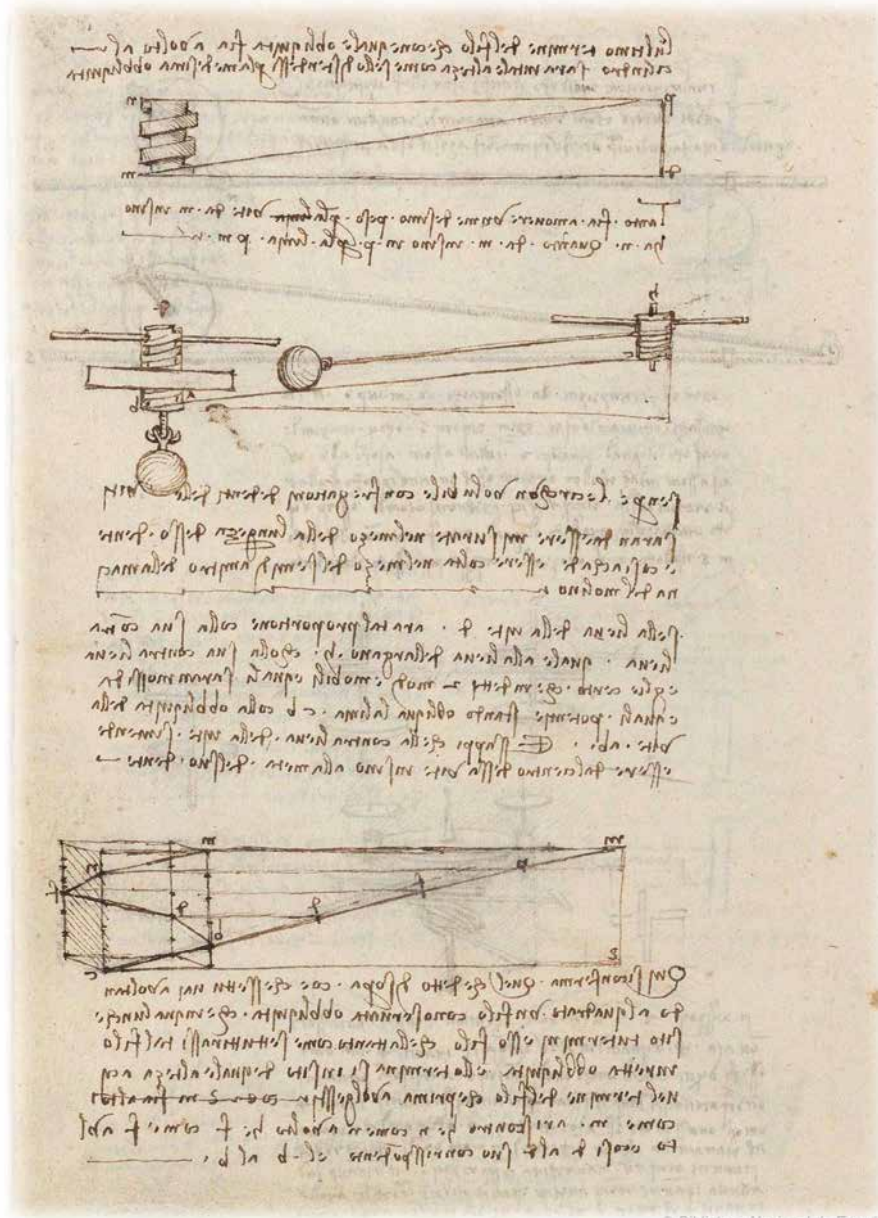


Figura 5.56: Tornillo y plano inclinado.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0086v

5.3.5.12.2. Potencia del tornillo (CM1_0121r).

Leonardo escribió:

"Medir la potencia del tornillo tomando la medida de la palanca en su brazo. La palanca se medirá desde el centro del movimiento de la mano o de la fuerza que hace girar el tornillo, hasta el centro del tornillo. El brazo de la palanca va desde el mencionado centro a la mitad de la rosca opuesta".

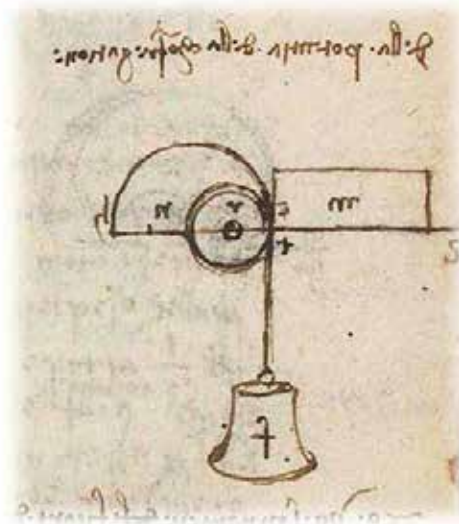


Figura 5.57: Potencia del tornillo.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0121r

5.3.5.12.3. Medición estática de la potencia del tornillo (CM1_0004v).

"Método para medir y probar la potencia del tornillo." Leonardo utilizó pesos para medir la fuerza requerida para girar el tornillo, así como la resistencia de la tuerca.

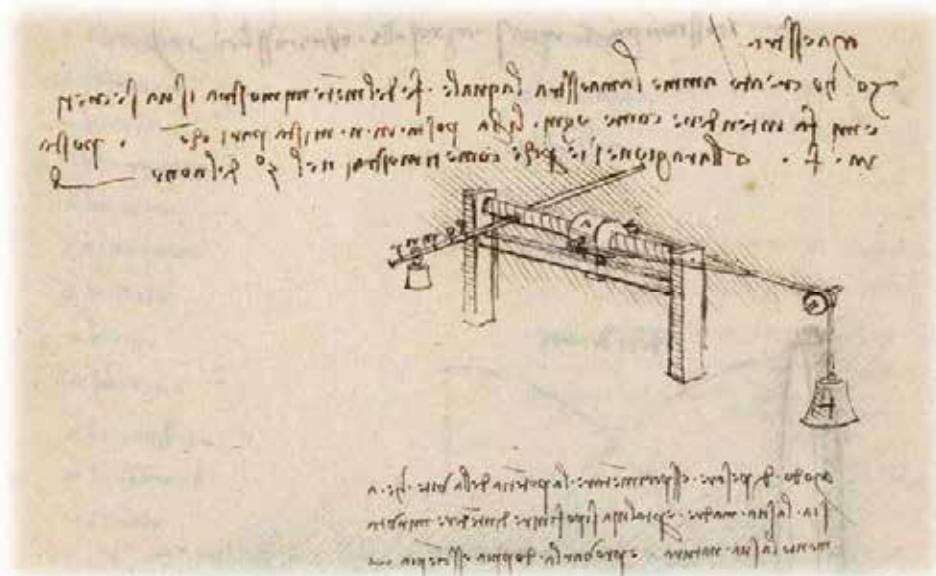


Figura 5.58: Mecanismo para medir la fuerza de un tornillo.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0004v

5.3.5.12.4. Máquinas de roscar automáticas (MsB_0070v y CM1_0091v).

La varilla central de hierro es la que va a ser roscada. Los dos tornillos laterales son conducidos por un mecanismo que comprende una manivela, una rueda dentada, y dos piñones. Los tornillos mueven el carro que lleva la fresa de roscar y al mismo tiempo hacen girar el vástago central. Bajo la máquina, Leonardo muestra cuatro engranajes para cambiar el paso de la rosca.

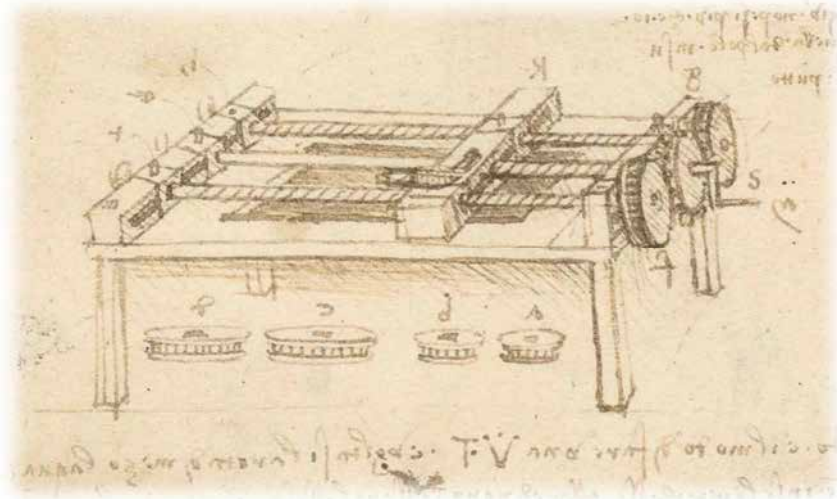


Figura 5.59: Máquina de roscar automática.
Instituto de Francia (París), Ms. B, f. 0070v

En una versión posterior, simplificó la máquina de roscar tornillos. En este folio Leonardo nos muestra dibujos detallados de dos fresas diferentes. La primera tiene la parte superior en ángulo recto (la de la derecha) y sirve para tallar la rosca del tornillo macho, mientras que la segunda tiene un alto ángulo obtuso y sirve para fabricar la rosca hembra.

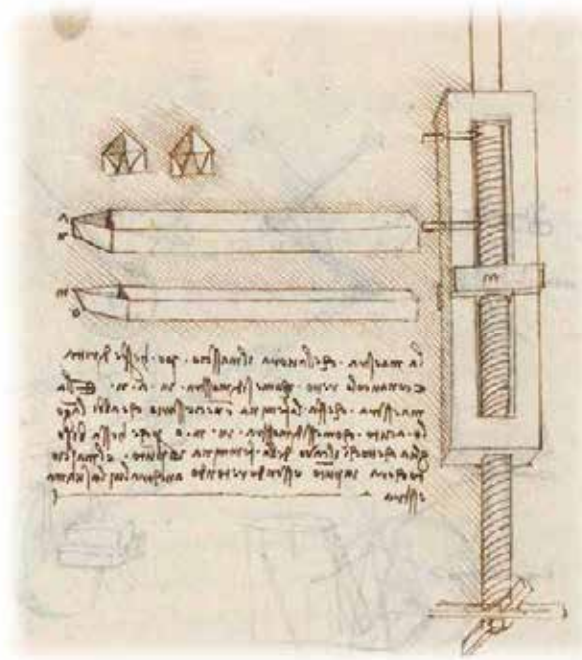


Figura 5.60: Máquina de roscar simplificada.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0091v

5.3.5.12.5. Tornillo de roscas invertidas (CM1_0058v).

El tornillo de roscas invertidas es un tornillo en el que los hilos de las roscas parten del centro del mismo y terminan en los extremos opuestos del tornillo, donde una mitad del tornillo se ha roscado a izquierdas y la otra mitad se ha invertido el sentido de la rosca, es decir a derechas. De esta forma si se hace girar el tornillo de rosca invertida sus tuercas tendrán giros contrarios entre ellas. Acercándose o alejándose del centro según se gire.

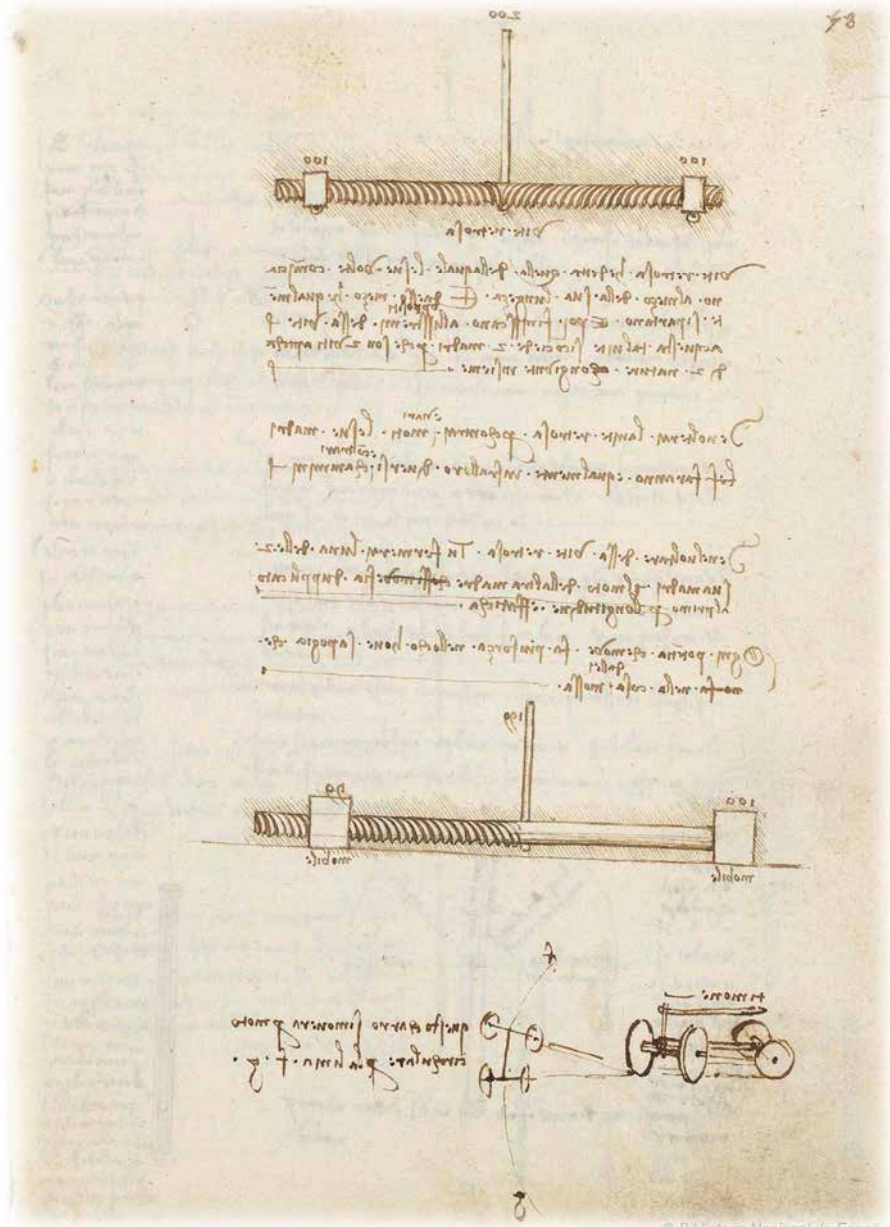


Figura 5.61: Tornillo de roscas invertidas.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0058r

5.3.5.12.6. Sistema formado por una secuencia de tornillos de roscas invertidas (CM1_0057v).

Leonardo explica que "en un giro completo de la manivela, el último tornillo se habrá movido una distancia igual a 7 dientes." El dibujo inferior muestra en detalle cómo los componentes de los tornillos encajan.

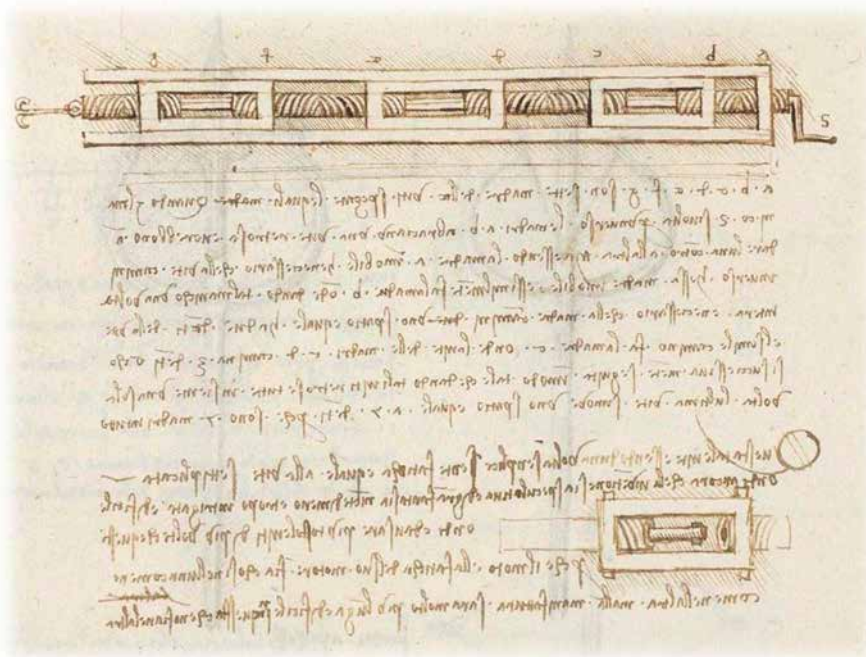


Figura 5.62: Secuencia formada por varios tornillos de rosca invertida. Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0057v

5.3.5.12.7. Tornillo como diferencial (CM1_0057v).

El tornillo tiene dos hilos de diferentes pasos: "a y m son dos tuercas, de los cuales la parte inferior es móvil, mientras que la otra no lo es y las tuercas son forzadas mediante la variación de las fuerzas de las diferentes roscas del tornillo que pasan a través de ellas".

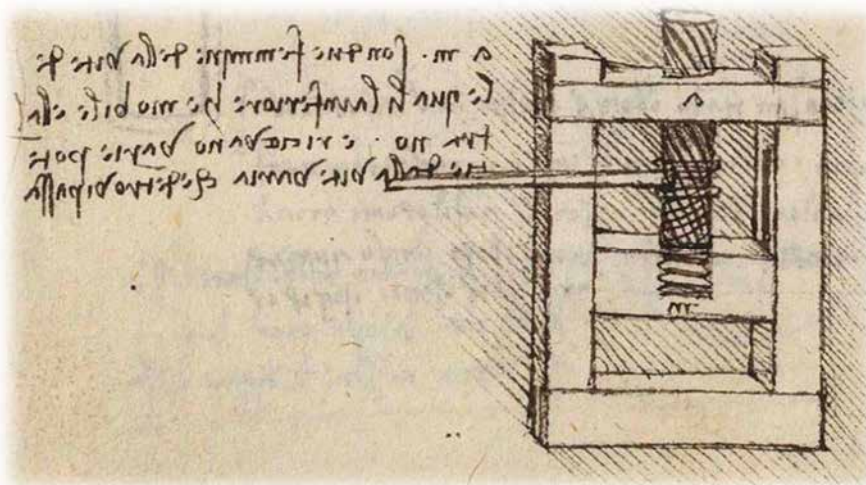


Figura 5.63: Uso del tornillo como diferencial. Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0057v

5.3.5.13. El tornillo sinfín: descripción y utilidad.

Descripción:

Desde el punto de vista conceptual el **sinfín** es considerado una rueda dentada de un solo diente que ha sido tallado helicoidalmente (en forma de hélice). Este operador ha sido diseñado para la transmisión de movimientos giratorios, por lo que siempre trabaja unido a otro engranaje.



Figura 5.64: Tornillo sinfín.
(Fuente: © CEJAROSU)

El perfil del hilo empleado en este operador es similar al que se usa para los engranajes.

Utilidad:

El **sinfín**, acompañado de un *piñón* (mecanismo *sinfín-piñón*), se emplea para transmitir un movimiento giratorio entre ejes perpendiculares que se cruzan, obteniendo una gran reducción de velocidad. Podemos encontrarlo en limpiaparabrisas, clavijas de guitarra, reductores de velocidad para motores, manivelas para andamios colgantes...

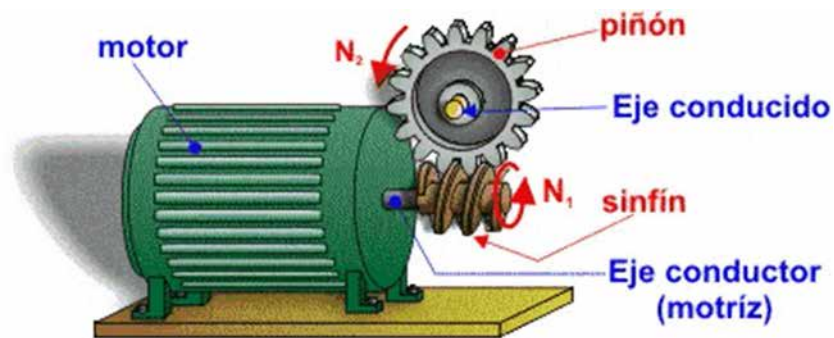


Figura 5.65: Mecanismo sinfín-piñón.
(Fuente: © CEJAROSU)

5.3.5.14. El tornillo sinfín en los manuscritos de Leonardo.

5.3.5.14.1. Tornillo sinfín circular (CM1_0070r).

"Si el tornillo sinfín se hace girar con la ayuda de piñón m , n , y la tuerca f se mantiene firmemente en su lugar permitiendo su giro alrededor, las vueltas de la tuerca, sin duda, tendrá una gran potencia".

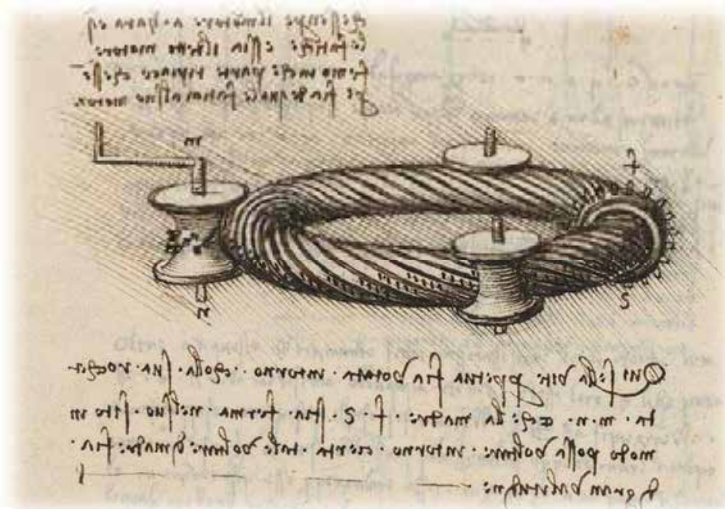


Figura 5.66: Tornillo sinfín circular.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0070r

5.3.5.14.2. Tornillo sinfín cóncavo (CM1_0019r).

El diseño muestra la idea inicial de un tornillo sin fin cóncavo: "Este tornillo actúa sobre la rueda con una fuerza igual y continua, ya que siempre engrana cuatro dientes de la rueda a diferentes distancias desde el centro (gracias a la manivela que gira un piñón)".

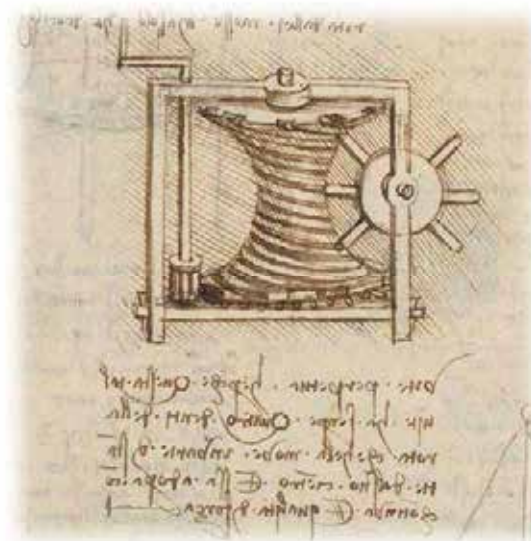


Figura 5.67: Tornillo sinfín cóncavo.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0019r

5.3.5.14.3. Tornillo sinfín que engrana con una rueda dentada (engranaje helicoidal) (CM1_0017v).

"Este aparato elevador tiene un tornillo sinfín que engrana muchos dientes en la rueda. Por esta razón, el aparato es muy fiable. Tornillos sinfín que engranan solamente uno de los dientes de la rueda de trabajo (dibujo inferior), podría causar un gran daño y destrucción si los dientes se rompiesen. En este caso sería necesario añadir un trinquete para evitar el retroceso de la rueda evitando de esta forma la rotura de los dientes".

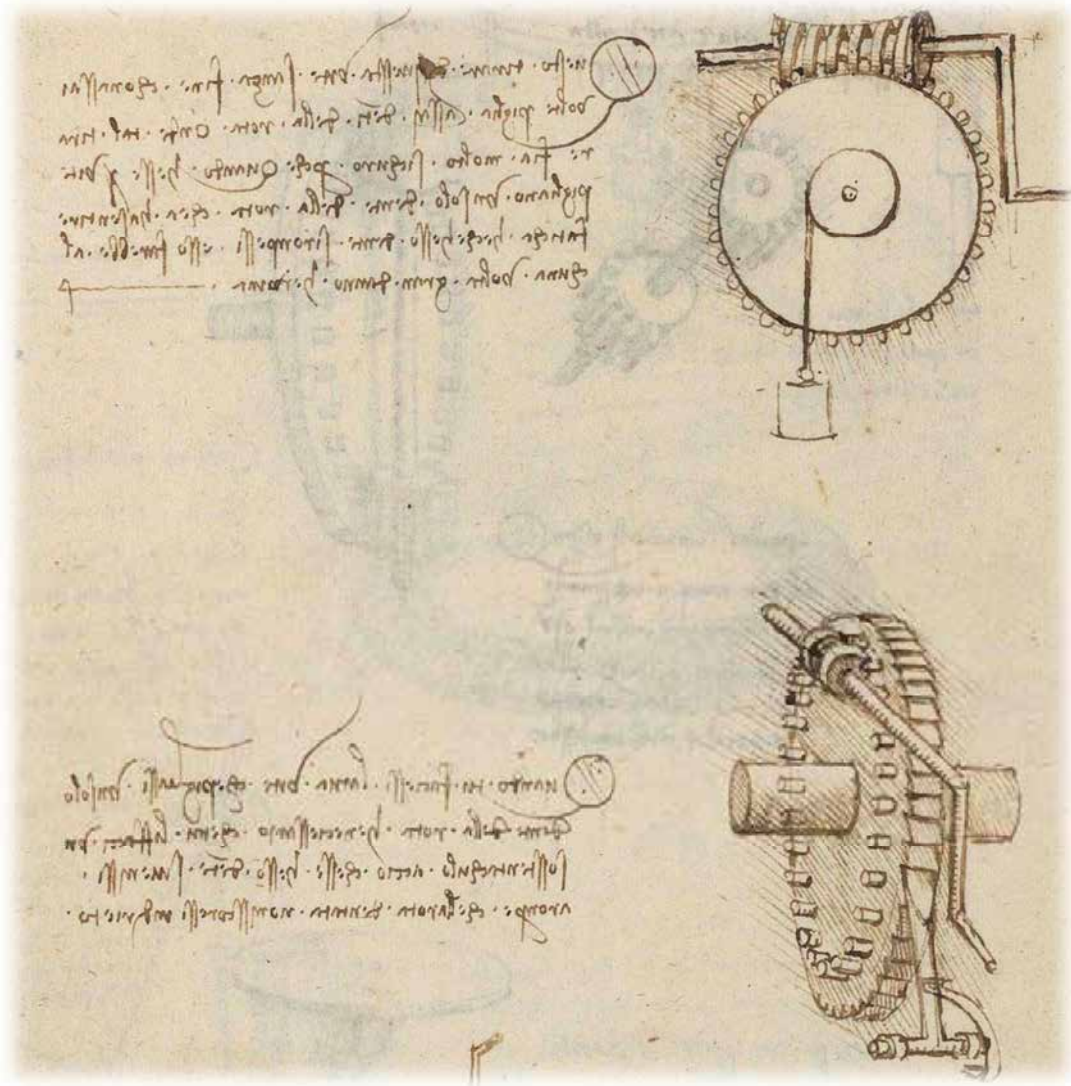


Figura 5.68: Tornillo sinfín que engrana con una rueda dentada (engranaje helicoidal).
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0017v

5.3.5.14.4. Tornillo sinfín que engrana con una cremallera circular (MsB_0072r).

Un tornillo sin fin engrana con una cremallera circular, haciendo que el eje solidario se mueva hacia adelante y hacia atrás. Este mecanismo es análogo al volante del automóvil moderno. Leonardo sugirió su uso para doblar barras de metal difíciles tales como las rejas de una ventana.

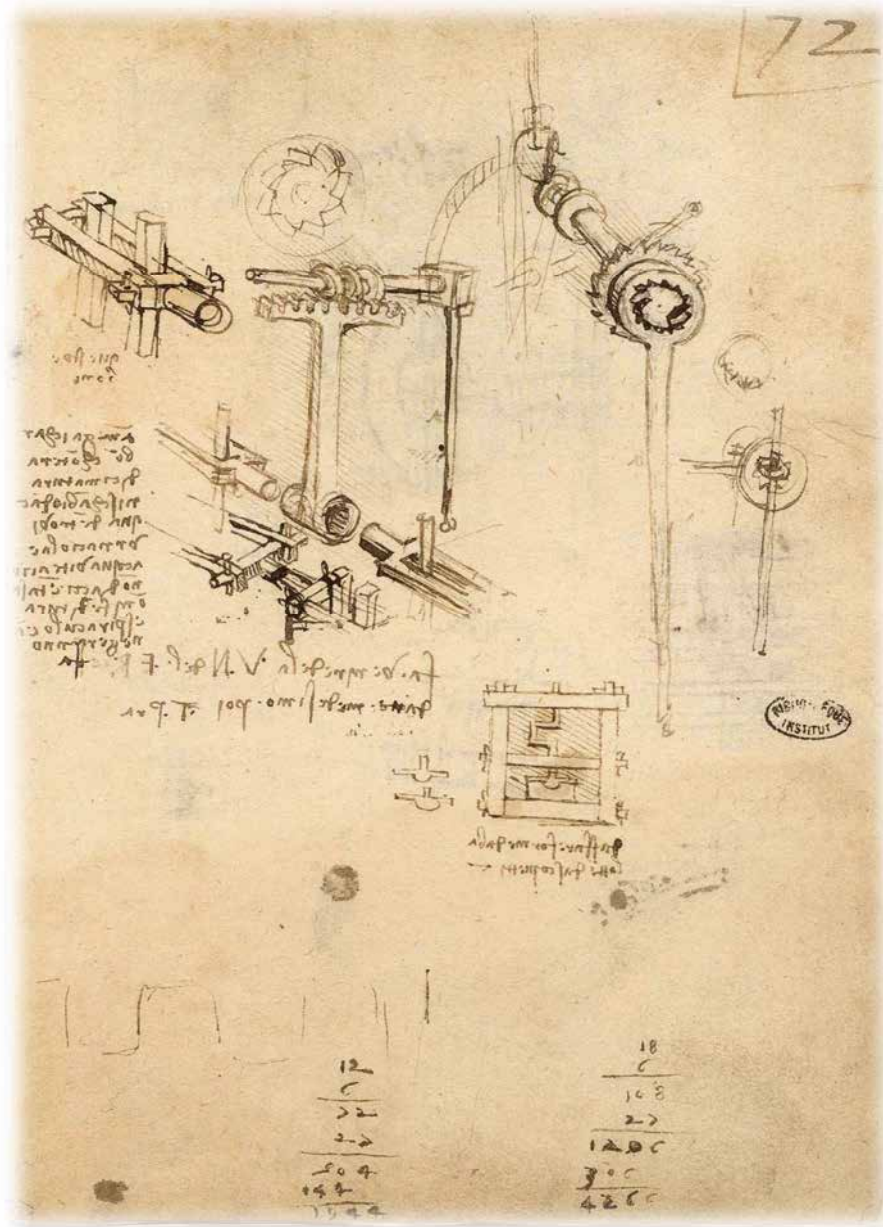


Figura 5.69: Tornillo sinfín que engrana con una cremallera circular.
Instituto de Francia (París), Ms. B, f. 0072r

5.3.5.15. La leva: descripción y utilidad.

Descripción

La leva es un disco con un perfil externo parcialmente circular sobre el que apoya un operador móvil (seguidor de leva) destinado a seguir las variaciones del perfil de la leva cuando esta gira.

Conceptualmente deriva de la rueda y del plano inclinado.

La leva va solidaria con un eje (árbol) que le transmite el movimiento giratorio que necesita; en muchas aplicaciones se recurre a montar varias levas sobre un mismo eje o árbol (árbol de levas), lo que permite la sincronización del movimiento de varios seguidores a la vez.

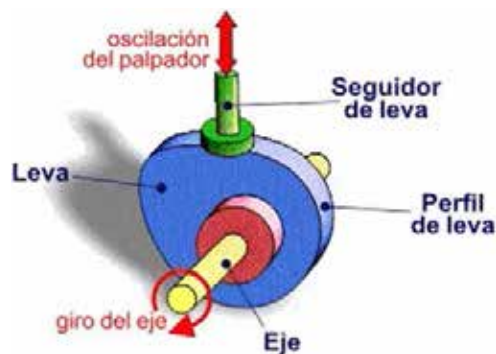


Figura 5.70: Descripción de la leva.

(Fuente: © CEJAROSU)

Como seguidor de leva pueden emplearse émbolos (para obtener movimientos de vaivén) o palancas (para obtener movimientos angulares) que en todo momento han de permanecer en contacto con el contorno de la leva. Para conseguirlo se recurre al empleo de resortes, muelles o gomas de recuperación adecuadamente dispuestos.

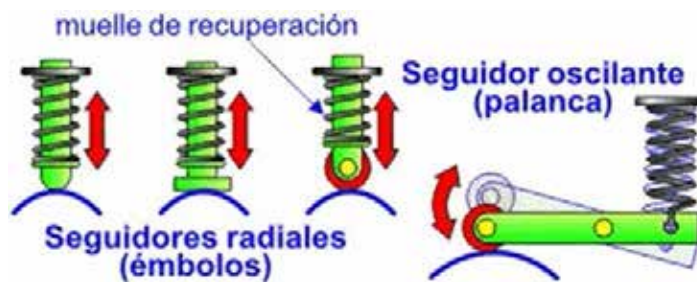


Figura 5.71: Seguidores radiales (izq.) y seguidor oscilante (der.) en una leva.

(Fuente: © CEJAROSU)

Perfiles de leva

La forma del contorno de la leva (*perfil de leva*) siempre está supeditada al movimiento que se necesite en el *seguidor*, pudiendo aquel adoptar curvas realmente complejas.

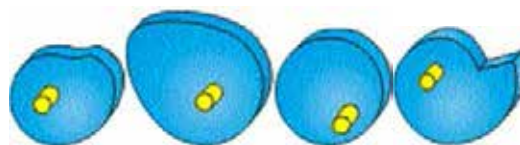


Figura 5.72: Diferentes perfiles de leva.

(Fuente: © CEJAROSU)

Utilidad

La leva es un mecanismo que nos permite transformar un movimiento giratorio en uno alternativo lineal (sistema leva-émbolo) o circular (sistema leva-palanca), estando su principal utilidad en la automatización de máquinas (programadores de lavadora, control de máquinas de vapor, apertura y cierre de las válvulas de los motores de explosión...).

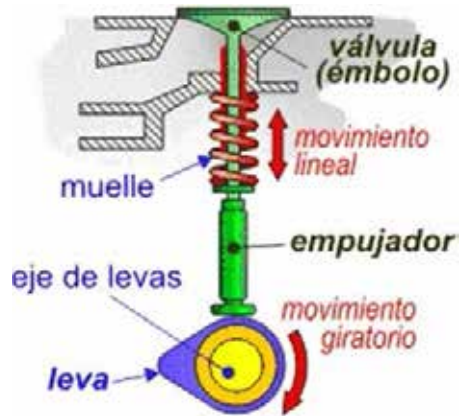


Figura 5.73: Leva como transmisor de movimiento giratorio en lineal alterno.
(Fuente: © CEJAROSU)

5.3.5.16. La leva en los manuscritos de Leonardo.

Tal y como se ha comentado en el punto anterior, la leva es una pieza mecánica que sirve para transformar el movimiento giratorio continuo en movimiento lineal alterno, o viceversa.

Leonardo hizo uso frecuente de levas, especialmente para generar movimiento lineales de avance y retroceso, o bien para obtener un movimiento de percusión regular de un movimiento giratorio.

5.3.5.16.1. Martillo accionado por leva excéntrica (CM1_0006v).

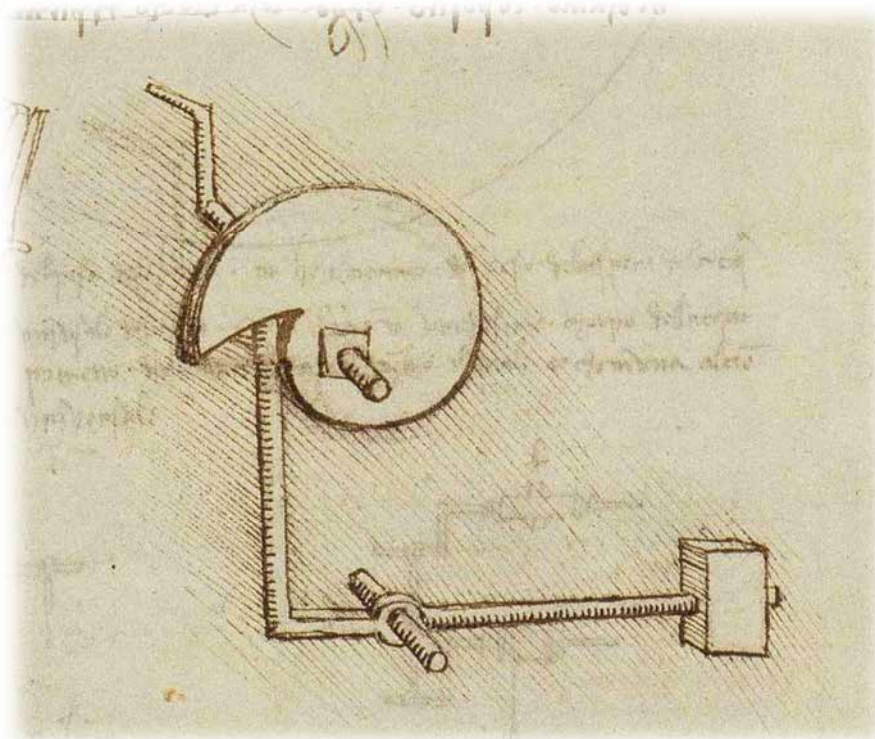


Figura 5.74: Martillo accionado por leva.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0006v (detalle)

5.3.5.16.2. Leva excéntrica para regular la fuerza de un resorte (MsM_0081r).

Esta aplicación, sin duda destinada a los relojes, parece ser un precursor de lo que se conoce como el mecanismo “*stack-freed*”.

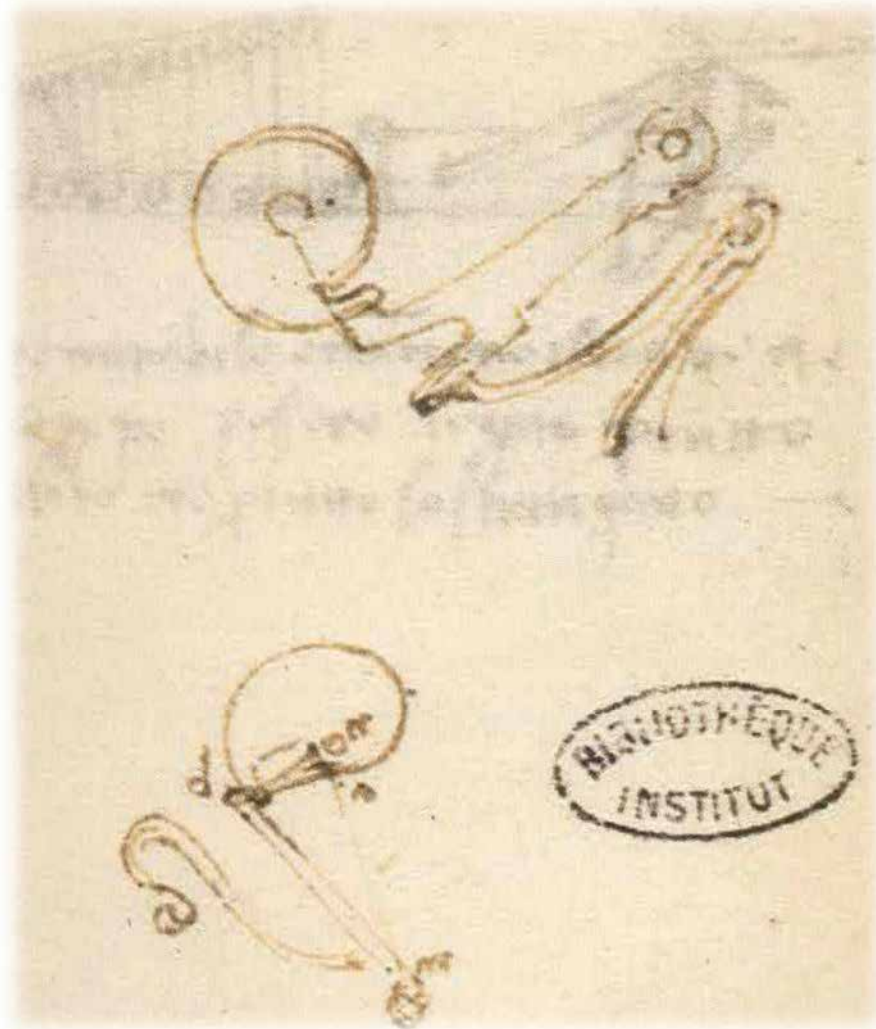


Figura 5.75: Mecanismo “*stack-freed*”.
Instituto de Francia (París), Ms. M, f. 0081r

5.3.5.16.3. Escape de péndulo silencioso con leva senoidal (CM1_0008r).

Un diseño visionario de Leonardo: este escape no fue utilizado para regular los relojes hasta varios siglos después.

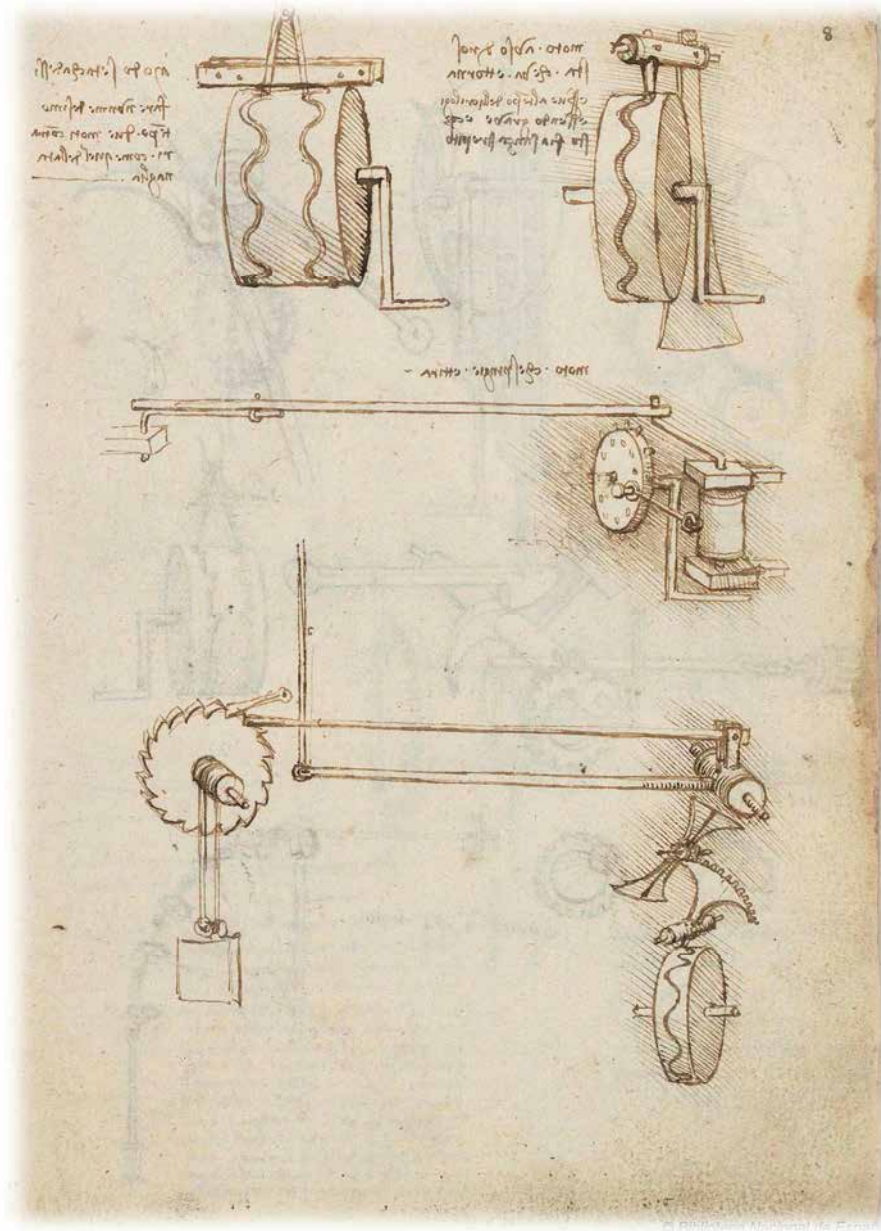


Figura 5.76: Escape de péndulo silencioso con leva sinusoidal. Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0008r

5.3.5.17. La palanca: descripción y utilidad.

Descripción:

Desde el punto de vista técnico, la palanca es una barra rígida que oscila sobre un punto de apoyo (fulcro) debido a la acción de dos fuerzas contrapuestas (potencia y resistencia).

En los proyectos de tecnología la palanca puede emplearse para dos finalidades: vencer fuerzas u obtener desplazamientos. Desde el punto de vista tecnológico, cuando empleamos la palanca para vencer fuerzas podemos considerar en ella 4 elementos importantes:

Potencia (P), fuerza que tenemos que aplicar.

Resistencia (R), fuerza que tenemos que vencer; es la que hace la palanca como consecuencia de haber aplicado nosotros la potencia.

Brazo de potencia (BP), distancia entre el punto en el que aplicamos la potencia y el punto de apoyo (fulcro).

Brazo de resistencia (BR), distancia entre el punto en el que aplicamos la resistencia y el (fulcro).

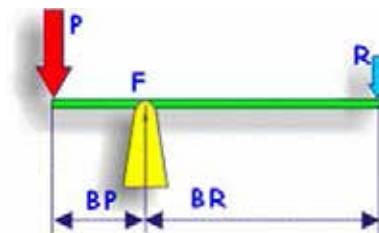


Figura 5.77: Descripción de las fuerzas y distancias en la palanca.

(Fuente: © CEJAROSU)

Pero cuando el problema técnico a solucionar solamente afecta a la amplitud del movimiento, sin tener en cuenta para nada la intensidad de las fuerzas, los elementos tecnológicos pasarían a ser:

Desplazamiento de la potencia (dp), es la distancia que se desplaza el punto de aplicación de la potencia cuando la palanca oscila.

Movimiento de la resistencia (dR), distancia que se desplaza el punto de aplicación de la resistencia al oscilar la palanca

Brazo de potencia (BP), distancia entre el punto de aplicación de la potencia y el fulcro.

Brazo de resistencia (BR), distancia entre el punto de aplicación de la resistencia y el fulcro.

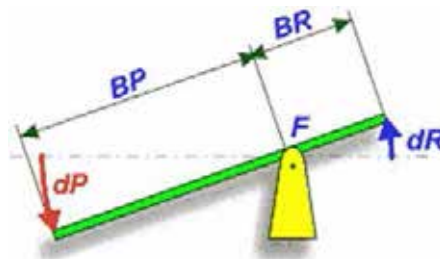


Figura 5.78: Desplazamientos de la potencia y de la resistencia en la palanca.

(Fuente: © CEJAROSU)

Un poco de historia:

Los inventos basados en la palanca se fueron desarrollando a lo largo de los siglos y tuvieron aplicaciones en campos muy diversos: fuerza, medición, transporte.

En la prehistoria ya se empleaba de forma inconsciente para amplificar el golpe (hachas y martillos) y el transporte de materiales sobre palos que se sujetaban con las manos en un extremo y arrastraban por el suelo en el otro (narria).

En el 3200 a. de C. ya se empleaba en forma de lanza en los carros (palanca de 2º grado)

Hacia el 2800 a. de C. se empleaba en Egipto remos fijos apoyados en chumaceras o aros para el desplazamiento por el Nilo (Palanca de 2º grado)

Hacia el 2650 a. de C. ya se empleaba de forma habitual en Egipto y Mesopotamia la balanza de brazos móviles en cruz para la medición de masas (palanca de 1er grado).

Sobre el 2600 se empleaban palancas de grandes proporciones para el movimiento de grandes bloques de piedra empleados en la construcción de las primeras pirámides (palanca de 2º grado).

Por el 2500 a. de C. los artesanos de Ur (Mesopotamia) ya empleaban las pinzas en trabajos delicados (palanca de 3er grado).

En el 2000 a. de C. ya se empleaba para el funcionamiento de las cerraduras en forma de llave.

Por el 1550 empezó a emplearse en Egipto y Mesopotamia en forma de cigoñal (Shadoof) para la extracción del agua de los ríos, extendiéndose rápidamente por todas las culturas fluviales. Eran grandes palancas de primer grado que posteriormente evolucionarían hacia las grandes grúas egipcias.

Hacia el 1000 a. de C. ya se fabricaban tijeras de hierro para trasquilar ovejas en forma de palancas de tercer grado.

En el 250 a. de C. Arquímedes descubre el principio de la palanca, con lo que este es el momento en el que empieza el uso tecnológico y consciente de esta máquina.

Utilidad:

Según la combinación de los puntos de aplicación de potencia y resistencia y la posición del fulcro se pueden obtener tres tipos de palancas:

Palanca de primer grado. Se obtiene cuando colocamos el fulcro entre la potencia y la resistencia. Como ejemplos clásicos podemos citar la pata de cabra, el balancín, los alicates o la balanza romana.

Palanca de segundo grado. Se obtiene cuando colocamos la resistencia entre la potencia y el fulcro. Según esto el brazo de resistencia siempre será menor que el de potencia, por lo que el esfuerzo (potencia) será menor que la carga (resistencia). Como ejemplos se puede citar el cascanueces, la carretilla o la perforadora de hojas de papel.

Palanca de tercer grado. Se obtiene cuando ejercemos la potencia entre el fulcro y la resistencia. Esto tras consigo que el brazo de resistencia siempre sea mayor que el de potencia, por lo que el esfuerzo siempre será mayor que la carga (caso contrario al caso de la palanca de segundo grado). Ejemplos típicos de este tipo de palanca son las pinzas de depilar, las paletas y la caña de pescar. A este tipo también pertenece el sistema motriz del esqueleto de los mamíferos.

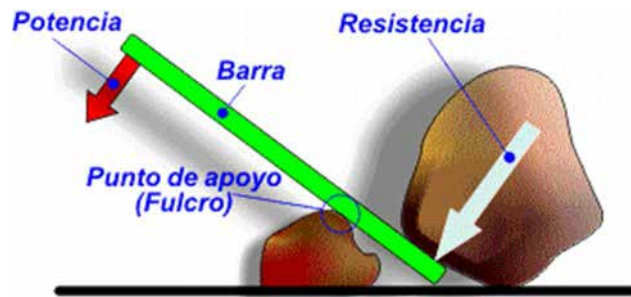


Figura 5.79: Palanca de primer grado.
(Fuente: © CEJAROSU)

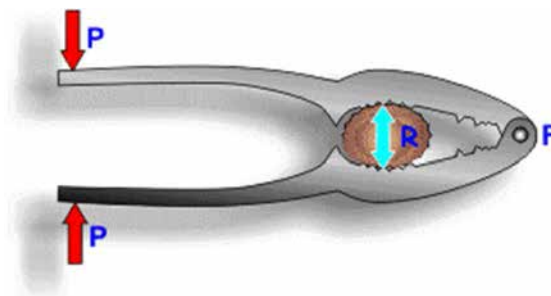


Figura 5.80: Palanca de segundo grado.
(Fuente: © CEJAROSU)



Figura 5.81: Palanca de tercer grado.
(Fuente: © CEJAROSU)

De todo lo anterior podemos deducir que la palanca puede emplearse con dos finalidades prácticas:

Modificar la intensidad de una fuerza. En este caso podemos vencer grandes resistencias aplicando pequeñas potencias

Modificar la amplitud y el sentido de un movimiento. De esta forma podemos conseguir grandes desplazamientos de la resistencia con pequeños desplazamientos de la potencia

Ambos aspectos están ligados, pues solamente se puede aumentar la intensidad de una fuerza con una palanca a base de reducir su recorrido, y al mismo tiempo, solamente podemos aumentar el recorrido de una palanca a base de reducir la fuerza que produce.

5.3.5.18. Palanca en los manuscritos de Leonardo.

Leonardo sabía que el instrumento mecánico por excelencia para elevar un peso es la palanca. Como se ha descrito en los apartados anteriores, la palanca está formada por un eje rígido que se apoya en un punto de rotación. La fuerza o el peso aplicado en un extremo se transmite al otro lado con intensidad proporcional a la distancia con el punto de apoyo o fulcro. La balanza es una palanca con el fulcro en el centro exacto del sistema. La pata de cabra, en cambio, es una palanca que transmite una fuerza enorme sobre el extremo muy cercano al fulcro.

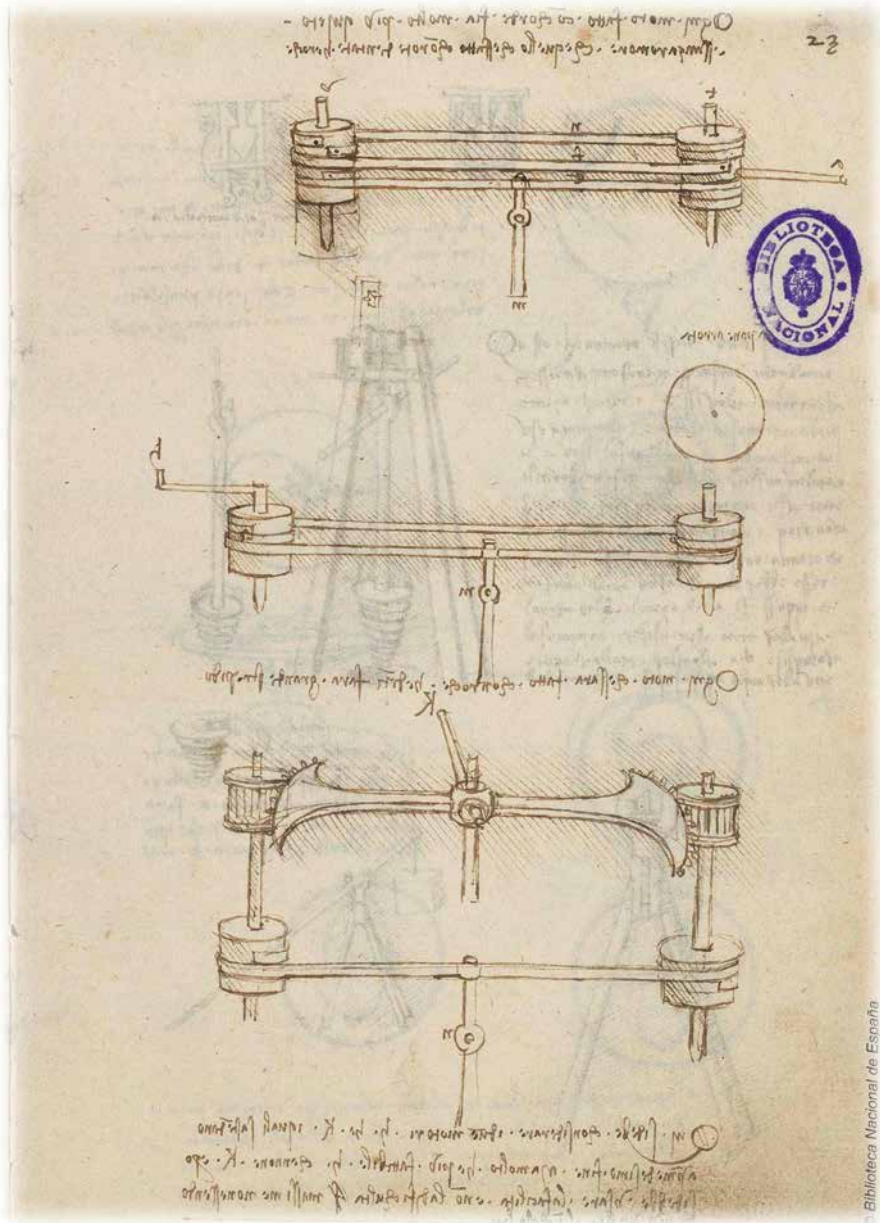


Figura 5.82: Palanca.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0023r

5.3.5.19. Excéntrica: descripción y utilidad.

Descripción:

Tanto la excéntrica como el resto de operadores similares a ella: manivela, pedal, cigüeñal, derivan de la rueda y se comportan como una palanca.

Desde el punto de vista técnico la **excéntrica** es, básicamente, un disco (rueda) dotado de dos ejes: Eje de giro y el excéntrico. Por tanto, se distinguen en ella tres partes claramente diferenciadas:

El **disco**, sobre el que se sitúan los dos ejes.

El **eje de giro**, que está situado en el punto central del disco (o rueda) y es el que guía su movimiento giratorio.

El **eje excéntrico**, que está situado paralelo al anterior pero a una cierta distancia (Radio) del mismo.

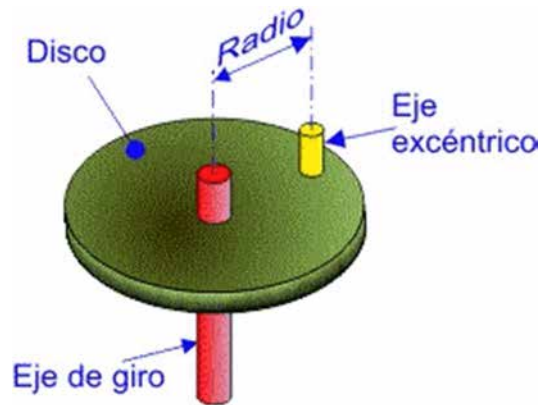


Figura 5.83: Partes de una excéntrica.

(Fuente: © CEJAROSU)

Al girar el disco, el *eje excéntrico* describe una circunferencia alrededor del *eje de giro* cuyo radio viene determinado por la distancia entre ambos.

El disco suele fabricarse en acero o fundición, macizo o no.

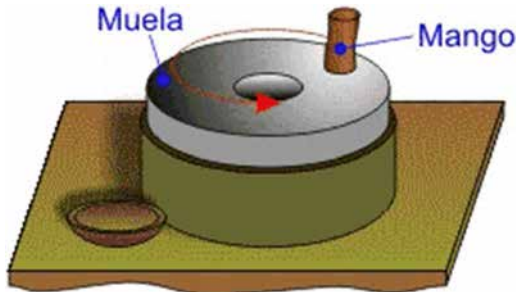


Figura 5.84: Trayectoria del eje excéntrico.

(Fuente: © CEJAROSU)

Utilidad:

Su utilidad práctica se puede resumir en tres posibilidades básicas:



Imprimir un movimiento giratorio a un objeto. Esto se consigue simplemente con una excéntrica en la que el eje excéntrico hace de agarradera (molinos de mano, sistemas de rehabilitación de los brazos, manivelas...) y se le hace girar sobre su eje central.

Figura 5.85: Molino de mano.
(Fuente: © CEJAROSU)

Imprimir un movimiento giratorio a un eje empleando las manos o los pies. En ambos casos se recurre más a la manivela que a la excéntrica. Pero una aplicación que no ha renunciado a la excéntrica es la conversión en giratorio del movimiento alternativo producido por un pie (máquinas de coser antiguas). Esto se consigue con el sistema excéntrica-palanca-biela.

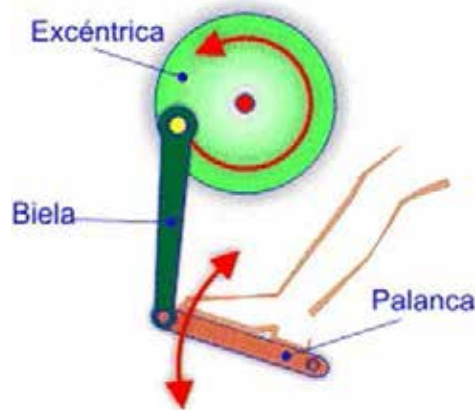


Figura 5.86: Mecanismo excéntrica-palanca-biela.
(Fuente: © CEJAROSU)

Transformar un movimiento giratorio en lineal alternativo (sistema excéntrica-biela)
Con la ayuda de una biela, transformar en *lineal alternativo* el movimiento *giratorio* de un eje (la conversión también puede hacerse a la inversa). Si se añade un émbolo se obtiene un movimiento lineal alternativo perfecto.

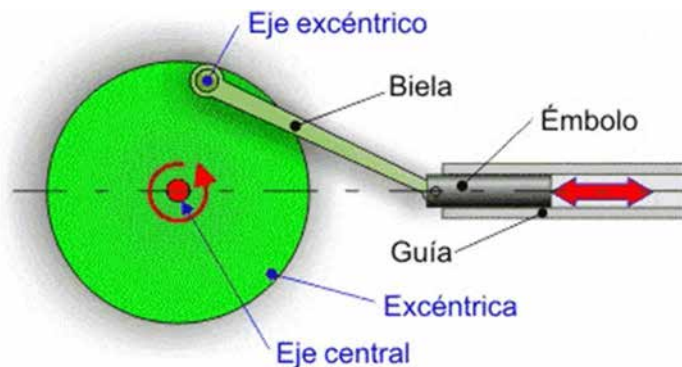


Figura 5.87: Mecanismo excéntrica-biela.
(Fuente: © CEJAROSU)

5.3.5.20. La manivela: descripción y utilidad.

Descripción:

Desde el punto de vista técnico es un eje acodado, conceptualmente derivado de la palanca y la rueda.

En ella se pueden distinguir tres partes principales: Eje, Brazo y Empuñadura.

El **eje** determina el centro de giro de la manivela.

El **brazo** determina la distancia entre eje y empuñadura. Es similar al brazo de una palanca.

La **empuñadura** es la parte adaptada para ser cogida con las manos (en el caso de los pedales esta se adapta a las características del pie).

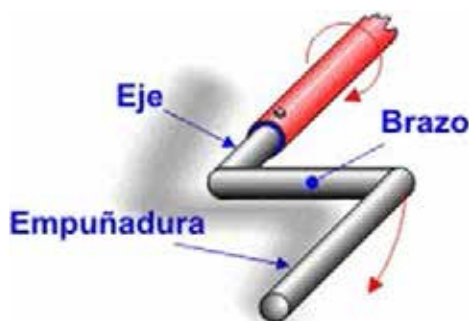


Figura 5.88: Descripción de la manivela.
(Fuente: © CEJAROSU)

Desde un punto de vista técnico la manivela y la excéntrica son la misma cosa. Esto se puede entender fácilmente si partimos de una rueda excéntrica a la que le quitamos todo el material excepto el radio que une los dos ejes.



Figura 5.89: De la excéntrica a la manivela.
(Fuente: © CEJAROSU)

Desde el punto de vista tecnológico la manivela se comporta como una palanca y por tanto cumplirá la ley de la palanca: $R \times BR = P \times BP$

Vemos que cuando ejercemos una fuerza "P" sobre la empuñadura, aparece un par de fuerzas "R" en el eje. Como la distancia "BP" es mucho mayor que "BR" resulta que la fuerza que aparece en el eje será mayor que la ejercida en la empuñadura. Aquí se cumple el principio de la palanca.

Utilidad:

Facilitar el giro de un eje por parte de una persona, transmitiendo de esta forma una cierta potencia. Tan sencillo como agarrar la empuñadura y comenzar a dar vueltas.

5.3.5.21. La biela: descripción y utilidad.

Descripción:

Consiste en una barra rígida diseñada para establecer uniones articuladas en sus extremos. Permite la unión de dos operadores transformando el movimiento rotativo de uno (manivela, excéntrica, cigüeñal...) en el lineal alternativo del otro (émbolo...), o viceversa.

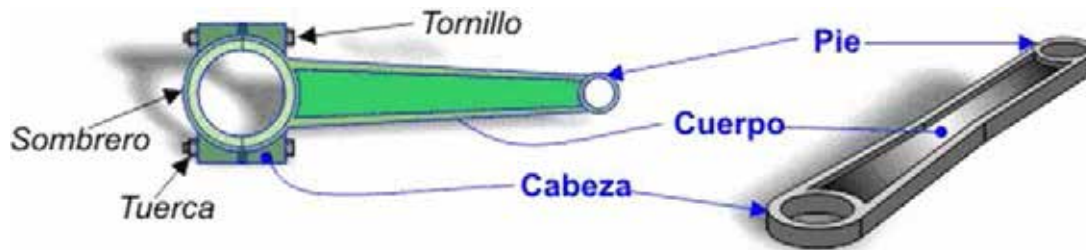


Figura 5.90: Descripción de la biela.
(Fuente: © CEJAROSU)

Desde el punto de vista técnico se distinguen tres partes básicas: **cabeza, pie y cuerpo.**

La **cabeza de biela** es el extremo que realiza el movimiento rotativo. Está unida mediante una articulación a un operador excéntrico (excéntrica, manivela, cigüeñal...) dotado de movimiento giratorio.

El **pie de biela** es el extremo que realiza el movimiento alternativo. El hecho de que suele estar unida a otros elementos (normalmente un émbolo) hace que también necesite de un sistema de unión articulado.

El **cuerpo de biela** es la parte que une la cabeza con el pie. Está sometida a esfuerzos de tracción y compresión y su forma depende de las características de la máquina a la que pertenece.

Las bielas empleadas en aplicaciones industriales suelen fabricarse en acero forjado y la forma se adaptará a las características de funcionamiento. En las máquinas antiguas solía tomar forma de "S" o "C" y sección constante. En las actuales suele ser rectilínea con sección variable, dependiendo de los esfuerzos a realizar.

Utilidad:

Desde el punto de vista tecnológico, una de las principales aplicaciones de la **biela** consiste en convertir un movimiento giratorio continuo en uno lineal alternativo, o viceversa. La amplitud del movimiento lineal alternativo depende de la excentricidad del operador al que esté unido. Este operador suele estar asociado siempre a una manivela (o también a una excéntrica o a un cigüeñal).

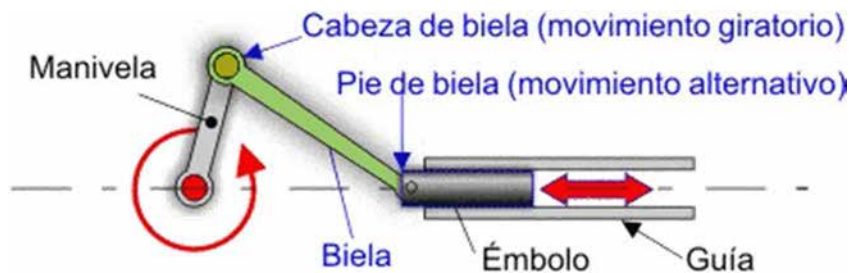


Figura 5.91: Biela: conversión del movimiento giratorio en lineal alternativo.
(Fuente: © CEJAROSU)

La **biela** se emplea en multitud de máquinas que precisan de la conversión entre movimiento giratorio continuo y lineal alternativo. Son ejemplos claros: trenes con máquina de vapor, motores de combustión interna (empleados en automóviles, motos o barcos); máquinas movidas mediante el pie (máquinas de coser, ruecas, piedras de afilar), bombas de agua, etc. (ver fig. 5.87).

5.3.5.22. La excéntrica, la manivela y la biela en los manuscritos de Leonardo.

La excéntrica, la manivela y la biela son operadores mecánicos que se agrupan para formar el mecanismo biela-manivela y excéntrica-biela que veremos más adelante en el apartado 5.3.7 al tratar los mecanismos para la transmisión de movimientos.

5.3.5.23. El cigüeñal: descripción y utilidad.

Descripción:

Cuando varias manivelas se asocian sobre un único eje da lugar al **cigüeñal**. En realidad este operador se comporta como una serie de palancas acopladas sobre el mismo eje o fulcro.

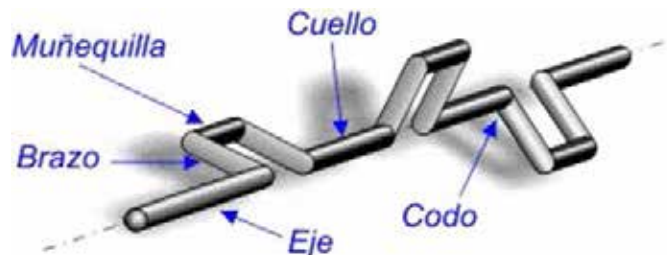


Figura 5.92: Partes de un cigüeñal.
(Fuente: © CEJAROSU)

En el cigüeñal se distinguen cuatro partes básicas: **eje, muñequilla, cuello y brazo**.

El **eje** sirve de guía en el giro. Por él llega o se extrae el movimiento giratorio.

El **cuello** está alineado con el eje y permite guiar el giro al unirlo a soportes adecuados.

La **muñequilla** sirve de asiento a las cabezas de las bielas.

El **brazo** es la pieza de unión entre el cuello y la muñequilla. Su longitud determina la carrera de la biela.

Utilidad:

La utilidad práctica del cigüeñal viene de la posibilidad de convertir un movimiento rotativo continuo en uno lineal alternativo, o viceversa. Para ello se ayuda de bielas (sistema biela-manivela sobre un cigüeñal).

Los cigüeñales son empleados en todo tipo de mecanismos que precisen movimientos alternativos sincronizados: motores de coches, juguetes en los que piernas y manos van sincronizados, etc.

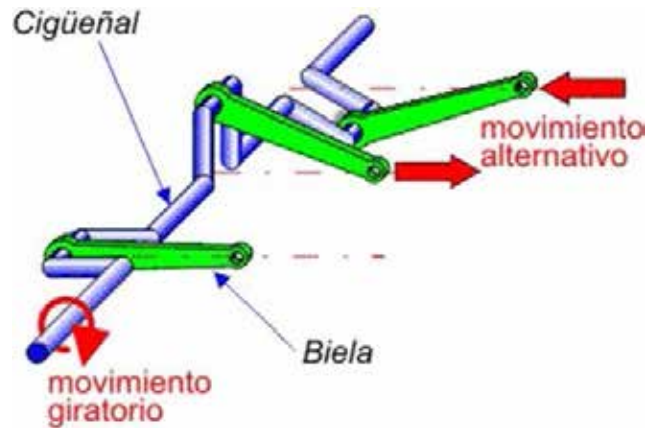


Figura 5.93: Conversión del movimiento giratorio del cigüeñal en lineal alternativo.
(Fuente: © CEJAROSU)

Cuando el cigüeñal consta de varias **manivelas** dispuestas en planos y sentidos diferentes, el movimiento alternativo de las diversas bielas estará sincronizado y la distancia recorrida por el pie de biela dependerá de la longitud del brazo de cada manivela.

5.3.5.24. El cigüeñal en los manuscritos de Leonardo.

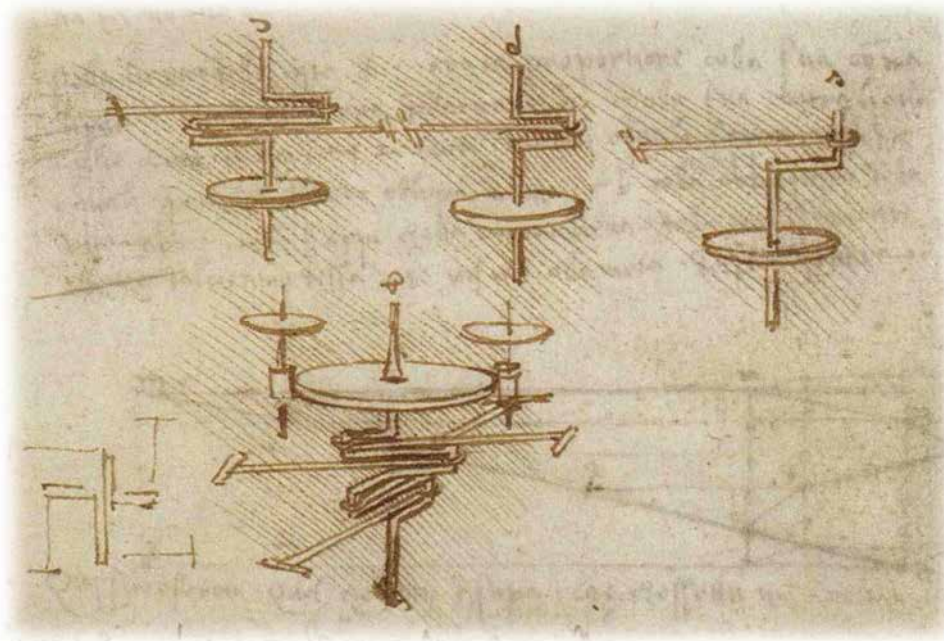


Figura 5.94: Cigüeñal.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0086r (detalle)

5.3.6. Otros operadores mecánicos y mecanismos.

A continuación vamos a tratar de desarrollar de forma sistemática una serie de operadores mecánicos y mecanismos que aun no siendo estrictamente operadores transformadores de movimiento, sí que son muy útiles en el diseño de máquinas y mecanismos; y que Leonardo estudió ampliamente a lo largo de sus manuscritos, principalmente en el Códice de Madrid I.

La cuña

La rampa

El trinquete

Articulaciones, ejes, apoyos y rodamientos

Juntas y bisagras

Tubos de madera modulares

Ganchos y pinzas

Volantes

Muelles y resortes

Cables y correas

Cadenas

Amortiguadores

5.3.6.1. La cuña: descripción y utilidad.

Descripción:

De forma sencilla se podría describir como un prisma triangular con un ángulo muy agudo. También podríamos decir que es una pieza terminada en una arista afilada que actúa como un plano inclinado móvil.

Se encuentra fabricada en madera, acero, aluminio, plásticos...

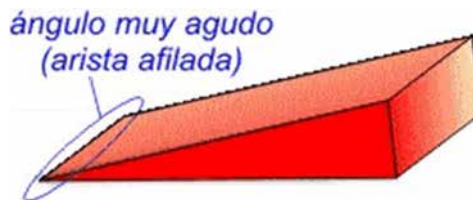


Figura 5.95: Cuña.
(Fuente: © CEJAROSU)

Estudio de las fuerzas:

La cuña es un amplificador de fuerzas (tiene ganancia mecánica). Su forma de actuar es muy simple: transforma una fuerza aplicada en dirección al ángulo agudo (F) en dos fuerzas perpendiculares a los planos que forman la arista afilada (F_1 y F_2); la suma vectorial de estas fuerzas es igual a la fuerza aplicada.

Las fuerzas resultantes son mayores cuanto menor es el ángulo de la cuña.

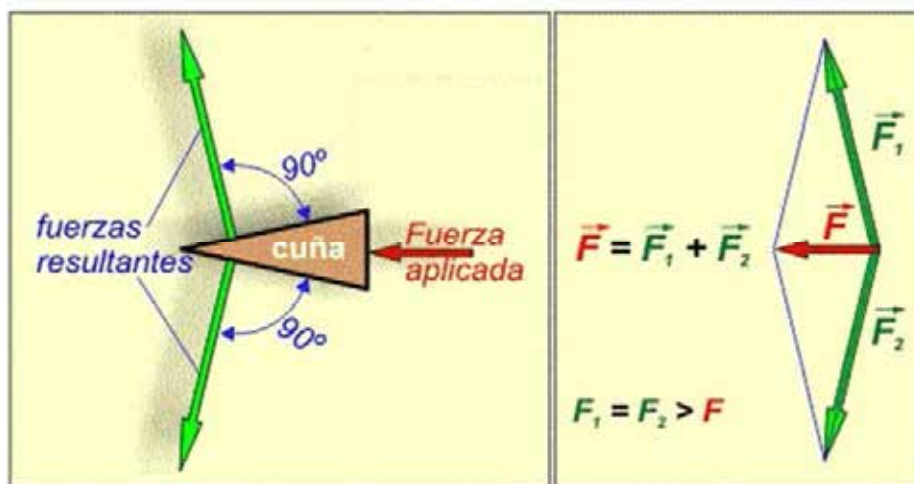


Figura 5.96: Estudio de las fuerzas que ejerce una cuña.
(Fuente: © CEJAROSU)

Un poco de historia y evolución:

El hombre de Cromañón ya la empleaba bajo la forma de hacha, cuchillo y puntas de lanza.

En el 3000 a.C. ya se empleaba en las canteras egipcias para la separación de grandes bloques de piedra y para extraer tablas de los árboles. También por esta época se empieza a emplear en forma de sierra para madera.

Hacia el 2900 a.C. se empieza a emplear en Sumeria bajo la forma de arado de madera.

Hacia el 1000 a.C. se aplica a las tijeras para trasquilar ovejas.

En 1848 es empleada por Linus Yale para la fabricación de la llave de la primera cerradura de seguridad. Esa llave estaba dotada de dientes de sierra con alturas diferentes.

En 1906 se patenta la cremallera formada por dientes que se engarzan entre sí por efecto de dos planos inclinados que los presionan. Una cuña introducida entre ellos permite separarlos.

Utilidad:

La cuña es sumamente versátil y forma parte de multitud de mecanismo de uso cotidiano. Algunas de sus utilidades prácticas son:

Modificar la dirección de una fuerza. Pues convierte una fuerza longitudinal en dos fuerzas perpendiculares a los planos que forman el ángulo agudo. Esta utilidad es la empleada para abrir o separar cuerpos: obtener tablones de los árboles, partir piedras en canteras, cerrar o abrir los dientes de una cremallera...



Figura 5.97: Cuña como hacha.

(Fuente: © CEJAROSU)

Convertir un movimiento lineal en otro perpendicular. Si combinamos dos cuñas podemos convertir el movimiento lineal de una en el desplazamiento perpendicular de la otra creando una gran fuerza de apriete. Esta utilidad es especialmente apreciada en el ajuste de ensamblajes en madera, sujeción de puertas, ajuste de postes en la construcción, llaves de cerraduras...

Herramienta de corte, bien haciendo uso de la arista afilada (cuchillo, abrelatas, tijeras, maquinilla eléctrica, cuchilla de torno...) o recurriendo al tallado de pequeñas cuñas (dientes de sierra) que en su movimiento de avance son capaces de arrancar pequeñas virutas (sierra para metales, serrucho, sierra mecánica, fresa, lima...).

5.3.6.2. La cuña en los manuscritos de Leonardo.

La cuña es un objeto con forma piramidal que penetra en un surco en entre dos paredes y provoca su separación. La energía de impacto proporcionada por un batiente sobre la cabeza de la cuña se distribuye en dirección a las paredes. Se utiliza para distribuir la energía en distintas direcciones. El concepto base es el del plano inclinado.

5.3.6.2.1. Estudio de la potencia y disposición de las cuñas (CM1_0047r).

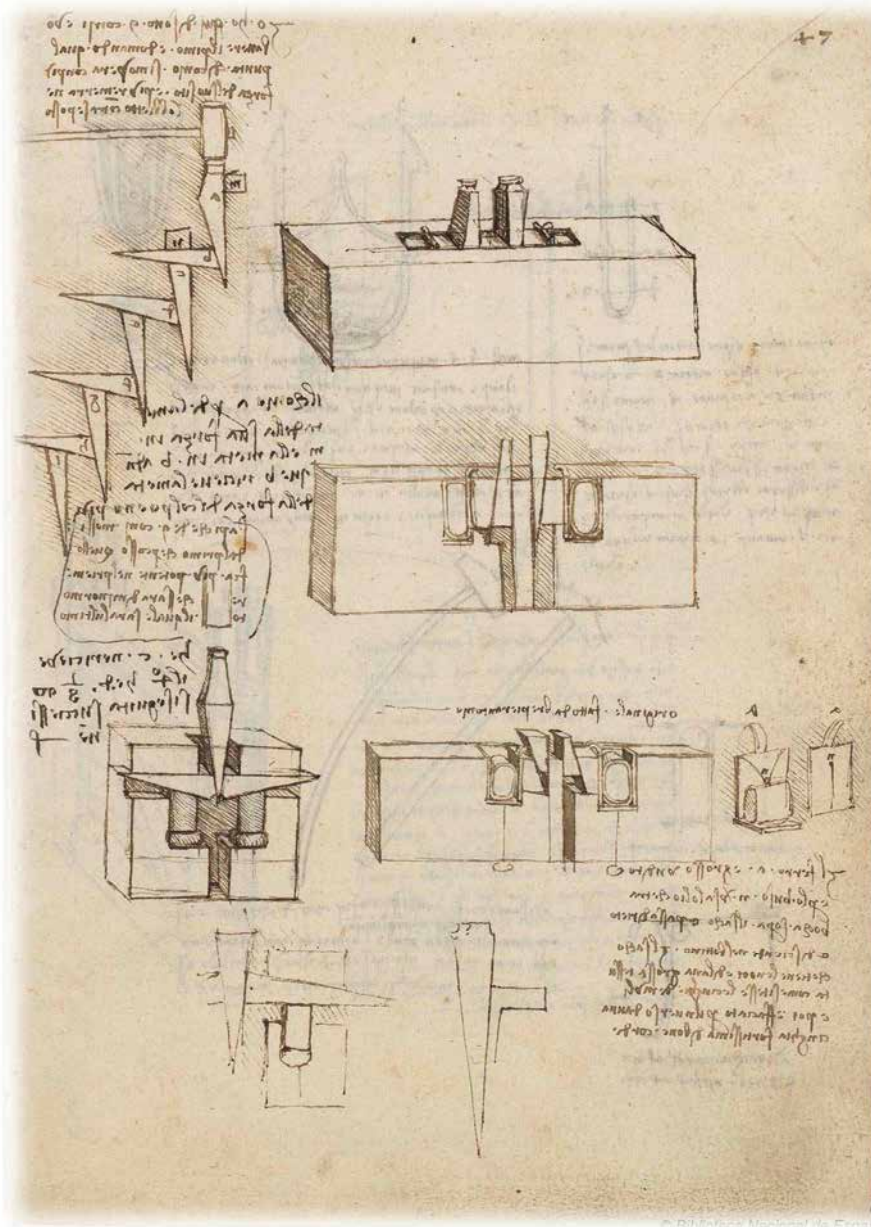


Figura 5.98: Estudio de la cuña.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0047r

5.3.6.2.2. Puntas de lanzas y flechas (CA_0144r).

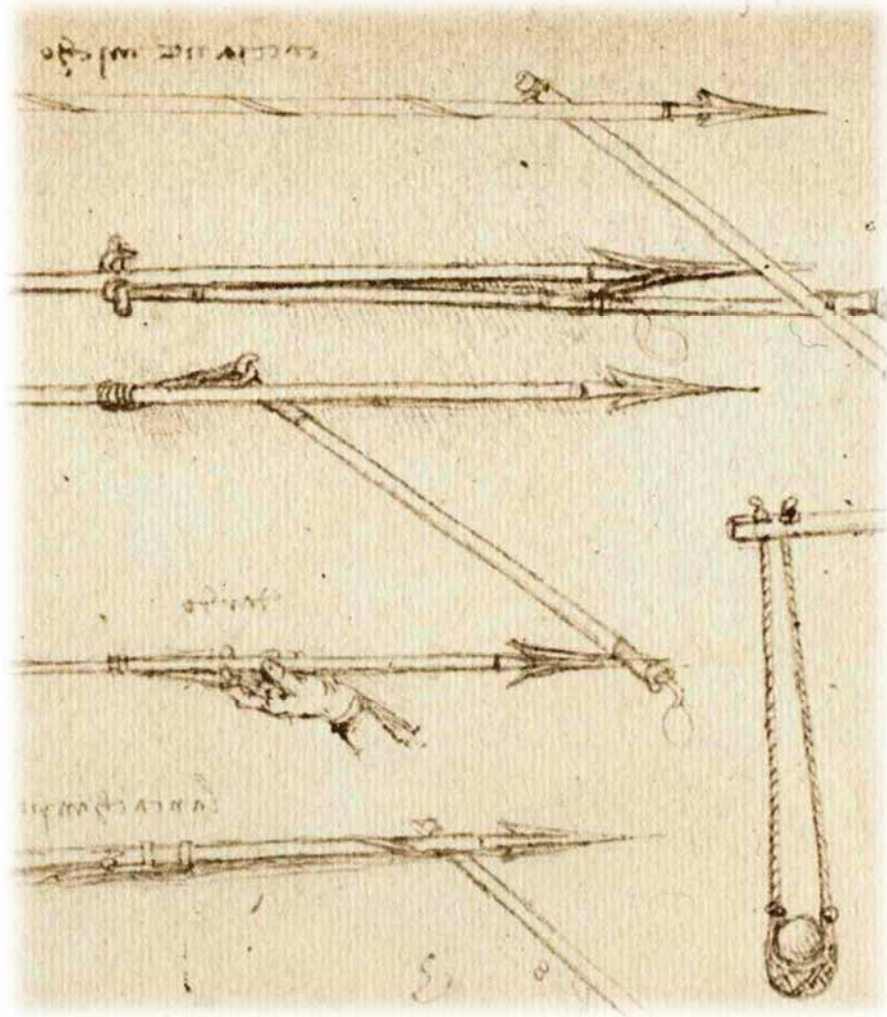


Figura 5.99: Puntas de lanzas y flechas.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 144r (detalle)

5.3.6.3. La rampa: descripción y utilidad.

Descripción:

La rampa es una superficie plana que forma un ángulo agudo con la horizontal.

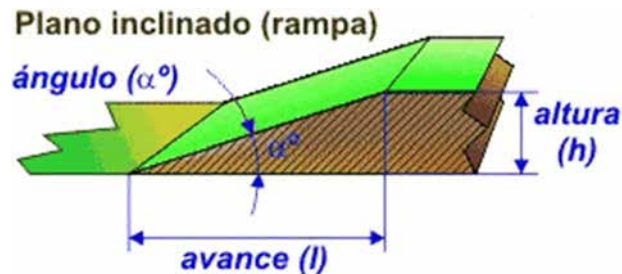


Figura 5.100: Descripción de una rampa.
(Fuente: © CEJAROSU)

La **rampa** viene definida por su **inclinación**, que puede expresarse por el *ángulo que forma con la horizontal* o en *porcentaje* (relación entre la altura alcanzada respecto a lo que avanza horizontalmente, multiplicado por 100). Este último es el que se emplea usualmente para indicar la inclinación de las carreteras.

$$\text{Inclinación} \quad i = \frac{\text{altura}}{\text{avance}} \cdot 100 = \frac{h}{l} \cdot 100$$

EC 1.1: Estudio de las fuerzas que ejerce una cuña.
(Fuente: © CEJAROSU)

Un poco de historia:

Aunque el *plano inclinado* es un operador presente en la naturaleza (en forma de **rampa** o **cuesta**) y que ya había sido fabricado en forma de cuña (puntas de flecha y lanza, hachas...) por parte de las culturas prehistóricas, se supone que no empezaron a construirse *rampas* conscientemente hasta el nacimiento de las culturas megalíticas (4000 a.C.) y la consiguiente necesidad de desplazar y emplear grandes bloques de piedra.

Con la aparición de los carros empezaron a construirse caminos que tenían que salvar grandes accidentes geográficos (sobre el 3000 a.C.).

Hacia el 2800 a.C., en Mesopotamia, empieza a emplearse en forma de *escalera* de obra (adaptación de la rampa a la fisonomía del ser humano) en las viviendas y construcciones sociales.

Después los romanos generalizaron su uso para el trazado de calzadas y la conducción de agua a las ciudades (acueductos).

Utilidad:

La rampa es un plano inclinado cuya utilidad se centra en dos aspectos: reducir el esfuerzo necesario para elevar un peso y dirigir el descenso de objetos o líquidos.

Reducción del esfuerzo:

La rampa permite elevar objetos pesados de forma más sencilla que haciéndolo verticalmente. El recorrido es mayor (pues el tablero de la rampa siempre es más largo que la altura a salvar), pero el esfuerzo es menor.

Podemos encontrar rampas con esta utilidad en carreteras, vías de tren, rampas para acceso a garajes, escaleras, acceso de minusválidos, puertos pesqueros, piscinas...

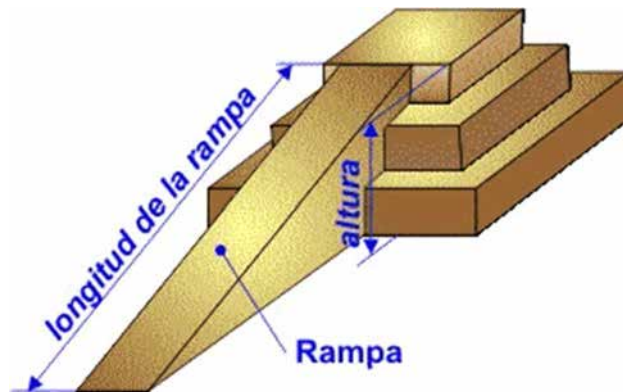


Figura 5.101: Rampa de acceso para reducir esfuerzos.
(Fuente: © CEJAROSU)

Dirigir el descenso de objetos o líquidos:

Cuando se quiere canalizar el movimiento descendente de un objeto también se recurre a la rampa, pues añadiéndole unas simples guías (o empleando tubos inclinados) se puede conseguir que el camino seguido sea el que nosotros queremos, evitando desviaciones no deseadas.

Con esta utilidad se emplea en tejados, canalones, toboganes, acueductos, boleras, parques acuáticos, máquinas expendedoras, teléfonos públicos (guía para las monedas)...

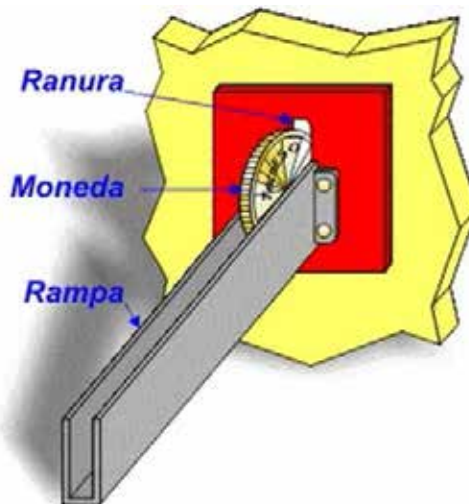


Figura 5.102: Rampa como guía.
(Fuente: © CEJAROSU)

5.3.6.4. La rampa en los manuscritos de Leonardo.

Como aplicación práctica del principio de funcionamiento de una rampa, Leonardo dejó testimonio del mismo con numerosos diseños de escaleras como el que vemos en destalle en el folio 45 ar del Códice Atlántico.

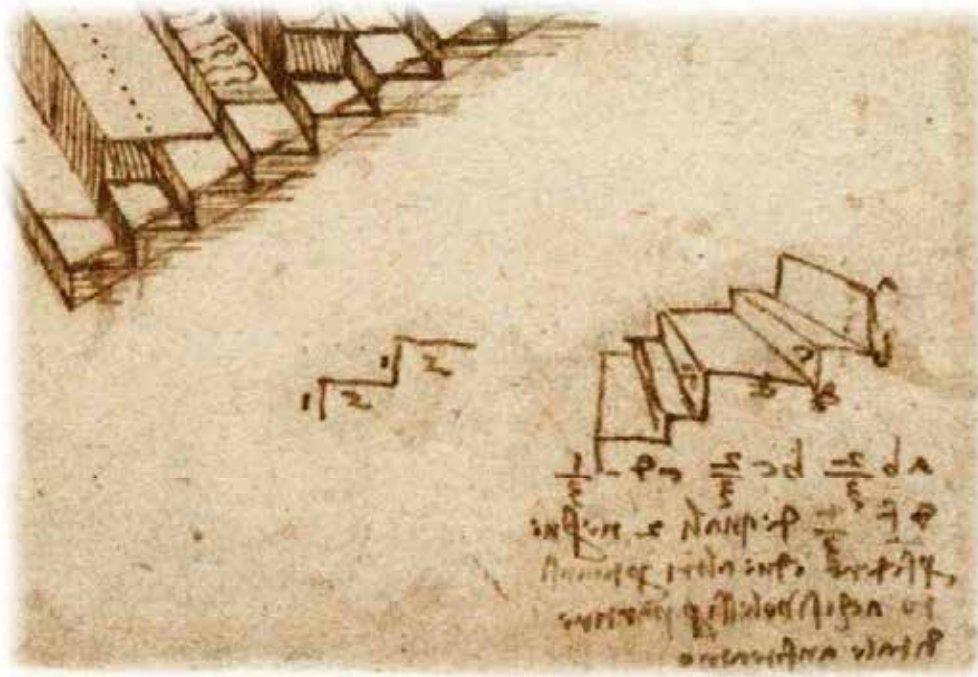


Figura 5.103: Escaleras.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0045ar (detalle)

5.3.6.5. El trinquete: descripción y utilidad.

Descripción:

Es un mecanismo que deriva de la rueda dentada, pero no tiene sus mismas funciones. Básicamente está formado por una rueda dentada y una uñeta que puede estar accionada por su propio peso o por un mecanismo de resorte.

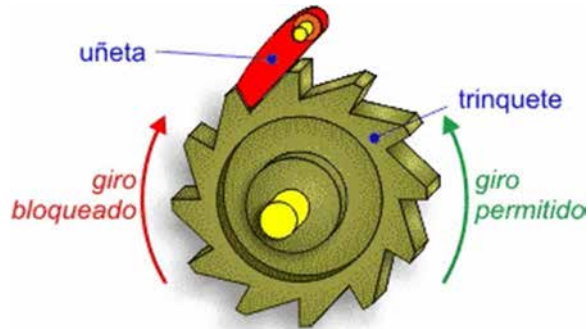


Figura 5.104: Trinquete.

(Fuente: © CEJAROSU)

La **rueda dentada** posee unos **dientes inclinados** especialmente diseñados (denominados *dientes de trinquete*) para *desplazar a la uñeta durante el giro permitido y engranarse con ella cuando intenta girar en el sentido no permitido*.

La **uñeta** hace de freno, impidiendo el giro de la rueda dentada en el sentido *no permitido*.

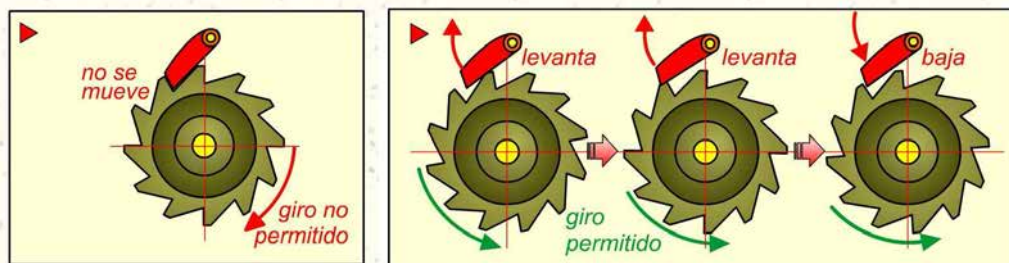


Figura 5.105: Uñeta actuando de freno en el trinquete.

(Fuente: © CEJAROSU)

Existen diferentes tipos de trinquetes:

De **retención**, cuando solamente se limita a permitir o no el movimiento del eje o árbol en un sentido.

De **accionamiento**, cuando otro mecanismo (generalmente una biela o un émbolo) dotado de un movimiento de vaivén empuja a la rueda dentada en el sentido de giro permitido, mientras la uñeta lo impide en el contrario.

Irreversible, cuando permite o retiene el movimiento siempre en el mismo sentido de giro.

Reversible, cuando puede permitir o retener el movimiento en ambos sentidos, gracias a un sistema de uñetas reversibles (y a un diseño de los dientes adecuado).

El tipo más empleado es el de **retención irreversible**.

Utilidad:

Este operador tiene dos utilidades prácticas: *convertir un movimiento lineal u oscilante en intermitente y limitar el giro de un eje o árbol a un solo sentido.*

Como convertidor de movimiento alternativo en discontinuo se encuentra en las ruedas de dientes curvos, gatos de elevación de coches, relojes, mecanismos de tracción manual...



Figura 5.106: Gato de trinquete. Transforma el movimiento oscilante en lineal discontinuo.
(Fuente: © CEJAROSU)

Como limitador del sentido de giro se emplea en frenos de mano de automóviles, rueda trasera de las bicicletas, cabrestantes de barcos, mecanismos de relojería, llaves fijas, destornilladores...

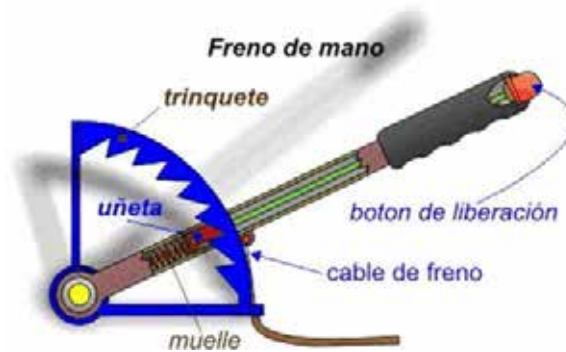


Figura 5.107: Freno de mano. Trinquete como limitador del sentido de giro.
(Fuente: © CEJAROSU)

5.3.6.6. El trinquete en los manuscritos de Leonardo.

Leonardo emplea a menudo una rueda de trinquete –también llamada por él "siervo" (*servitore*)- como dispositivo de seguridad para ruedas dentadas, especialmente cuando éstas se utilizan para levantar cargas pesadas.

5.3.6.6.1. Trinquete con uñeta o gatillo inclinado (CM1_0097r).

Los dientes del trinquete tienen un perfil en ángulo recto. El gatillo, colocado con una cierta inclinación, permite que la rueda gire libremente en sentido antihorario, pero al mismo tiempo le impide girar en sentido horario.

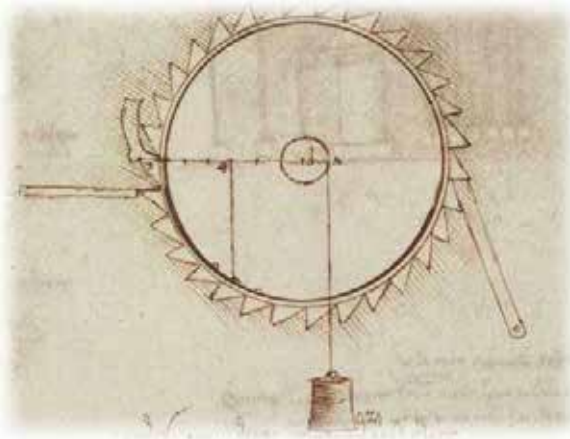


Figura 5.108: Trinquete con uñeta inclinada.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0097r (detalle)

5.3.6.6.2. Trinquete con uñeta vertical (CM1_0116v).

Esta versión presenta algunos cambios importantes con respecto al dispositivo anterior: la rueda consta de dientes de sierra asimétricos pero ya no forman un ángulo recto; el gatillo se coloca en una posición vertical y presiona contra los dientes mediante la acción de un muelle; Por otra parte, el gatillo engrana con tres dientes en lugar de uno, mejorando la seguridad del mecanismo.

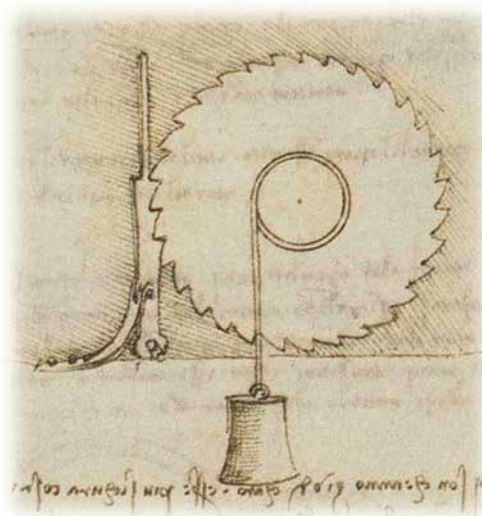


Figura 5.109: Trinquete con uñeta vertical.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0116v (detalle)

5.3.6.6.3. Trinquete con ñeta o gatillo horizontal (CM1_0117r).

Leonardo se refiere a este modelo como el mejor de todos: Los gatillos se colocan generalmente a lo largo de una línea horizontal (respecto a los dientes de la rueda), con el fin de tener su peso siempre operando hacia el punto sobre el que se inclinan.

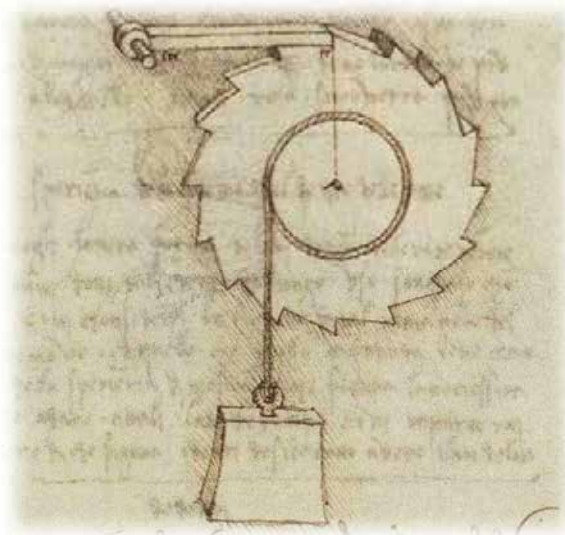


Figura 5.110: Trinquete con ñeta horizontal.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0117r (detalle)

5.3.6.7. Articulaciones, ejes, apoyos y rodamientos en los manuscritos de Leonardo.

Leonardo describió y analizó minuciosamente muchos sistemas que soportaban ejes y cigüeñales en movimiento. Dichos sistemas fueron concebidos para intentar en la medida de lo posible disminuir el rozamiento. Por este motivo Leonardo trató de clasificar los distintos tipos de rozamiento (tangencial, rotativo, etc.), para cuantificar su impacto y diseñar sistemas más complejos que consiguieran minimizar o eliminar el rozamiento entre ellos.

5.3.6.7.1. Varios tipos de articulaciones (CM1_0100v).

Los distintos tipos de articulación mecánica son fundamentales en la construcción de robots y mecanismos autónomos. En el Códice Madrid I aparecen de varios tipos. Su concepto se basa en el uso del perno/eje: cada perno tiene un grado de libertad de rotación. Innovadora y sorprendente es la articulación esférica que imita la articulación de los huesos humanos con una amplia libertad de movimiento.

- 1.- Articulación anidada. Cada eje rota de forma independiente.
- 2.- Articulación universal. Permite que el eje se mueva en cualquier dirección.
- 3.- Articulación con dos movimientos diferentes.
- 4.- Articulación con múltiples movimientos.
- 5.- Articulación con dos ejes transversales con dos movimientos rotatorios

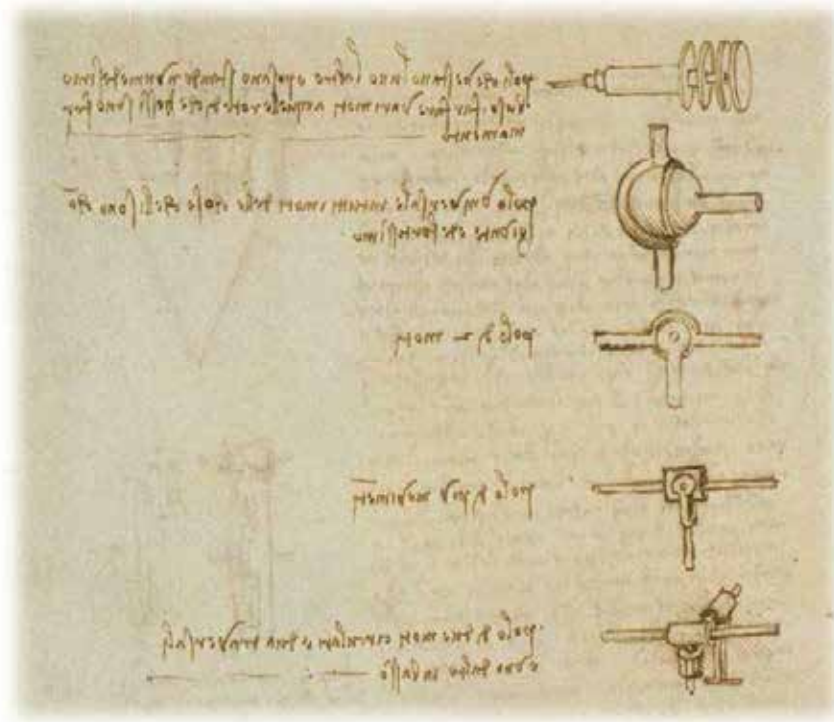


Figura 5.111: Varios tipos de articulaciones.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0100v

5.3.6.7.2. El desgaste de los ejes y apoyos.

El concepto de eje y rueda es el “centro” de todos los engranajes. El eje apoyado o enfilado en una cavidad circular consigue girar mientras mantiene su posición. Leonardo estudió los efectos de su uso según los materiales empleados.

5.3.6.7.2.1. Líneas de desgaste (CM1_0132v).

Leonardo afirma que *"cada rueda desgastará a su apoyo a lo largo de una línea oblicua"*.



Figura 5.112: Línea de desgaste.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0132v (detalle)

5.3.6.7.2.2. Desgaste del eje (CM1_0119r).

En el dibujo se puede observar “como se va deteriorando el eje justo en su mitad como una línea curva”

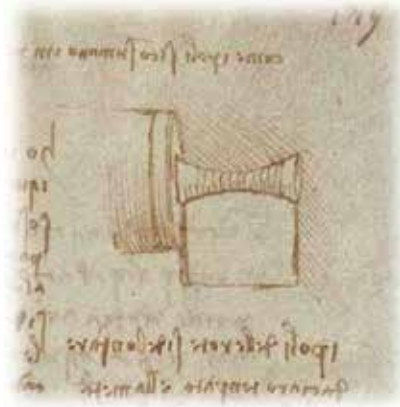


Figura 5.113: Desgaste del eje.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0119r (detalle)

5.3.6.7.2.3. Desgaste del apoyo (CM1_0118r).

El dibujo muestra “como el agujero se ha desgastado por la acción del eje que gira en su interior”.



Figura 5.114: Desgaste del apoyo.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0118r (detalle)

5.3.6.7.3. Sistema para reducir el rozamiento en los ejes de rotación.

5.3.6.7.3.1. Lubricación (CM1_0118r).

Dispositivo de lubricación automática para ejes de hierro de rotación vertical: el aceite se libera por la pequeña taza (figura de la derecha). Leonardo tenía algunas dudas sobre la eficacia de esta solución: "el rozamiento de los ejes produce limaduras de hierro, que mezcladas con el aceite y el polvo, rellenan rápidamente estos agujeros."

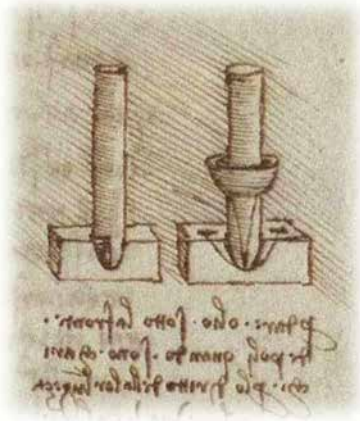


Figura 5.115: Lubricación automática para ejes.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0118r (detalle)

5.3.6.7.3.2. Rodamientos ajustables (CM1_0100v).

“Si desearas hacer un eje que gire siempre encerrado y que nunca salte por arriba a pesar del esfuerzo al que se le someta, debes hacer su cavidad o madre, de metal de espejos, esto es 3 partes de cobre y 7 de estaño fundidos juntos. Harás esa madre de dos piezas, como se ve en m n, que rodean al eje f. Estas piezas sujetarán con una cuña de hierro y todo lo restante también se hará de hierro. La mitad de la madre, la que está sobre el eje, puedes hacerla de plomo por la parte que toca al eje en un espesor de un dedo, y lo que queda, todo el mencionado metal. Y, a medida que se vaya desgastando, lo apretarás con la cuña. Se puede obtener el mismo resultado con un tornillo en vez de la cuña, como se ve aquí abajo.”

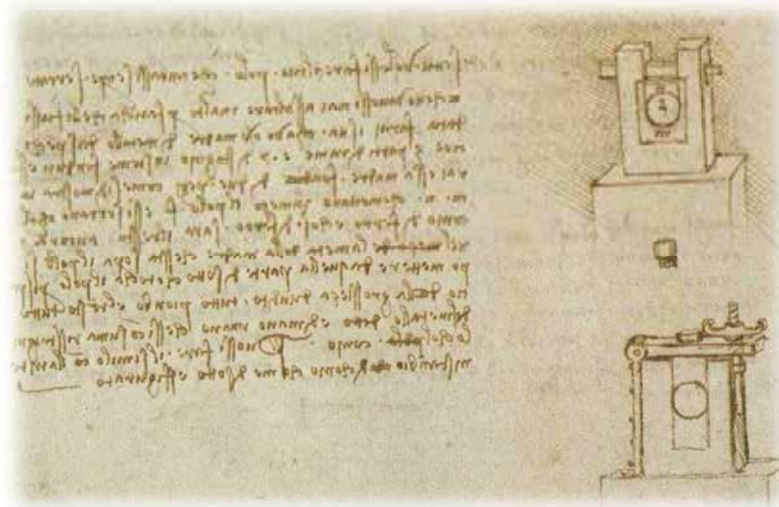


Figura 5.116: Rodamientos ajustables.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0100v (detalle)

5.3.6.7.3.3. Cojinetes de disco y rodillos para ejes horizontales (CM1_0012v).

En la siguiente figura Leonardo diseñó rodamientos con varios discos verticales para reducir la fricción en el eje de rotación horizontal. Leonardo dudaba de la eficacia de esta solución.

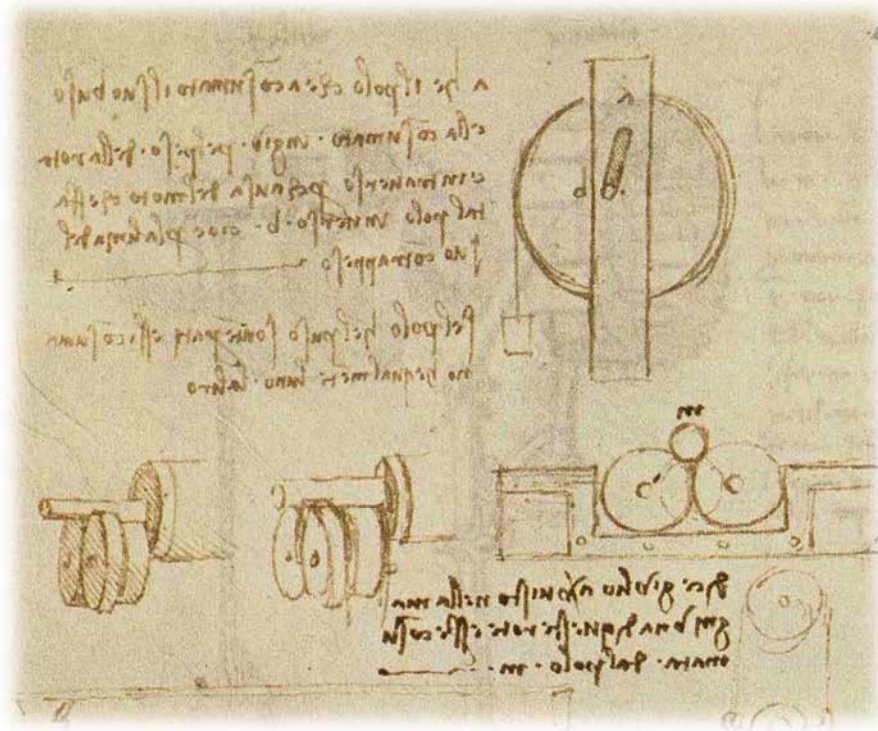


Figura 5.117: Cojinetes de disco y rodillo para ejes horizontales.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0012v (detalle)

Aquí, el eje horizontal descansa en un solo rodillo. Este sistema no ofrece resistencia frente al empuje.

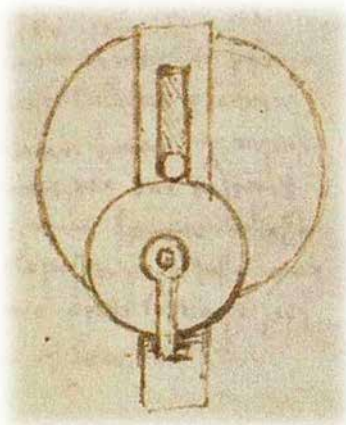


Figura 5.118: Eje horizontal descansando sobre un solo rodillo.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0012v (detalle)

En este caso el eje se apoya en tres discos o rodillos (uno bajo el eje, los otros dos en los lados). Leonardo lo describe como la mejor solución para un eje totalmente giratorio.

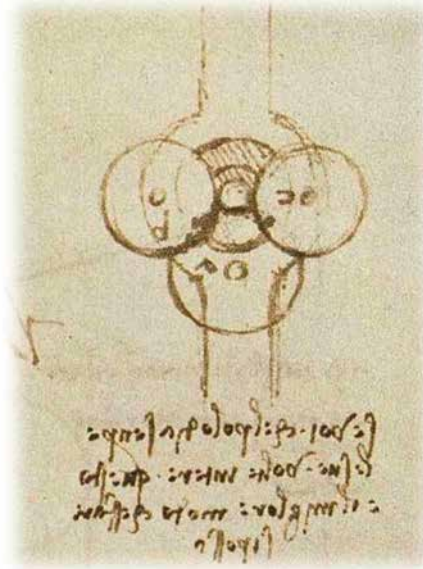


Figura 5.119: Eje apoyado en tres rodillos.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0012v (detalle)

En la siguiente figura se aprecia como tres secciones de discos soportan al eje. Para Leonardo, esta es la mejor solución para los ejes que no realizan rotaciones completas, tales como los ejes que hacen girar las campanas para que repiquen.

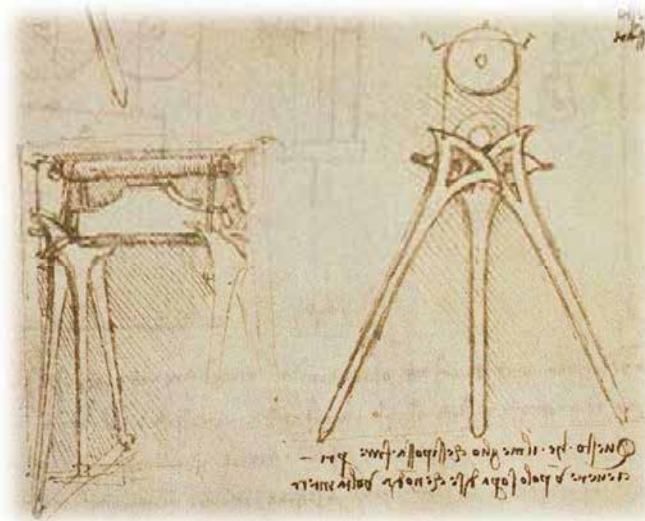


Figura 5.120: Eje apoyado en tres secciones de disco.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0012v (detalle)

5.3.6.7.3.4. Soporte de ejes giratorios verticales (CM1_0101v).

En el diseño de diversas máquinas, tales como las máquinas para elevar cargas por medio de husillos, Leonardo tuvo que hacer frente a un difícil problema: el de cómo resolver la sustentación del husillo vertical. Era necesario buscar un apoyo capaz de girar y, al mismo tiempo, absorber un empuje vertical. Leonardo resolvió brillantemente el problema, proponiendo un artilugio análogo a un rodamiento de bolas axial como soporte de la tuerca giratoria (IRIONDO, 1997).

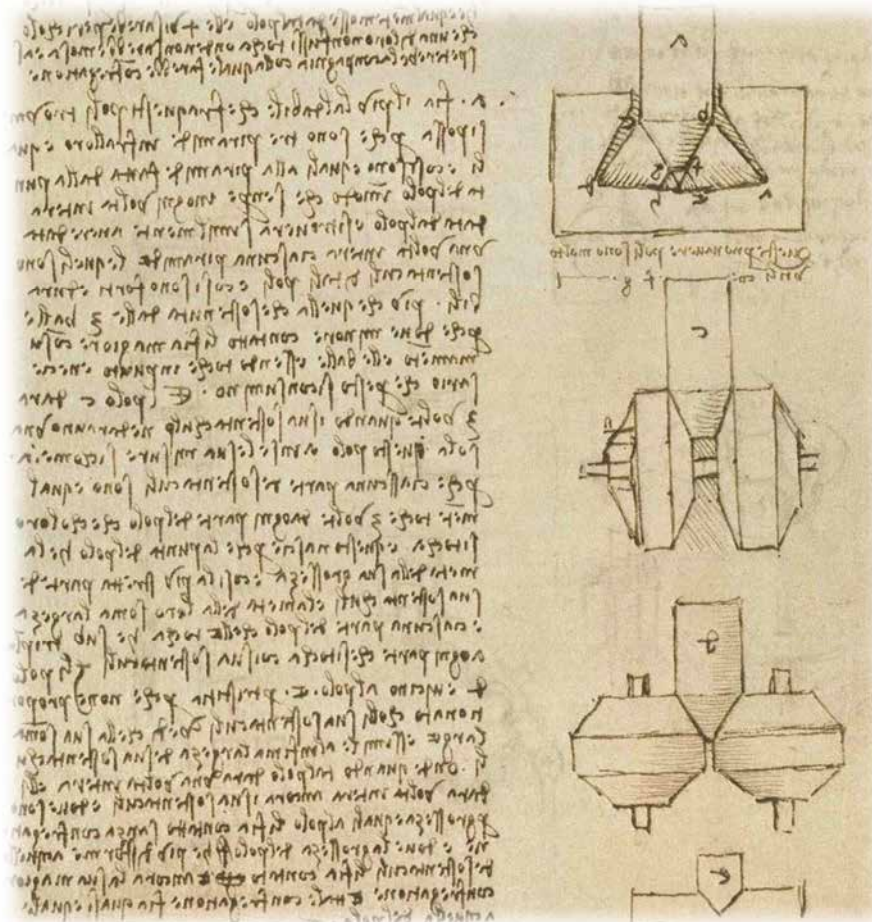


Figura 5.121: Rodamientos de rodillos móviles con forma de cono truncado. Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0101v (detalle)

Leonardo profundizó en las distintas posibles formas de soporte de ejes verticales giratorios y propuso las diferentes alternativas que pueden verse en las figuras adjuntas del Códice Madrid I. Él recomendaba, para los rodamientos axiales de bolas, el empleo exclusivo de tres bolas, porque siempre estarían en contacto con el eje y la pista, mientras que si se utilizaban cuatro, una de ellas podría perder el contacto. En sus propias palabras, “3 bolas son mejor que cuatro, porque si las bolas son 3, por fuerza serán tocadas y movidas igualmente por el gorrón. Si fueran 4, habría peligro de que una de ellas quedara sin ser tocada y, en consecuencia, no se movería y esperaría a la próxima, provocando rozamiento”. Además, propuso el empleo de pistas en forma de anillo que impidiesen el contacto de las bolas entre sí, para evitar los efectos perjudiciales del rozamiento entre éstas.

De todas maneras, según se observa en las otras figuras y en el texto que las acompaña, su diseño preferido para soporte de ejes giratorios verticales, era el que incorporaba tres conos rodadores. Éstos soportan el peso del eje, provisto de una cabeza cónica de la misma geometría y tamaño que ellos. Por cada revolución del eje cada cono de soporte gira también una vuelta

completa. “Y así resultarán fuertes y duraderos, más que los que son sostenidos por tres bolas, porque donde el contacto está más limitado, allí habrá más desgaste, y como las bolas tienen contacto en un solo punto, se desgastarán más pronto”.

El eje vertical de punta de cono gira entre tres esferas iguales incrustadas en el soporte, pero las esferas son libres de girar sobre sí mismas. Leonardo ofrece vistas de la sección transversal, lateral, y generales del dispositivo.

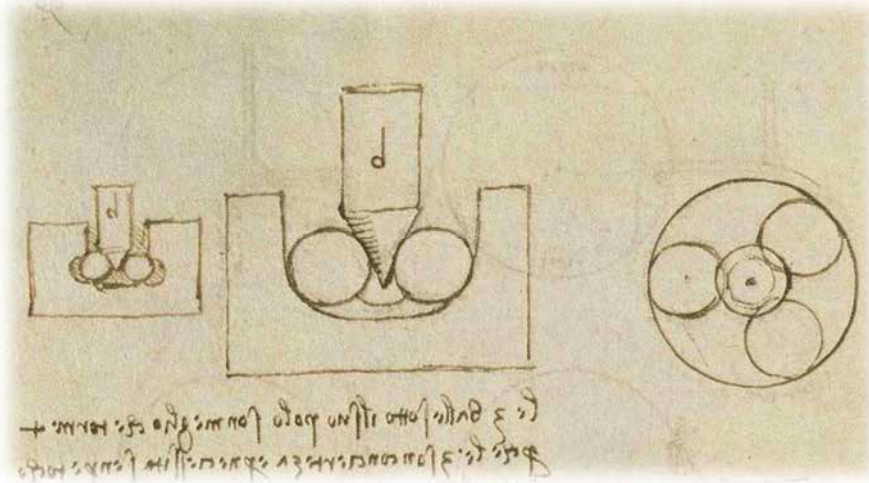


Figura 5.122: Rodamiento de bolas para ejes verticales.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0101v (detalle)

5.3.6.7.3.5. Rodamiento de bolas (CM1_0020V).

Uno de los casos en los que se comprueba mejor la capacidad de anticipación de Leonardo es el de la figura adjunta, en la que se representa un rodamiento de bolas (IRIONDO 1997). Este es un elemento mecánico muy popular, que se utiliza como medio de apoyo de ejes giratorios a fin de conseguir unas buenas características de giro con poco rozamiento. La invención de este elemento se sitúa habitualmente a principios de la Revolución Industrial, es decir a fines del siglo XVIII; sin embargo, aunque no tiene exactamente la forma habitual de estos elementos, Leonardo ya había desarrollado una forma viable de esta idea, algunos siglos antes.

En el folio 20 (verso) del Códice Madrid I, junto a la figura aparece el siguiente comentario: “*a b c d e f g h* son bolas de madera, en vez de rollizos, para mover un peso. *i k l m n o p q* son ruedas provistas de eje, que mantienen a esas bolas en orden, De esta manera las bolas dan vueltas y no pueden escaparse”. Por tanto está clara la intencionalidad de Leonardo en la utilización de bolas.

Es interesante señalar que el correcto funcionamiento de un sistema de estas características exige que no exista contacto entre las bolas de rodamiento. Eso se consigue hoy día mediante un aro separador que aísla unas bolas de otras; en el diseño de Leonardo, sin embargo, cada bola va encajada entre “ruedas provistas de ejes, que mantienen a esas bolas en orden”. Evidentemente conocía el problema, aunque este tipo de solución no es el adecuado, desde el punto de vista mecánico, sobre todo si se piensa en aplicaciones en máquinas que trabajen a gran velocidad y transmitiendo grandes esfuerzos; sin embargo, es fácil pensar que Leonardo hubiera acabado por idear algún tipo de separador si hubiera tenido ocasión de utilizar suficientemente este invento.

Parece curioso que Leonardo ideara un sistema como el rodamiento de bolas, cuando existen otros como los de rodillos cuyo funcionamiento y fabricación es más sencilla, sobre

todo si se tienen en cuenta los medios disponibles en su época. Fabricar una bola con un grado de precisión alto, como se requiere para el funcionamiento eficaz de un rodamiento, siempre es mucho más difícil que la construcción de rodillos de diámetro preciso, en los que además, la precisión de las dimensiones axiales es menos importante. Puede suceder que Leonardo también pensara en este otro sistema, pero que sus planos no se conservaran en la actualidad. O también puede ser, que decidiera pensar en el sistema de bolas después de haber descartado el de rodillos. En efecto, el sistema de bolas puede resistir esfuerzos en dirección radial pero también soporta una cierta componente axial, cosa que los de rodillo hacen con menor eficacia. Por otra parte hay que recordar que sistemas a base de bolas ya habían sido utilizados con anterioridad, por ejemplo, por los romanos en primer siglo de nuestra era, para hacer girar sin resistencia plataformas que soportaban grandes pesos.

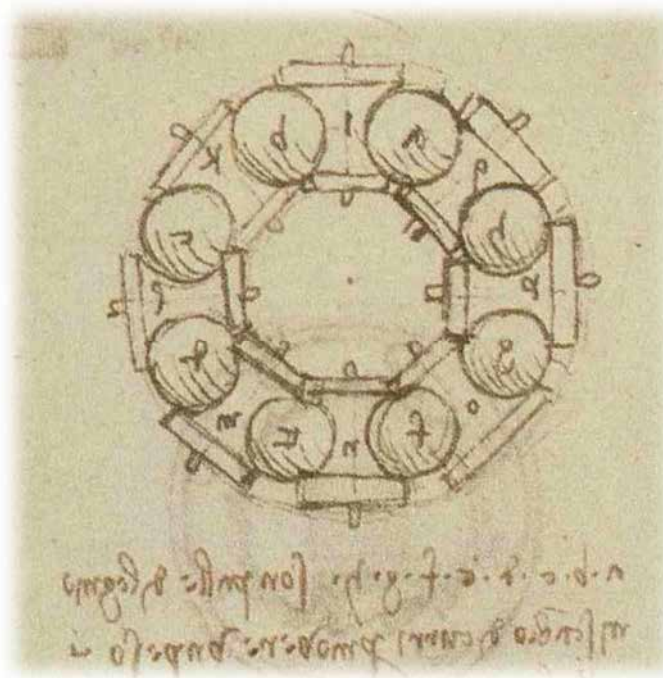


Figura 5.123: Rodamiento de bolas.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0020v (detalle)

Esta lámina se encuadra además dentro de la línea de pensamiento que mantuvo Leonardo sobre el rozamiento y su naturaleza, así como sobre los medios para reducirlo. De hecho, éste es un tema con el que se ha enfrentado desde siempre el diseñador de máquinas e ingenios de la más diversa índole para la reducción de las resistencias pasivas. Leonardo ya observó que el rozamiento depende de la naturaleza de las superficies de contacto, siendo en general menor cuanto más lisas son (efecto de la rugosidad superficial), que no depende del área de las superficies en contacto y que es directamente proporcional a la carga en dirección normal a ellas. También estudió la forma de reducirlo, mediante la interposición de bolas o de lubricantes en las superficies. Estas interpretaciones tienen mucho en común con la que realizó Coulomb trescientos años más tarde, y que sin ser del todo exactas, sin embargo, sí son aproximadas y útiles para muchas aplicaciones prácticas, incluso en nuestros días.

5.3.6.7.4. Gato de tornillo con rodamiento antifricción.

Los dibujos ilustran una solución para reducir el rozamiento entre la plataforma fija y el disco dentado giratorio. Leonardo ofrece bocetos de detalle en la parte superior y sección transversal del rodamiento donde se pueden apreciar las esferas y los rodillos cilíndricos.

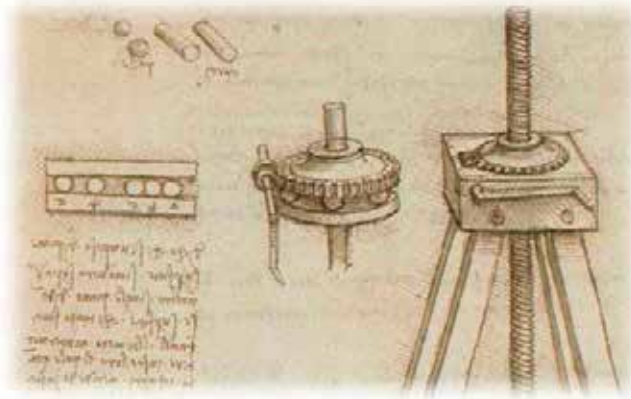


Figura 5.124: Gato de tornillo con rodamiento antifricción
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0026r (detalle)

5.3.6.8. Juntas y bisagras en los manuscritos de Leonardo.

Las juntas sirven para unir mecánicamente dos extremos. Leonardo diseñó muchos tipos y sugirió formas variadas y algunas técnicas de tratamiento con cera y aceite para realizar una junta perfecta en madera que una vez encajada no se pueda sacar nunca jamás. Las formas en V sirven para dilatar o estrechar la junta.

Los manuscritos de Leonardo contienen dibujos detallados de uniones de trabajo y bisagras de diferentes tipos y usos múltiples.

5.3.6.8.1. Juntas tipo cuña (CM1_0062r).

"Este es un método para insertar una pieza de madera a otro, y usted nunca será capaz de tirar de su cavidad. Podría ser utilizado para las patas de un banco."

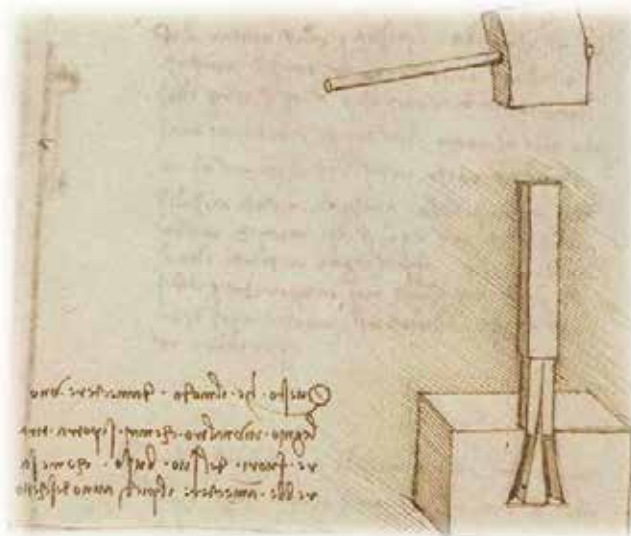


Figura 5.125: Juntas tipo cuña.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0062r (detalle)

5.3.6.8.2. Juntas rotativas (CM1_0062r).

Leonardo propone las dos juntas en la parte superior como soluciones apropiadas para mover los dos brazos de un compás (ambos dibujos) y para mover ejes de carruajes (arriba a la derecha de dibujo solamente). El dibujo inferior muestra una articulación que es "incapaz de girar sobre sí misma ya que el macho y su hembra correspondiente son cuadrados".

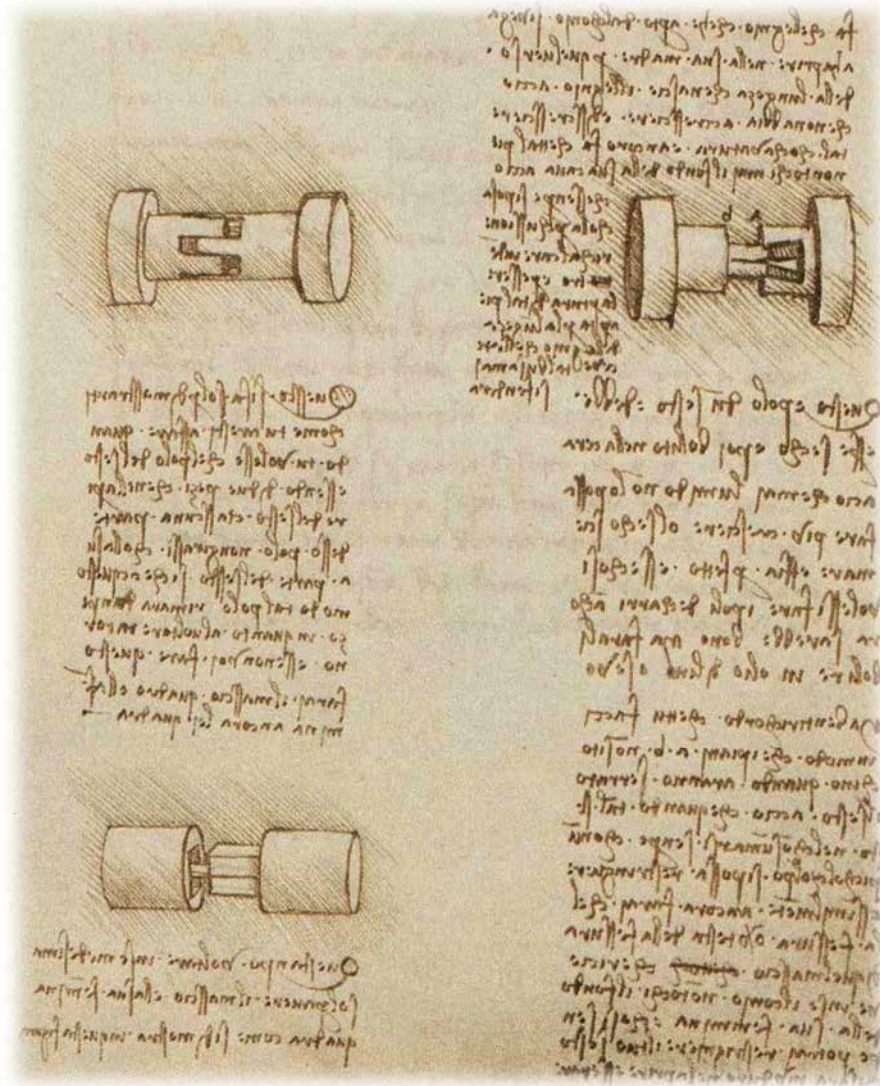


Figura 5.126: Juntas rotativas.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0062r (detalle)

5.3.6.8.3. Uniones semiarticuladas (CM1_0172r).

Este tipo de junta no puede doblarse más allá de la horizontal. Leonardo destaca su uso en ángulo de bisagras para mesas portátiles y pabellones de madera de pantalla desmontables.

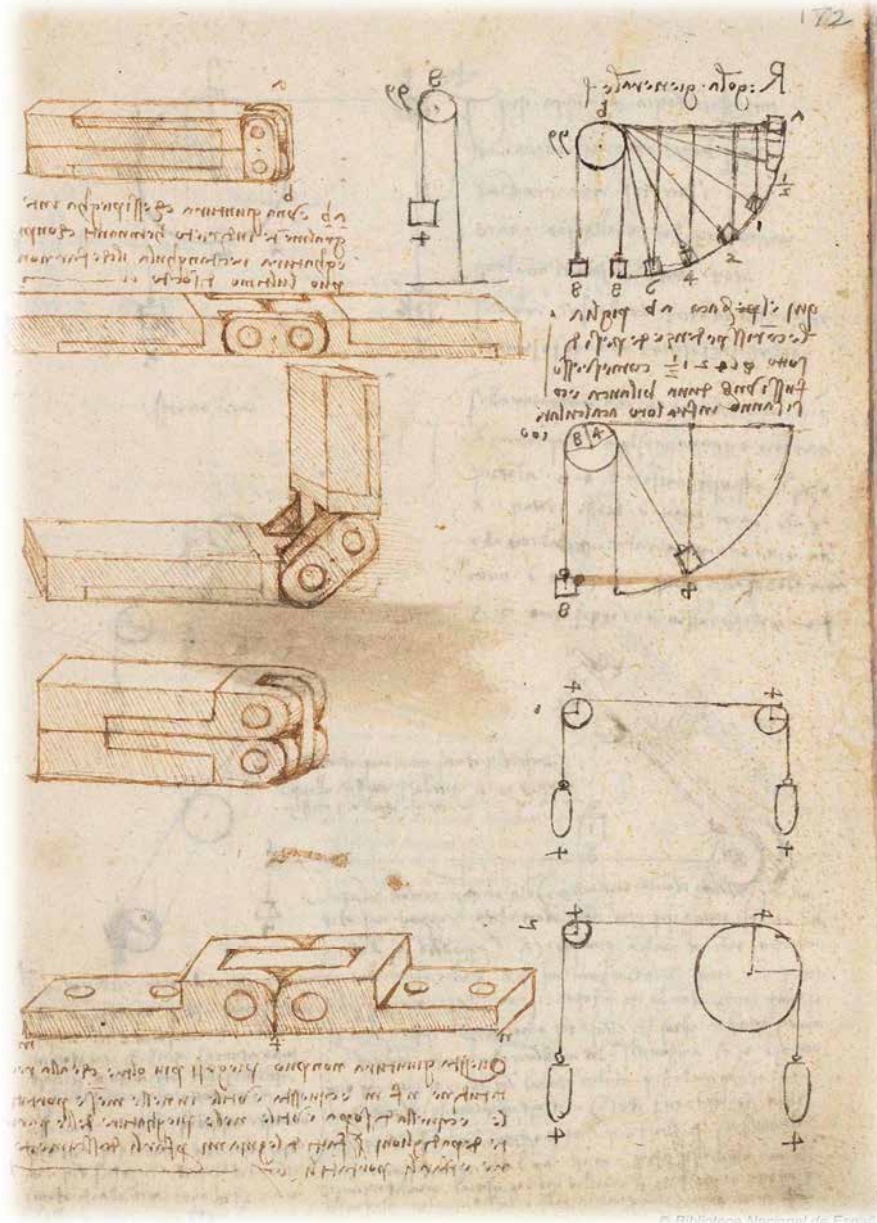


Figura 5.127: Uniones semiarticuladas.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0172r

5.3.6.8.4. Bisagras para puertas (CM1_0096v).

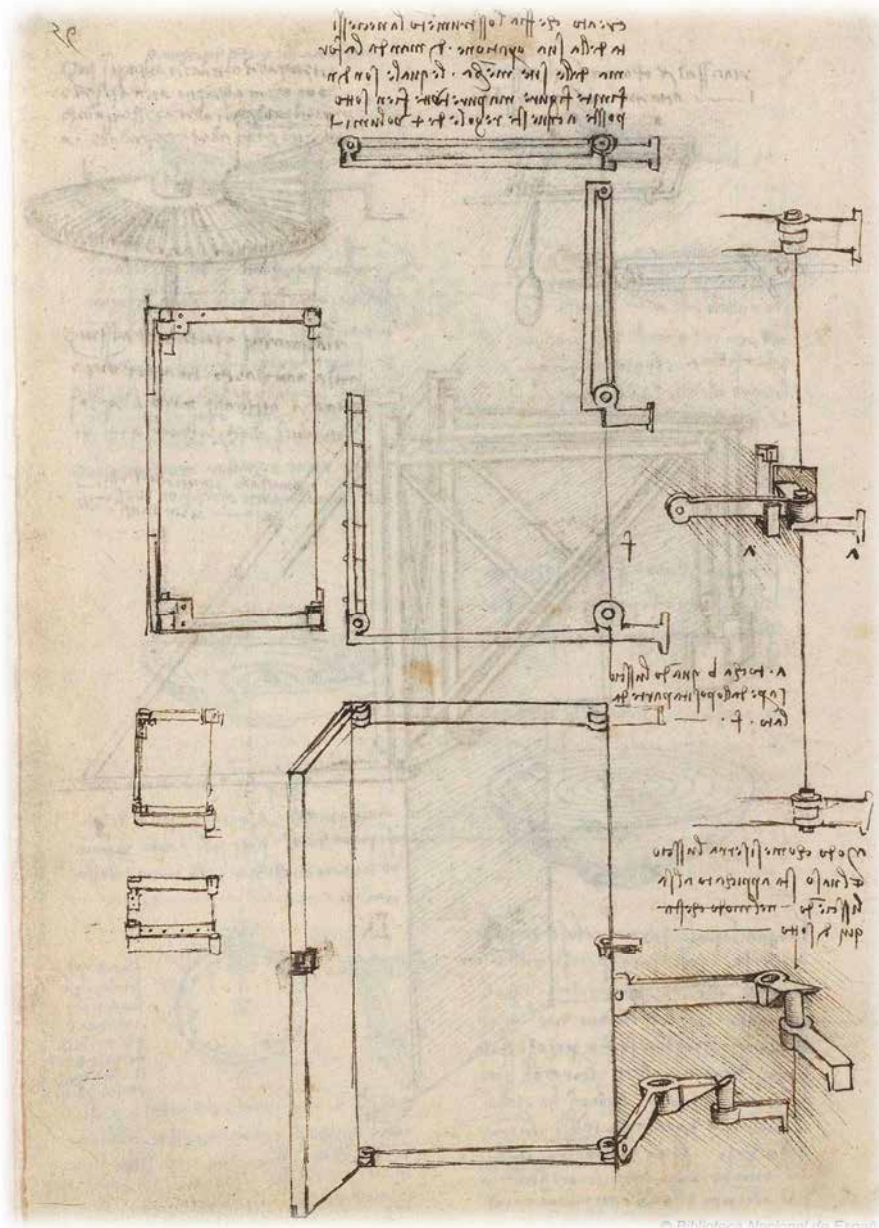


Figura 5.128: Bisagras para puertas.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0096v

5.3.6.8.5. Bisagras para armazones desmontables (CA_0095r).

Armazones desmontables formados por listones de madera, con instrucciones para su montaje. Leonardo muestra muchos detalles de las bisagras de hierro.

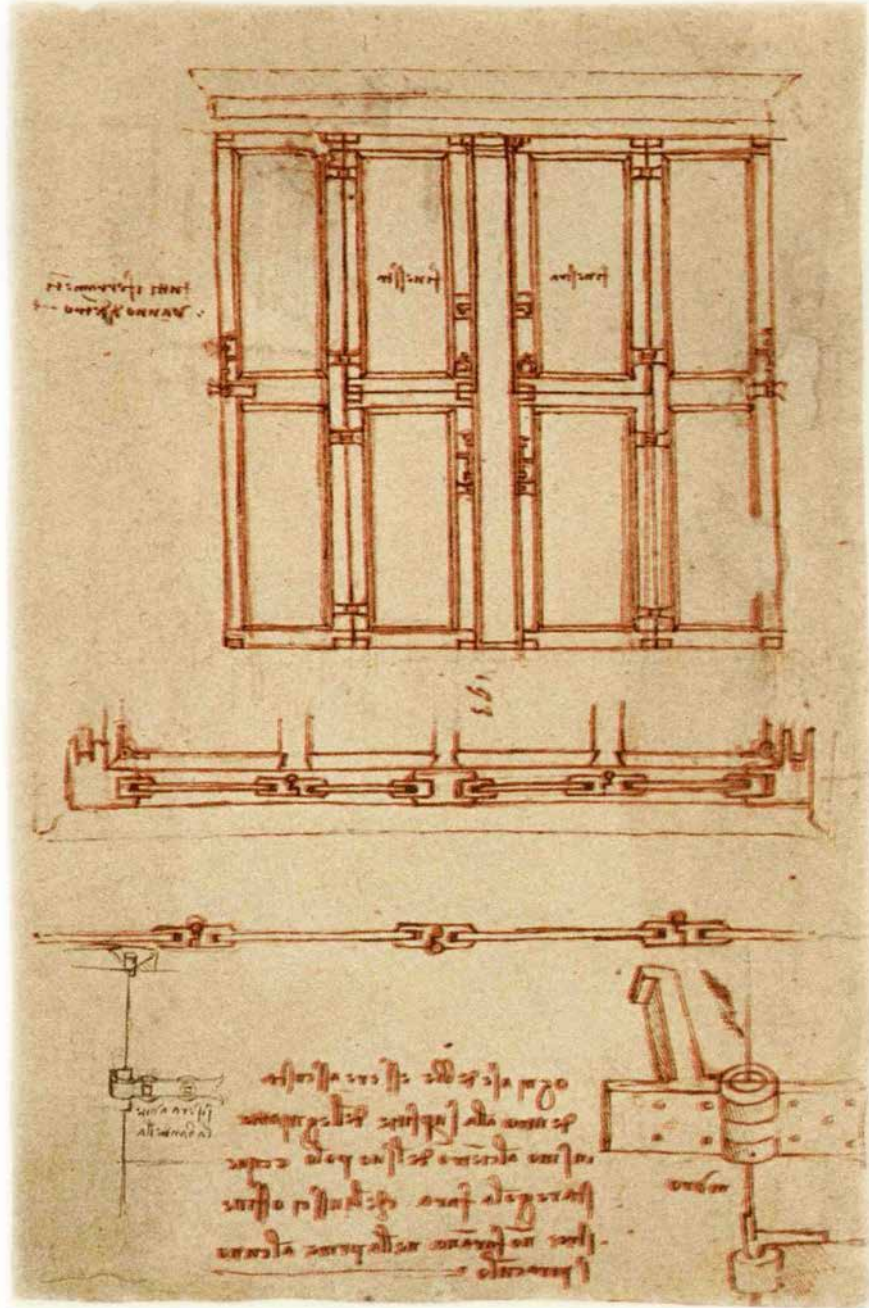


Figura 5.129: Bisagras para armazones desmontables.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0095r

5.3.6.9. Tubos de madera modulares en los manuscritos de Leonardo (CM1_0025v).

Leonardo diseñó tubos madera modular, principalmente para su usarlos como tuberías de agua.

Además de los tubos, Leonardo muestra la máquina para la perforación de los troncos de los árboles y la fabricación de los tubos (izquierda). El dispositivo es alimentado por una rueda hidráulica horizontal. También da una vista lateral y la sección transversal de las bisagras que sujetan los módulos de forma segura entre sí.

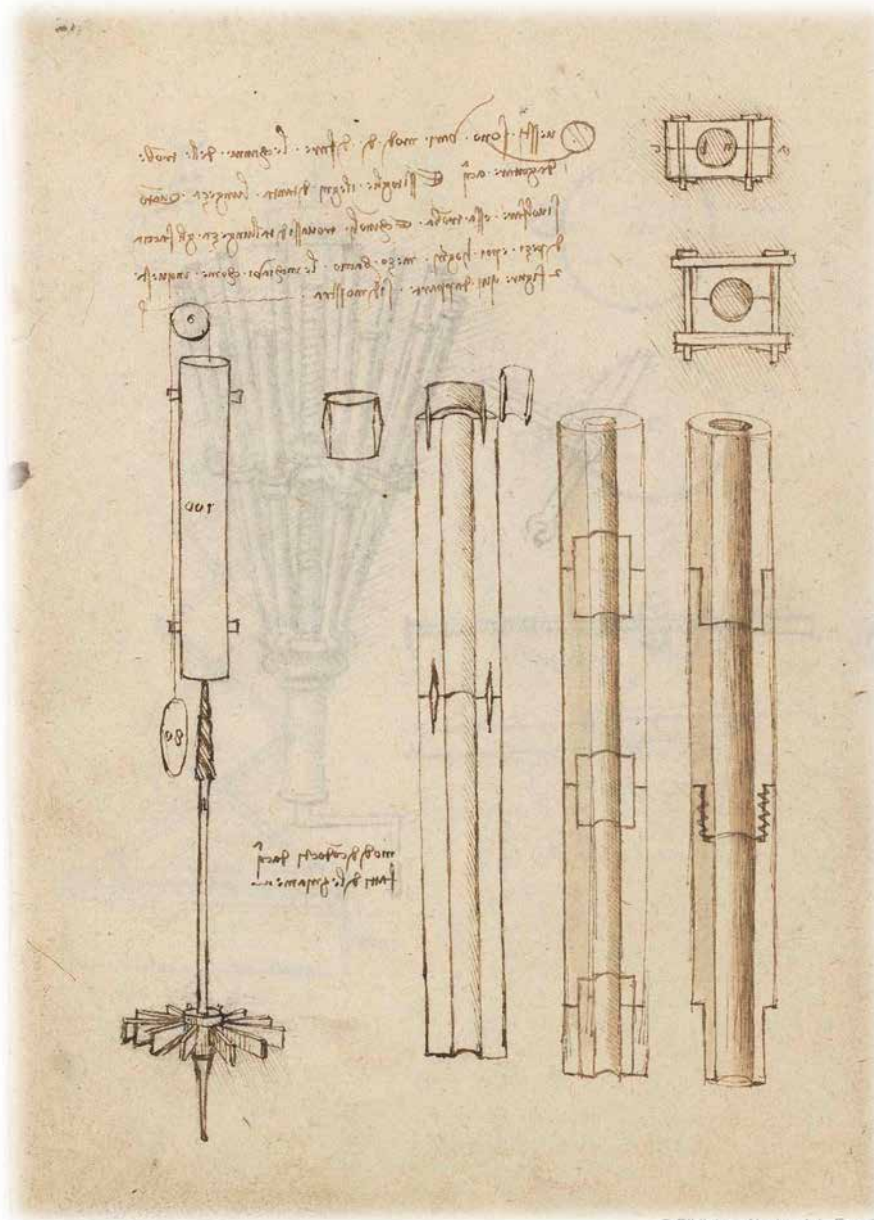


Figura 5.130: Bisagras para puertas.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0025v

5.3.6.10. Ganchos automáticos en los manuscritos de Leonardo.

Leonardo desarrolló varios tipos de ganchos automáticos, principalmente para facilitar la subida y bajada de cargas.

5.3.6.10.1. Dos ganchos automáticos con contrapesos (CM1_0009v).

"Método de bajar una carga que de inmediato se libera a sí misma cuando toque el suelo." Leonardo señala que el gancho de la derecha es superior porque no entra en contacto con la carga que se pretende elevar. Gracias al contrapeso, el gancho, por tanto, puede recuperarse cuando la carga toca el suelo, liberando el polipasto de la carga.

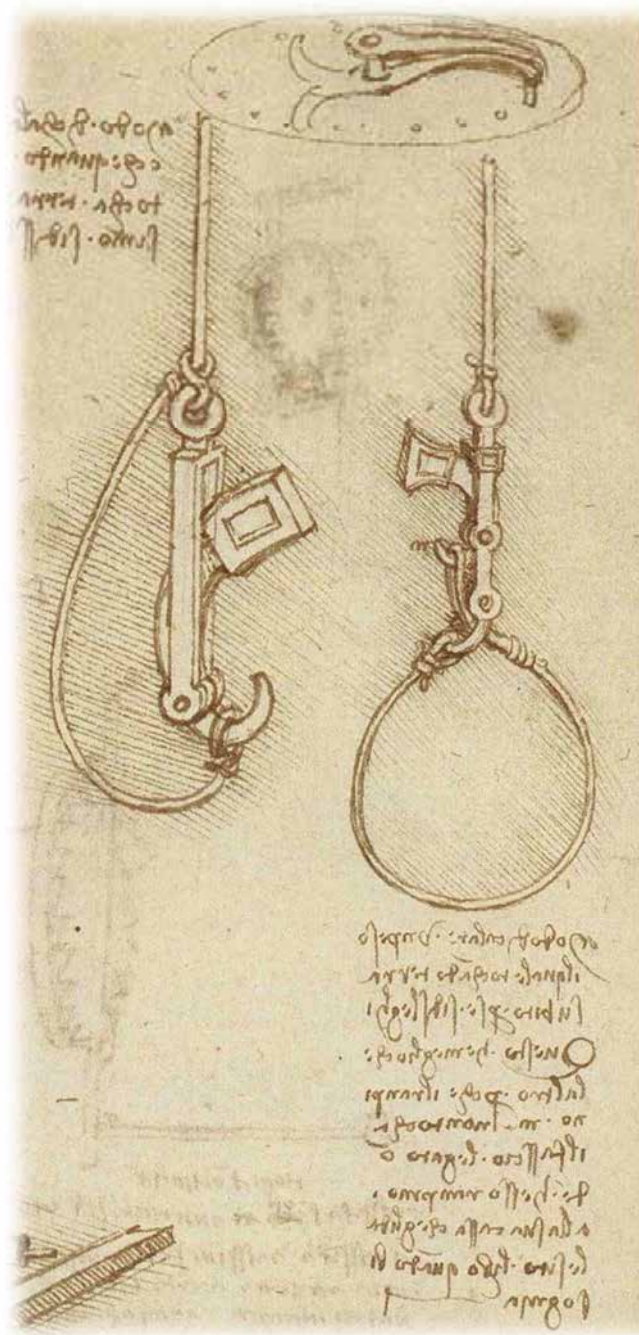


Figura 5.131: Ganchos automáticos con contrapesos.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0009v (detalle)

5.3.6.10.2. Pinzas de seguridad con liberación automática (CM1_0022r).

En todas las épocas el hombre se ha visto con la necesidad de manipular materiales y objetos pesados. Leonardo resolvió el problema utilizando técnicas destinadas a la simplificación y a la reducción del esfuerzo que tuvieran que realizar las personas.

Ideó numerosos mecanismos destinados a tal efecto, destacando sobremanera los que estaban destinados a resolver la forma de sujetar físicamente las cargas pesadas, caracterizadas principalmente por su tamaño enorme y formas simples sin salientes que permitiesen un sencillo amarre mediante eslingas. Leonardo encontró una solución a este problema ideando un método sencillo y seguro, que impidiera la caída de la carga.

En el anverso o recto del folio 22 del Códice de Madrid I se aprecia claramente cuatro dibujos que en la terminología actual del *materials handling*, se podrían corresponder perfectamente con unas “pinzas de elevación”. Con una mirada más atenta a las cuatro figuras del folio, se puede ver una cierta evolución en el pensamiento de Leonardo, hacia el diseño que actualmente se usa en la industria. Destacar que observando los diseños de Leonardo dos ideas están presentes desde el principio: el funcionamiento automático de la pinza y la simetría. Precisamente la simetría de sus modelos no le dejara llegar un poco más lejos y no tuviera en cuenta las actuales garras de retención automática, muy probablemente por no haber tenido en su época que trabajar y manipular de forma masiva con láminas de vidrio o planchas de chapa (como en las actuales cadenas de fabricación de automóviles). Con toda seguridad, la poca importancia de este problema hizo que Leonardo no considerara este tipo de útiles.

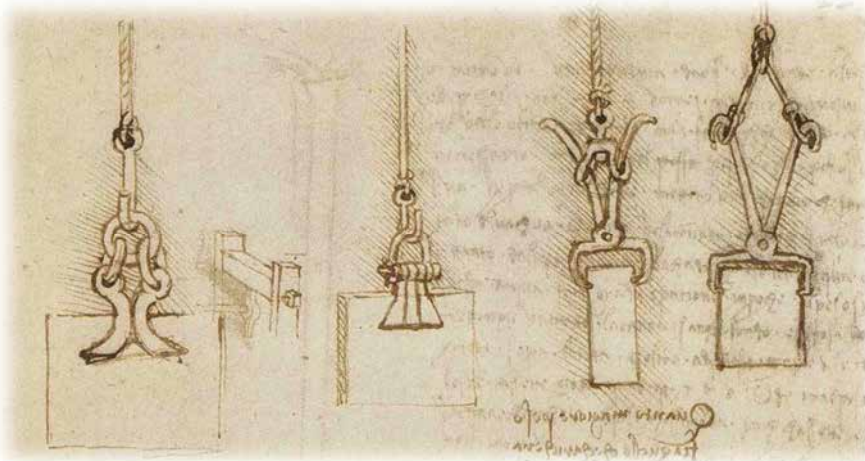


Figura 5.132: Pinzas de seguridad con liberación automática.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0022r (detalle)

A juzgar por el diseño, Leonardo era consciente que para asegurar el buen funcionamiento del sistema tan sólo tenía que idear una pinza que garantizara el cierre automático en carga. Es muy evidente que si no existiera el cerrado automático se tendría que haber dispuesto de amarres adicionales que impidieran la apertura de las pinzas en carga, complicando sobremanera el mecanismo y disparando con ello las probabilidades de fallo.

La primera de las cuatro ilustraciones de Leonardo, muestra un diseño en el que la propia forma de ambas patas de la pinza, que se empujan mutuamente, asegura la sujeción de las carga en cuanto ésta comienza a ser elevada (IRIONDO, 1997). No obstante, este principio de funcionamiento presenta el inconveniente de requerir que la carga esté dotada de un alojamiento en el que las patas de la pinza puedan ser insertadas. Pue bien, los accesorios empleados actualmente en algunos robots y, en algunos manipuladores para la orientación y ubicación de piezas huecas de tamaño mediano o reducido están basados en un principio

idéntico al mostrado por Leonardo en esta representación, aunque incorporando los accionamientos neumáticos o hidráulicos correspondientes.

La segunda ilustración resuelve el problema basándose en un principio semejante, si bien obliga a que la carga esté dotada en su parte superior de un alojamiento en forma de cola de milano.

La ilustración tercera perfecciona el mecanismo, al permitir que la pieza pueda ser sujeta desde sus caras externas. De esta forma, se convierte en un mecanismo idóneo para manipular piezas, como por ejemplo, los bloques voluminosos de piedra. No obstante, la conexión entre las patas de la pinza y el cable de elevación, obliga a disponer de un elemento adicional que, a pesar de su diseño tan perfeccionado, propicia el riesgo de aparición de desequilibrios debidos al rozamiento con las patas de la pinza.

La cuarta ilustración muestra el sistema más fiable de pinza incorporado, al menos en lo esencial, todos los elementos que forman las pinzas actuales. Además de ser el sistema más seguro, es el que permite una colocación más rápida y cómoda de la pinza sobre la carga.

No obstante, es cierto, que las pinzas utilizadas actualmente en las operaciones de *materials handling* han variado sustancialmente la forma de las patas de estas pinzas con respecto a las mostradas por Leonardo. Esta variación, sin embargo, ha mantenido lo esencial y únicamente ha estado encaminada a reducir los esfuerzos horizontal y vertical que aparecen en la articulación de la pinza, evitando que ésta tenga que ser tan robusta, y alargando su vida útil.

La representación muestra también, que Leonardo ya contaba con la terminación afilada de los extremos de las patas de la pinza. Quién actualmente diseña una pinza para lograr unas prestaciones de carga determinadas, con una apertura de pinza concreta, debe plantear las ecuaciones estáticas de equilibrio que permitan en carga, el cerrado automático de la pinza. Al resolver esas ecuaciones se comprueba el efecto beneficioso de disponer de un elevado coeficiente de rozamiento entre carga y extremos de las patas de la pinza. Esto, que en nuestros días, frecuentemente, puede lograrse mediante el empleo de un material idóneo derivado de caucho en esos extremos, obliga con frecuencia, incluso actualmente, a prever los mismos extremos afilados que ya Leonardo mostraba siglos antes es esta lámina.

Para terminar, es muy interesante recordar la nota que Leonardo escribió junto a estos dibujos en el Código de Madrid I: “*Cuanto mayor sea el peso que grava a estas tenazas, tanto mejor y con más firmeza será sostenido*”.

5.3.6.10.3. Gancho automático para martinete (CA_1018v).

Este ingenioso dispositivo permite que el mazo del martinete se conecte de nuevo automáticamente después de golpear la pila.

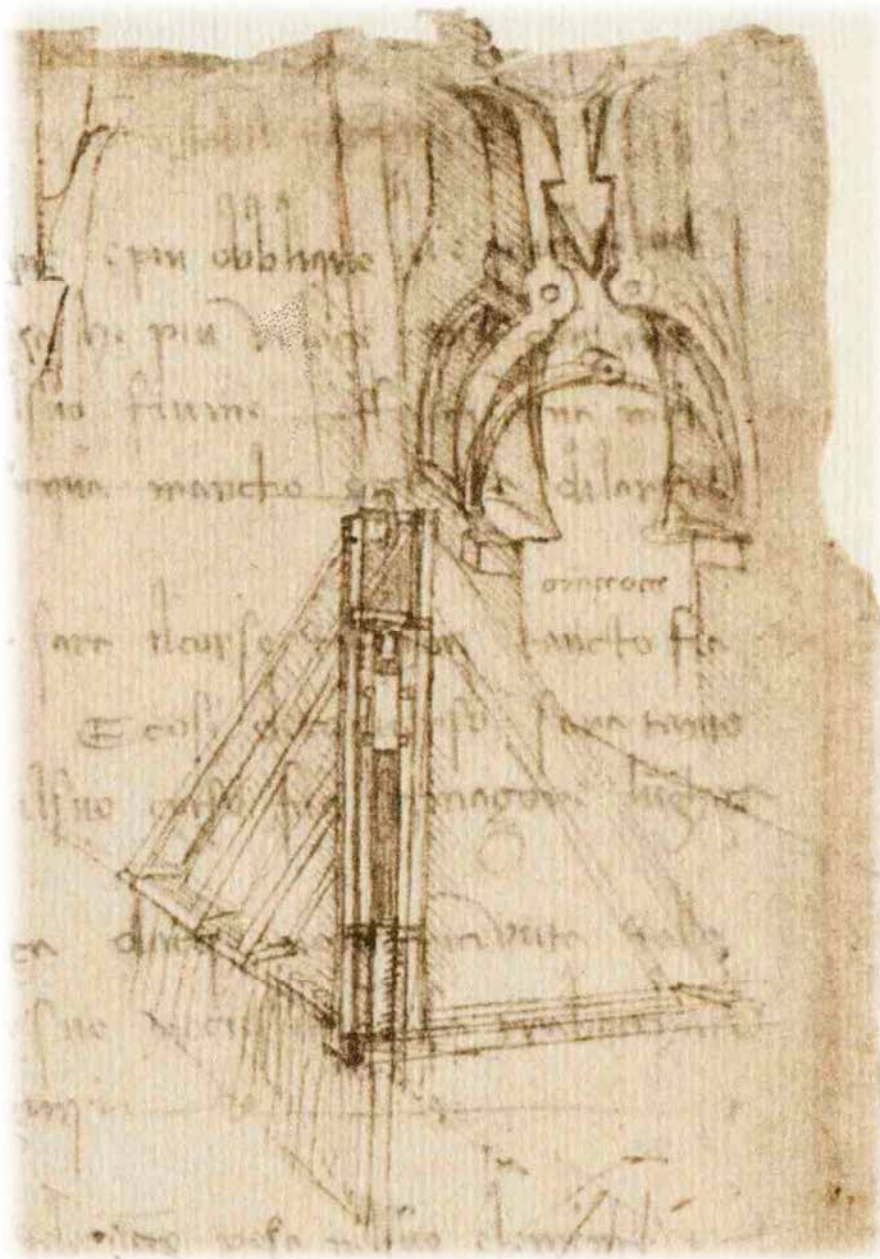


Figura 5.133: Gancho automático para martinete.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 1018v

5.3.6.11. Volantes en los manuscritos de Leonardo.

El volante es un acumulador de energía cinética. Leonardo realizó estudios pioneros sobre la función que desempeñaban los volantes a la hora de facilitar y regular el movimiento de los ejes giratorios. Se refiere al volante como una "rueda aumentativa" (*ruota di aumento*) para enfatizar la capacidad del dispositivo para aumentar su inercia. El volante fue fundamental para la máquina de vapor de Watt y para los sistemas de retroalimentación.

5.3.6.11.1. Volantes para movimientos continuo rotativo (CM1_0114r).

Leonardo analiza cinco tipos diferentes de volante: con cuatro bolas; con barras y cadenas; con una sola bola; con una rueda sólida y finalmente con una rueda de radios.

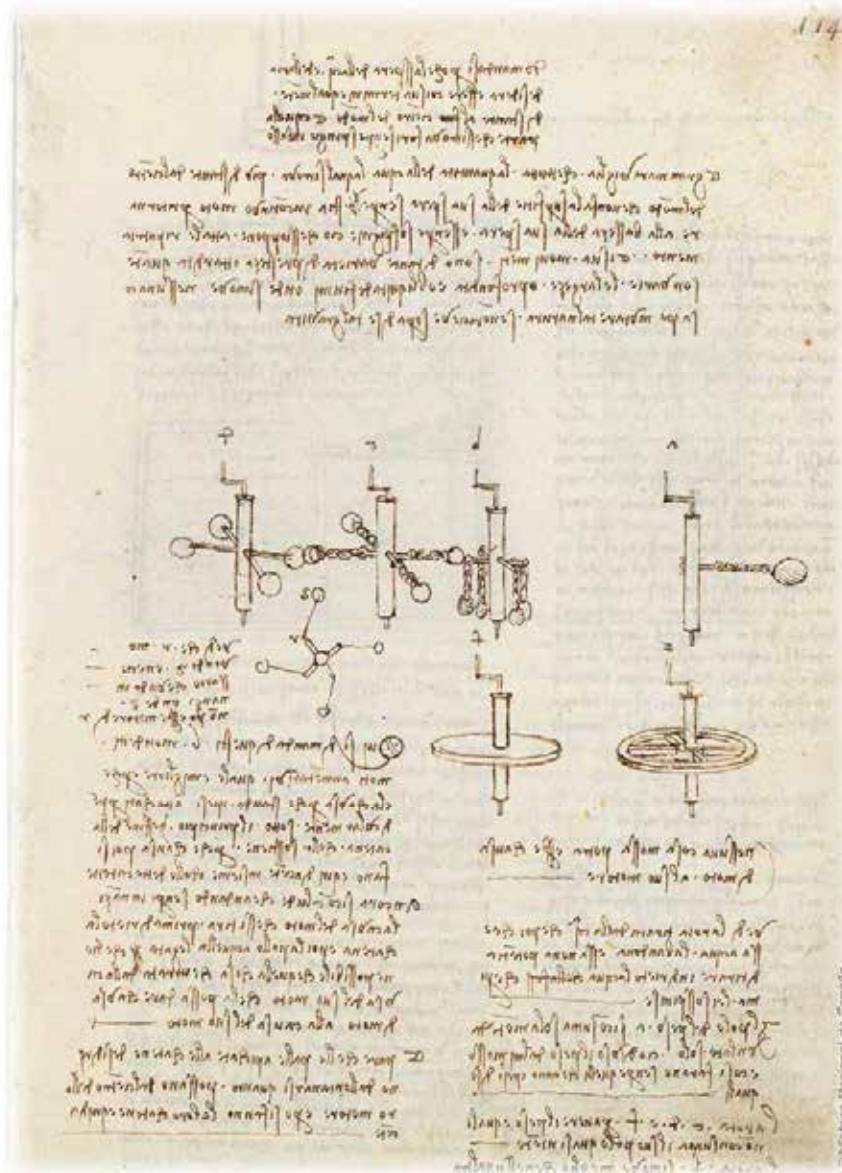


Figura 5.134: Volantes, estudio del movimiento continuo rotativo.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0114r

5.3.6.11.2. Volantes para movimientos rotativos generados por un sistema de cigüeñal (CM1_0086r).

En este ejemplo, Leonardo explota la capacidad de la inercia del volante para facilitar el movimiento giratorio generado por el cigüeñal.

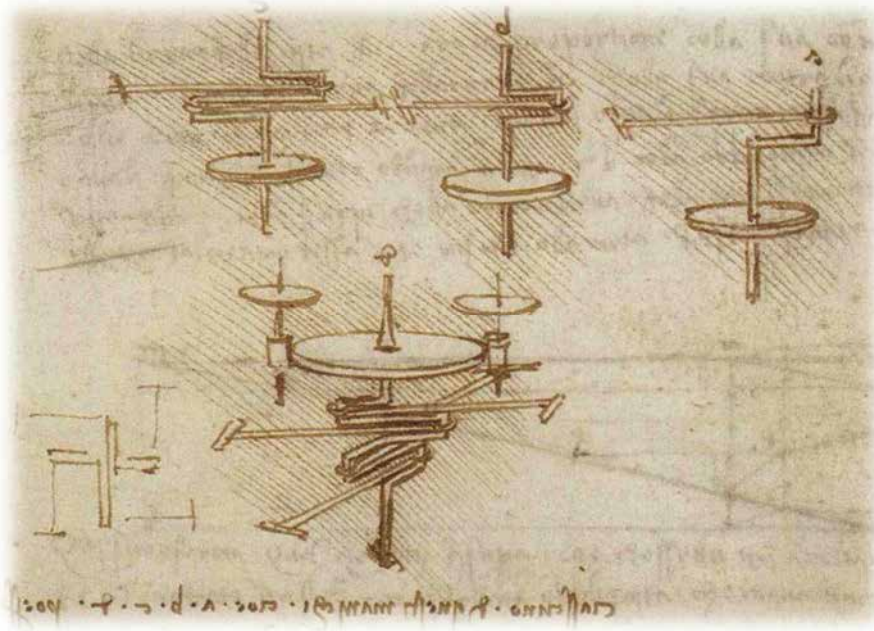


Figura 5.135: Volantes y cigüeñal.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0086r (detalle)

5.3.6.12. Muelles en los manuscritos de Leonardo.

5.3.6.12.1. Análisis de varios tipos de muelles (CM1_0085r).

Esta serie de magníficos dibujos ilustra varios tipos de resortes y métodos de bobinado. Leonardo es consciente de que el empuje impartido por muelles varía continuamente: *"El muelle tendrá diferentes grados de potencia o debilidad en cada grado de su movimiento."*

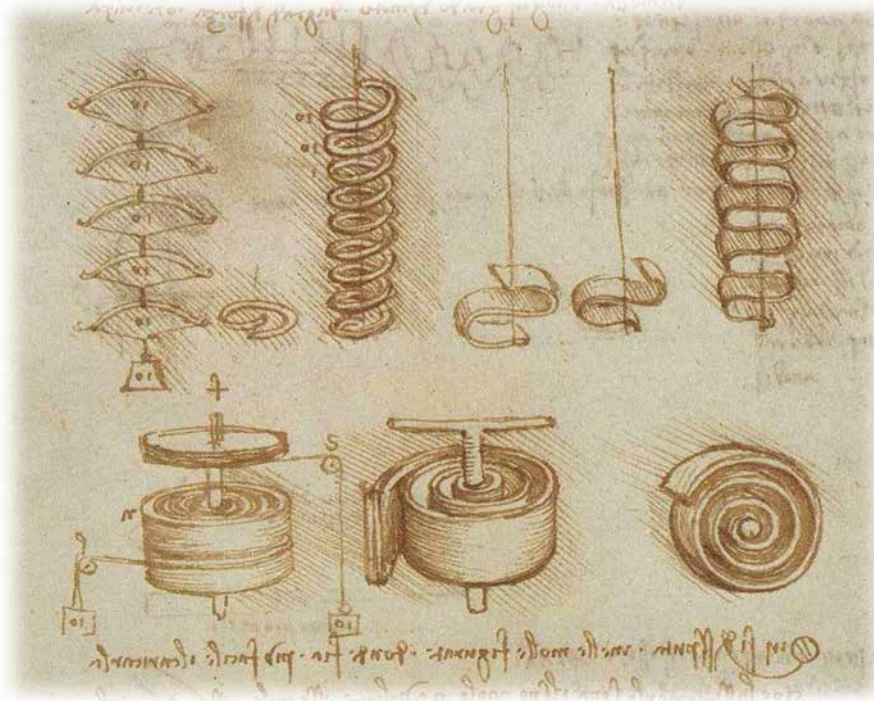


Figura 5.136: Detalles de diferentes tipos de muelles.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0085r (detalle)

5.3.6.12.2. Técnicas para la regulación de la fuerza generada por los resortes.

5.3.6.12.2.1. Muelle y husillo en forma de cono (CM1_0085r).

Si el espesor de del muelle es uniforme, su fuerza disminuirá gradualmente. Para evitar las consecuencias negativas de este fenómeno, Leonardo imaginó una solución que permitiera disminuir proporcionalmente la resistencia. El dibujo muestra un husillo en forma de cono conectado por un hilo al resorte. El husillo mantiene una fuerza constante a medida que se desenrolla el resorte.



Figura 5.137: Muelle y husillo en forma de cono.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0085r (detalle)

5.3.6.12.2.2. Muelle, piñón cónico y engranaje helicoidal (CM1_0016r y CM1_0045r).

Leonardo representa un accionamiento de reloj que consiste en un engranaje helicoidal que proporciona la disminución de la resistencia al piñón cónico impulsado por el eje de muelle. El muelle se encuentra en la base cilíndrica.

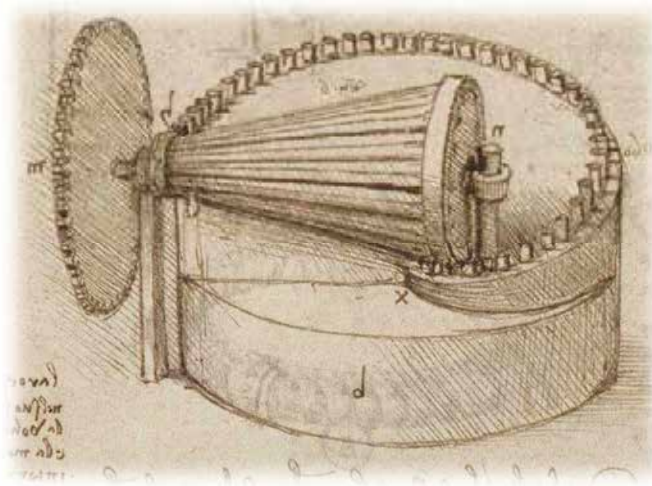


Figura 5.138: Muelle, piñón cónico y engranaje helicoidal.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0016r (detalle)

Este dibujo espléndido muestra un engranaje helicoidal diferente al diseño anterior. El engranaje sirve para regular la fuerza del resorte alojado en la base de la unidad de reloj (en el tambor cilíndrico).

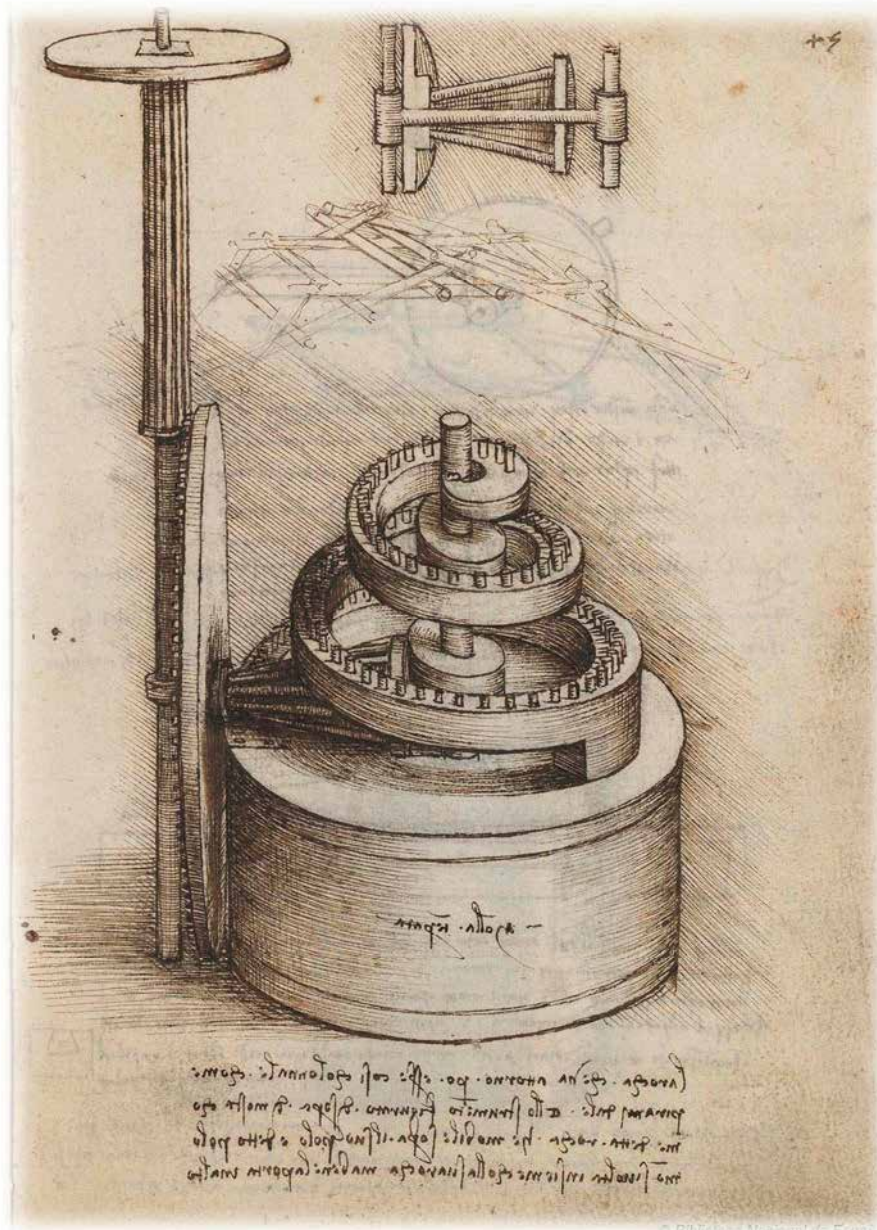


Figura 5.139: Muelle, piñón cónico y engranaje helicoidal.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0045r (detalle)

5.3.6.12.3. Resortes y cerraduras.

5.3.6.12.3.1. Bloqueo de cerradura por resorte (CM1_0099r).

Bloqueo por resorte con la llave en posición de bloqueo (parte superior) y la posición abierta (abajo).

Leonardo es muy consciente de que los resortes son un componente esencial de las cerraduras.

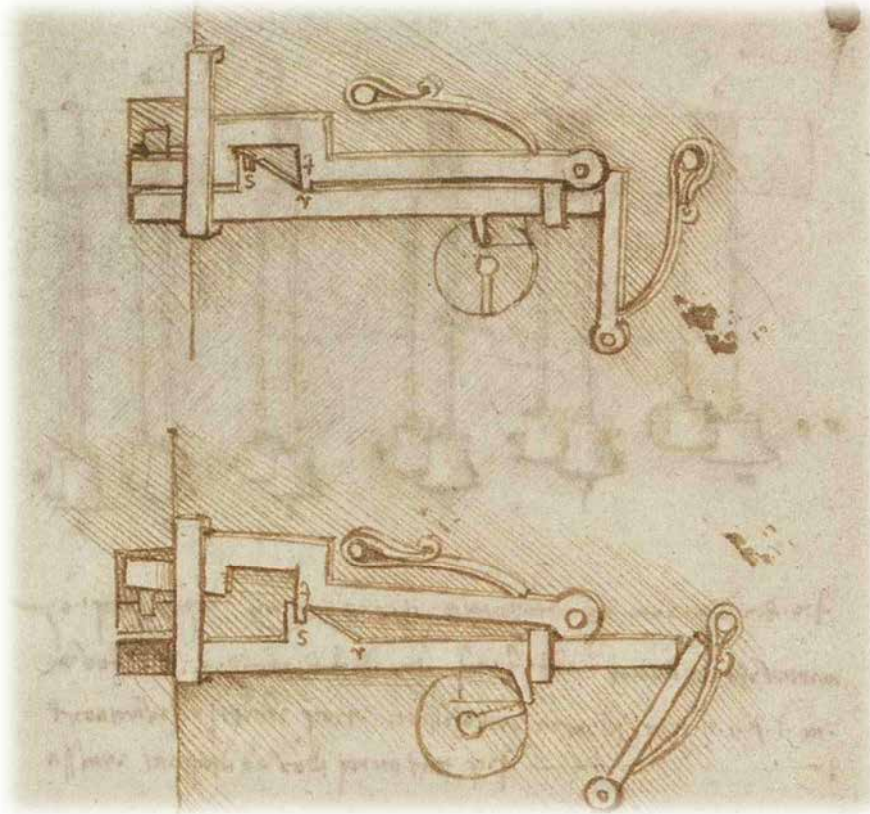


Figura 5.140: Cerradura. Posición cerrada (fig. superior) y posición abierta (fig. inferior).
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0099v (detalle)

5.3.6.12.3.2. Cerradura con mecanismo de palanca y resorte, con llave (CM1_0050r).

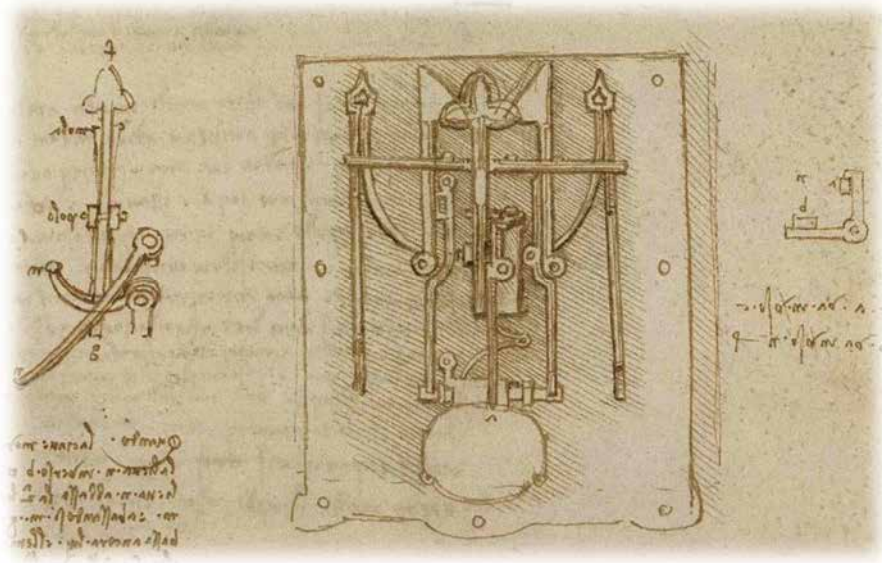


Figura 5.141: Cerradura de palanca y resorte con llave.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0050r (detalle)

5.3.6.12.3.3. Mecanismos de palanca y resorte para dispositivos detonadores automáticos para armas de fuego (CM1_0018v).

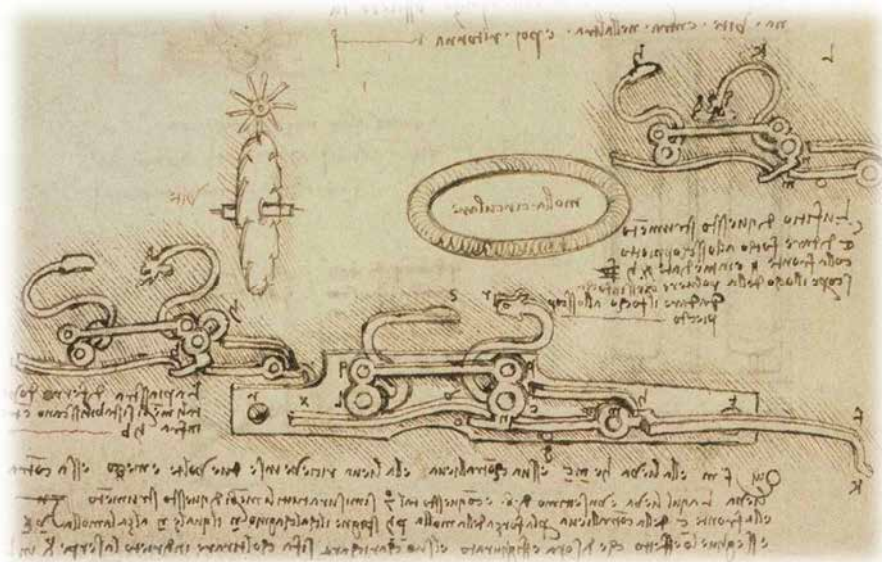


Figura 5.142: Detonador automático para armas de fuego.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0018v (detalle)

5.3.6.12.4. Resorte usado como freno (CM1_0010r).

Leonardo sugirió el uso de un resorte circular como freno para los ejes de los carruajes: "El resorte que se va comprimiendo y aflojando por igual. Y será comprimido en el círculo más perfecto posible."

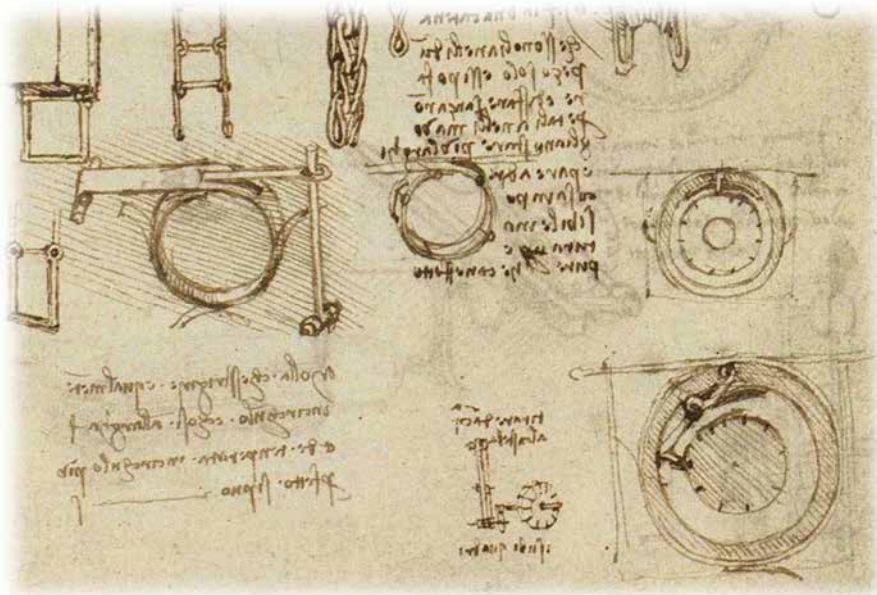


Figura 5.143: Freno accionado por muelle circular.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0010r (detalle)

5.3.6.12.5. Máquina para fabricar muelles (CM1_0014v).

"Este es el instrumento para la fabricación de los resortes como los utilizados en un reloj." Leonardo especifica que los muelles son de acero.

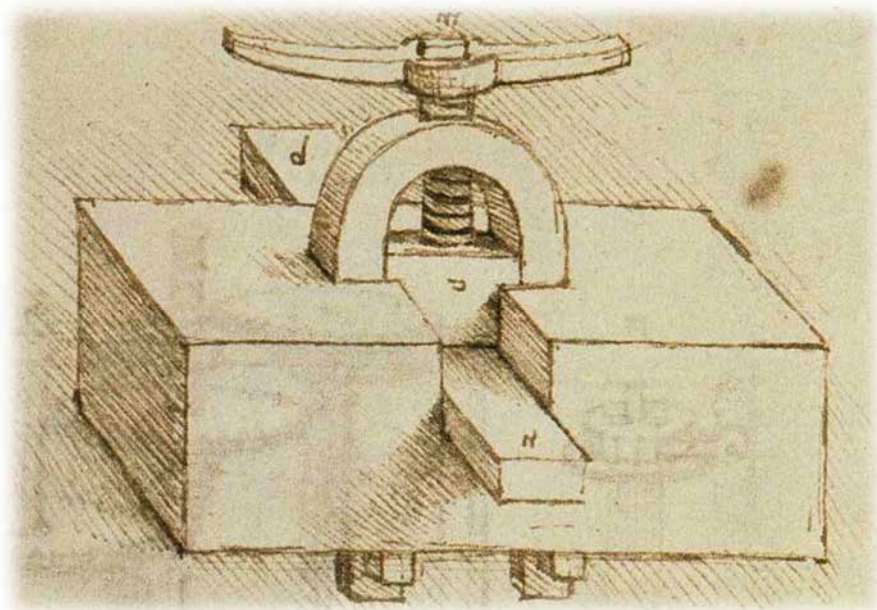


Figura 5.144: Máquina para fabricar muelles.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0014v (detalle)

5.3.6.12.6. Reloj de cuerda accionado por ballestas (CA_0863r).

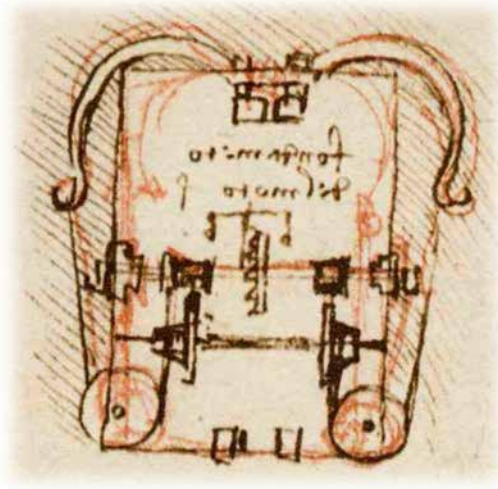


Figura 5.145: Mecanismo de cuerda de un reloj accionado por ballestas.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0863r

5.3.6.12.7. Motor de resorte (CM1_0014r).

Dada la complejidad del mecanismo, Leonardo realiza bocetos detallados del sistema que imparte el movimiento al bastidor (izquierda) y la parte superior de la husillo accionado por el engranaje cónico de enrollamiento (parte inferior).

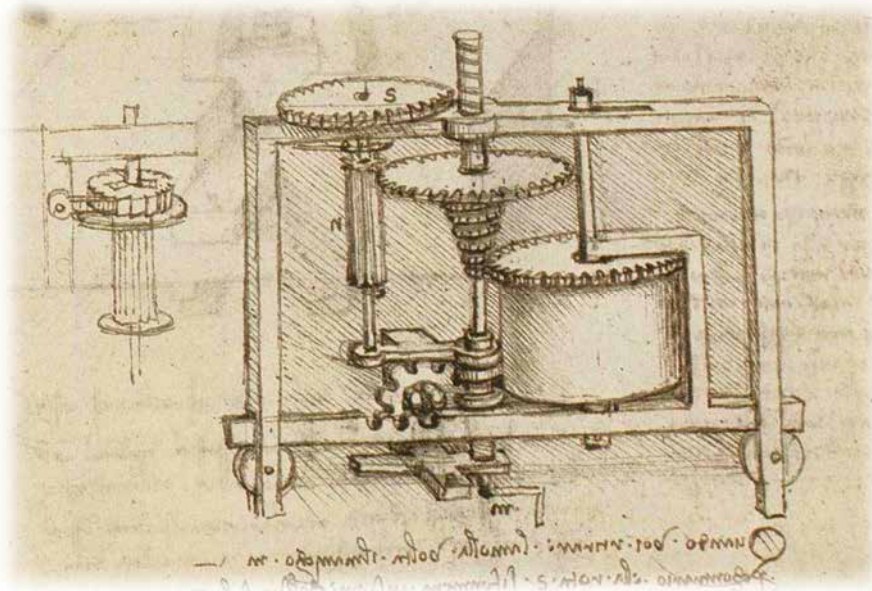


Figura 5.146: Motor de resorte.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0014r (detalle superior del folio)

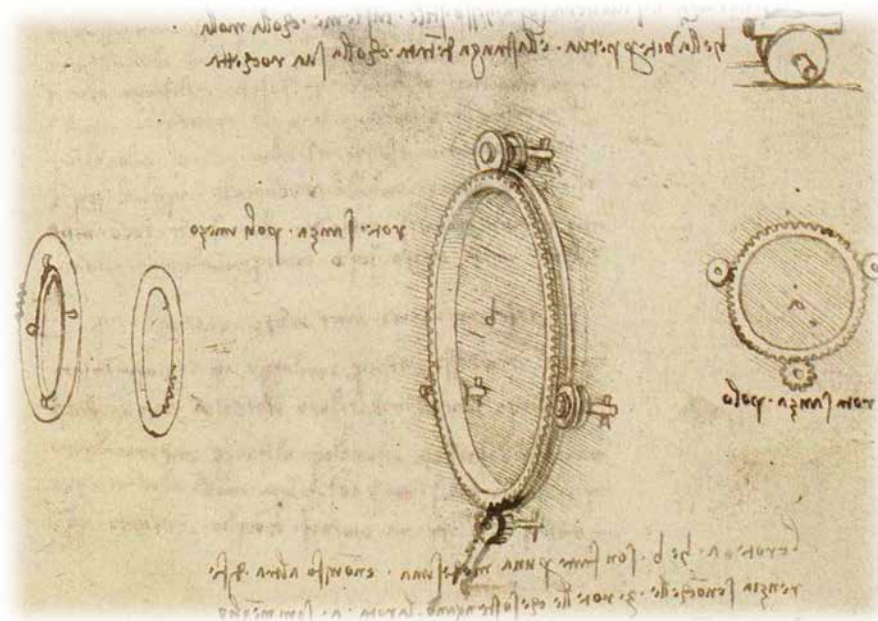


Figura 5.147: Motor de resorte.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0014r (detalle inferior del folio)

5.3.6.13. Cables y correas en los manuscritos de Leonardo.

Aunque aparentemente Leonardo prefiere el sistema de rueda-piñón y tornillos sinfín para transmitir el movimiento giratorio continuo, a veces utiliza cuerdas y correas para el mismo propósito.

5.3.6.13.1. Transmisión de movimiento por medio de cuerdas (CM1_0023r).

Sistemas para convertir un movimiento giratorio en movimiento lineal alternativo, o viceversa, por medio de cuerdas o segmentos de ruedas dentadas y piñones. Leonardo observa que *"cada movimiento hecho por cuerdas es más suave y menos ruidoso que si hubiera sido por la ayuda de ruedas y piñones dentadas."*

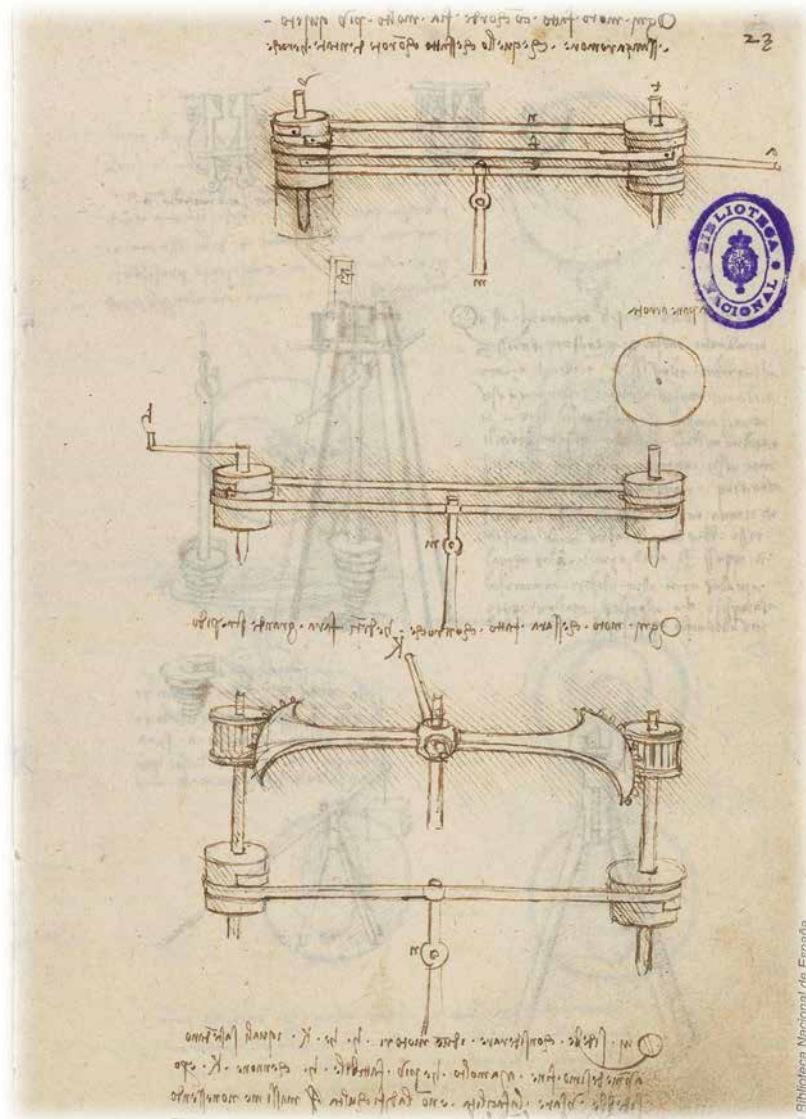


Figura 5.148: Sistemas de transmisión por cuerdas.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0023r

5.3.6.13.2. Transmisión de movimiento por medio de barras y cuerdas (CMI_0031r).

Comparación entre dos maneras equivalentes de producir movimiento recíproco lineal de movimiento rotativo: por medio de barras (arriba) y de cuerdas (abajo).

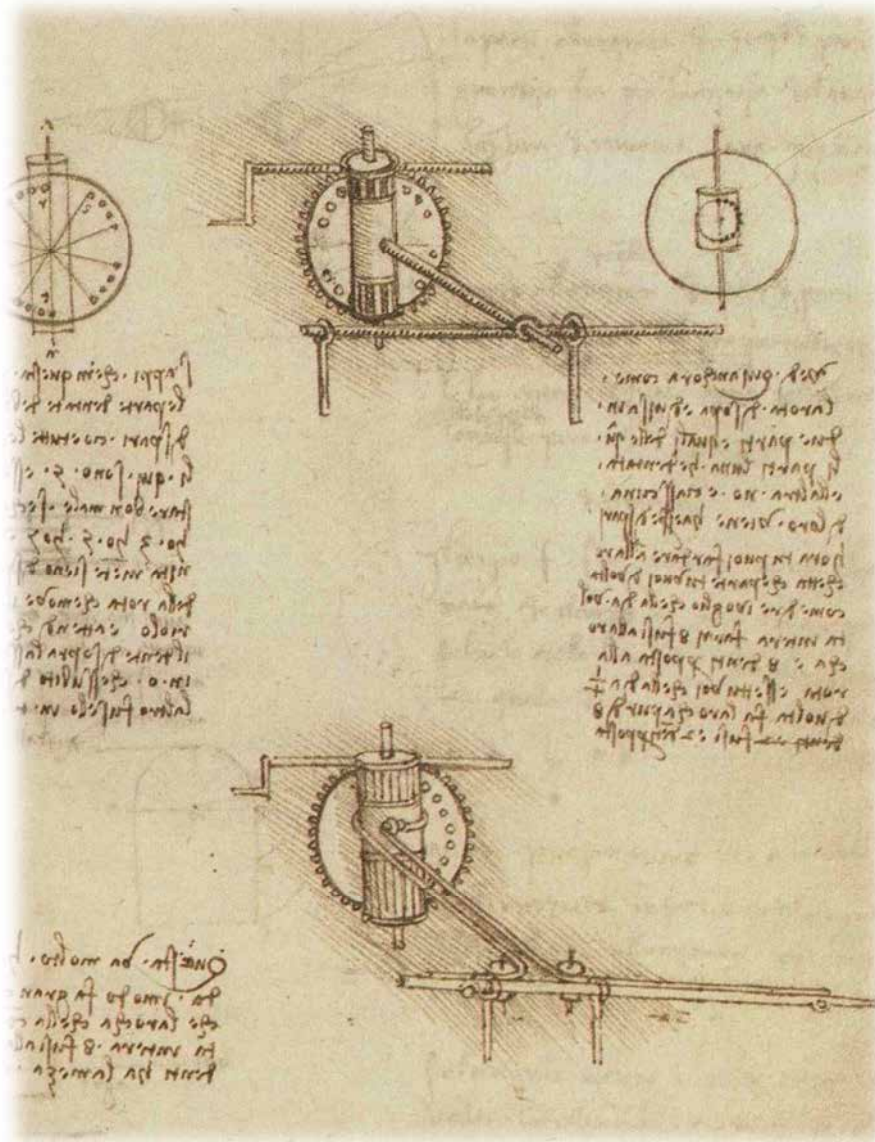


Figura 5.149: Sistemas de transmisión por medio de barras y cuerdas. Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0031r (detalle)

5.3.6.13.3. Transmisión de movimiento mediante correas (CM1_0030v).

Movimiento lineal alterno producido por medio de una correa

La manivela acciona la rueda dentada vertical continua. El conjunto semicircular de clavijas en el lado de la rueda engrana alternativamente con uno de los dos piñones fijos a la horizontal del eje m n. El eje también se mueve una correa, haciendo que la varilla horizontal unida a la correa se mueva de izquierda a derecha y viceversa.

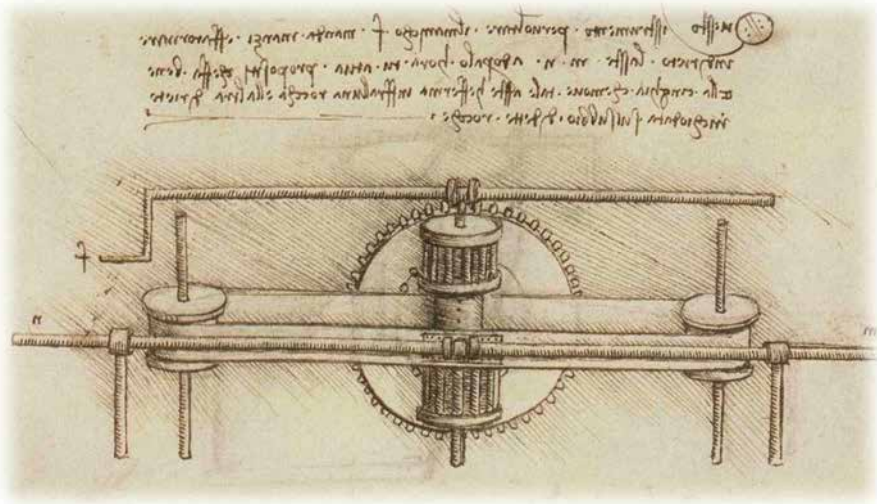


Figura 5.150: Sistemas de transmisión por correas.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0030v (detalle)

5.3.6.14. Cadenas en los manuscritos de Leonardo.

Leonardo dibujó numerosos tipos de cadenas. La cadena es un conjunto de elementos metálicos unidos entre sí mediante pernos. Respecto a una garrucha, la cadena puede ser enganchada entre los dientes de un engranaje y así es más resistente. Es erróneo querer encontrar aquí la prueba de la invención de la bicicleta de pedales con cadena, porque Leonardo dibujó sólo sistemas con cadena verticales para elevar pesos y contenedores.

Recomendó especialmente el uso de las cadenas en lugar de cuerdas para levantar cargas pesadas. Sin embargo, no pareció muy interesado en explorar el uso de las cadenas para transmitir movimiento dado la poca proliferación de las mismas a lo largo de sus manuscritos.

5.3.6.14.1. Diferentes tipos de cadenas (CM1_0010r).

El dibujo muestra una serie de cadenas compuestas por eslabones de múltiples formas y tamaños.

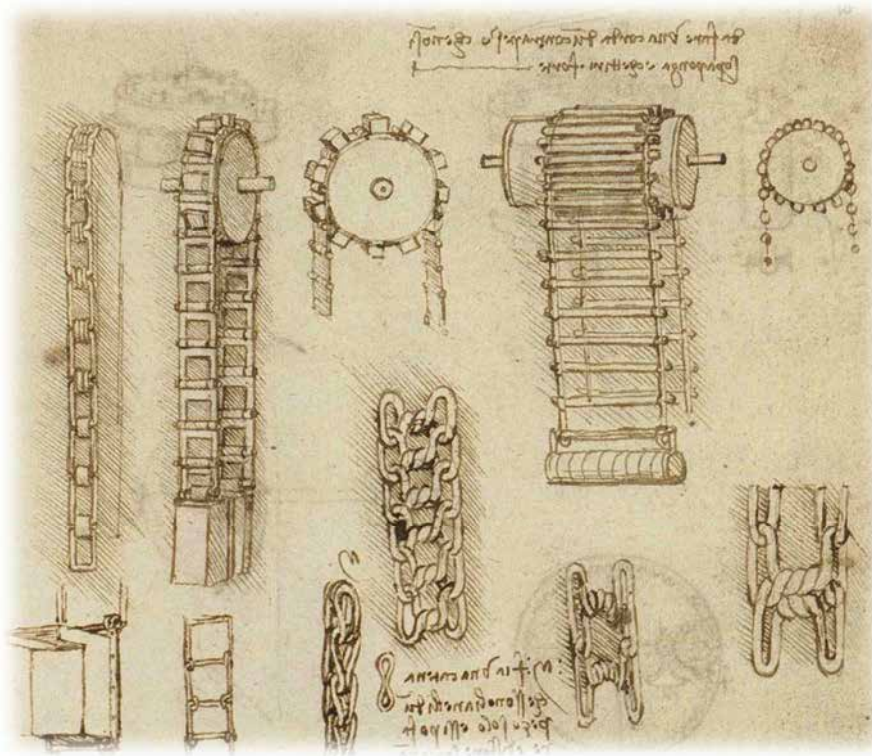


Figura 5.151: Diferentes tipos de cadenas.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0010r (detalle)

5.3.6.14.2. Cadena desmontable (CM1_0010r).

Esta cadena se puede montar y desmontar sin romper sus eslabones, uno de los cuales se muestra a la derecha.



Figura 5.152: Cadena desmontable.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0010r (detalle)

5.3.6.14.3. Cadena de “bicicleta” (CA-0158r).

En el centro del disco en la parte superior, se puede ver un par de eslabones de una cadena parecida a las usadas en las bicicletas modernas. Aquí, sin embargo, la cadena se utiliza para cargar el muelle grande que alimenta el pedernal-disparador de un arma de fuego.

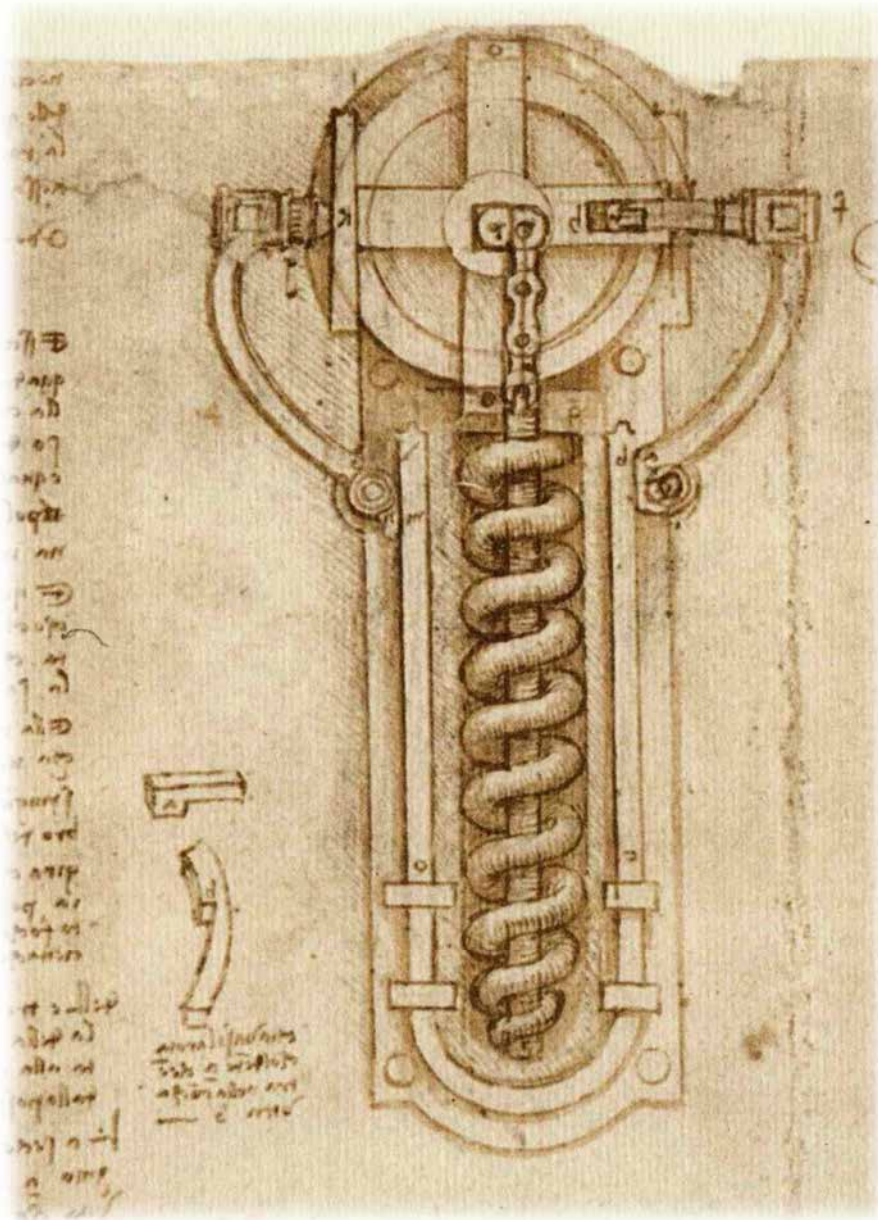


Figura 5.153: Detalle de cadena tipo “bicicleta” en mecanismo automático
De pedernal-disparador de arma de fuego.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0158r

5.3.7. Mecanismos para la transmisión de movimientos.

En muchas máquinas, el movimiento giratorio que proporcionan en el eje ha de ser modificado para poder emplearlo adecuadamente. Las modificaciones más comunes son:

Llevar el movimiento giratorio del eje del motor hasta otro eje diferente.

Obtener en este segundo eje mayor, menor o igual velocidad que la obtenida en el eje motor (incluso invertir el sentido del movimiento).

Transformar el movimiento giratorio en otro diferente (lineal, lineal alternativo, angular...).

Para llevar a cabo estas transformaciones se recurre a una adecuada conexión en cadena de varios operadores (o máquinas simples), de forma que las características del movimiento de entrada se modifiquen de acuerdo a las necesidades del movimiento de salida.

Movimiento giratorio continuo de entrada en giratorio continuo de salida.

Transmisión del movimiento entre ejes paralelos. Engranajes cilíndricos.

Transmisión del movimiento entre ejes perpendiculares entre sí.

Transmisión del movimiento en entre ejes inclinados.

Movimiento giratorio continuo de entrada en giratorio continuo de salida con diferentes velocidades.

Movimiento giratorio continuo de entrada en movimiento giratorio alterno de salida:

Piñones semidentados y corona.

Ruedas semidentadas y piñones.

Rueda semidentada y sector circular.

Movimiento giratorio continuo de entrada en movimiento lineal alterno de salida.

Tornillo sinfín, corona, árbol de levas y barra

Rueda dentada, piñón y cremallera.

Ruedas semidentadas, cremallera y barras.

Movimiento giratorio continuo de entrada en movimiento lineal de salida.

Manivela, piñón, rueda dentada y cremallera.

Movimiento lineal alternativo de entrada en movimiento giratorio continuo de salida

Sistema doble de barras articulado con rueda dentada a modo detrinquete.

5.3.7.1. Mecanismos para transformar un movimiento giratorio continuo de entrada en giratorio continuo de salida.

5.3.7.1.1. Transmisión del movimiento entre ejes paralelos. Engranajes cilíndricos (CM1_0013r).

Los ejes de la rueda dentada y el piñón son paralelas.

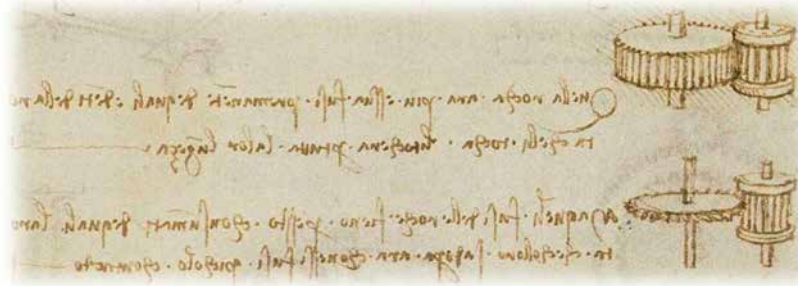


Figura 5.154: Engrane: ejes paralelos.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0013r (detalle)

5.3.7.1.2. Transmisión del movimiento entre ejes perpendiculares entre sí (CM1_0015v).

Los ejes entre la ruda conductora y el piñón son perpendiculares entre sí.

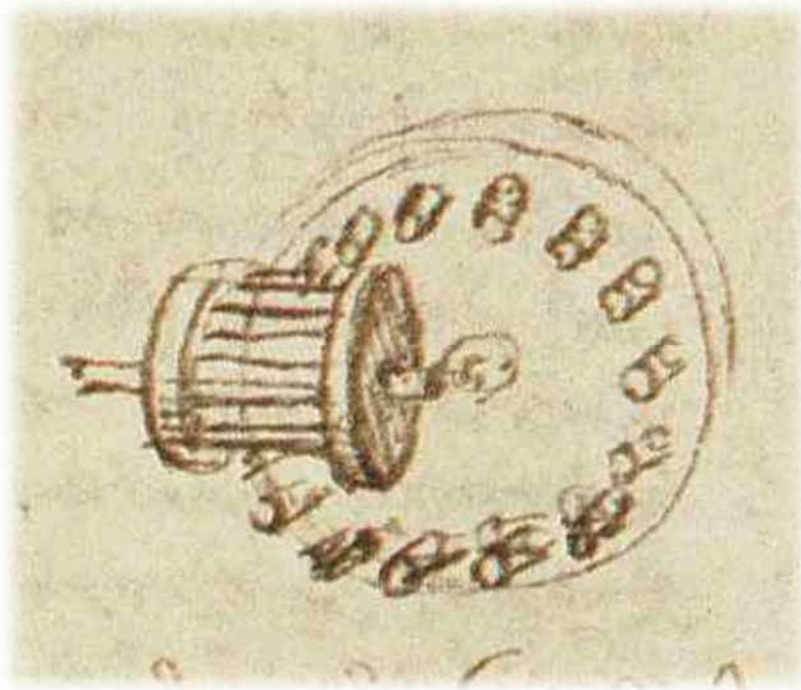


Figura 5.155: Engrane: ejes perpendiculares.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0015v (detalle)

5.3.7.1.3. Transmisión del movimiento entre ejes inclinados (CM1_0015v).

Los ejes de la rueda dentada y el piñón tienen ángulos diferentes.

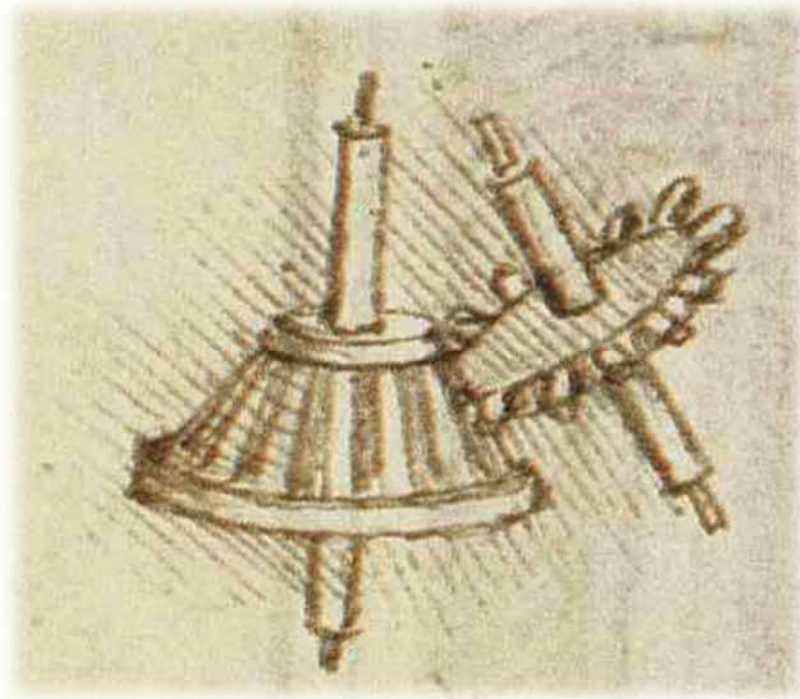


Figura 5.156: Engrane: ejes inclinados.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0015v (detalle)

5.3.7.1.4. Movimiento giratorio continuo de entrada en giratorio continuo de salida con diferentes velocidades (CA_0077v).

En la parte inferior de la figura, tres ruedas dentadas coaxiales de diámetros diferentes engranan con un piñón en forma de cono, transmitiendo así el movimiento con tres relaciones diferentes.

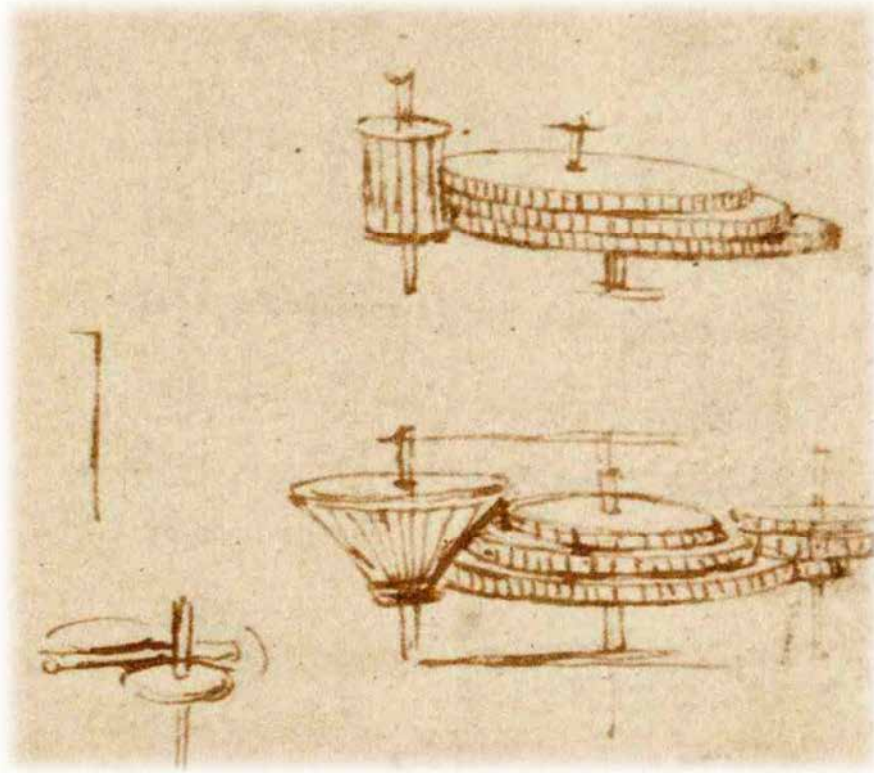


Figura 5.157: En el dibujo inferior engrane entre tres ruedas dentadas coaxiales y un piñón troncocónico..

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0077v

5.3.7.2. Mecanismos para transformar un movimiento giratorio continuo de entrada en giratorio alterno de salida.

5.3.7.2.1. Piñones semidentados y corona (CM1_0017r).

Los piñones conductores están dentados solo en la mitad de su superficie: "A medida que la manivela gira constantemente en la misma dirección en este mecanismo, la rueda principal dará vueltas una vez en una dirección y otra vez en la contraria, tal y como se demuestra por los dientes de los piñones".

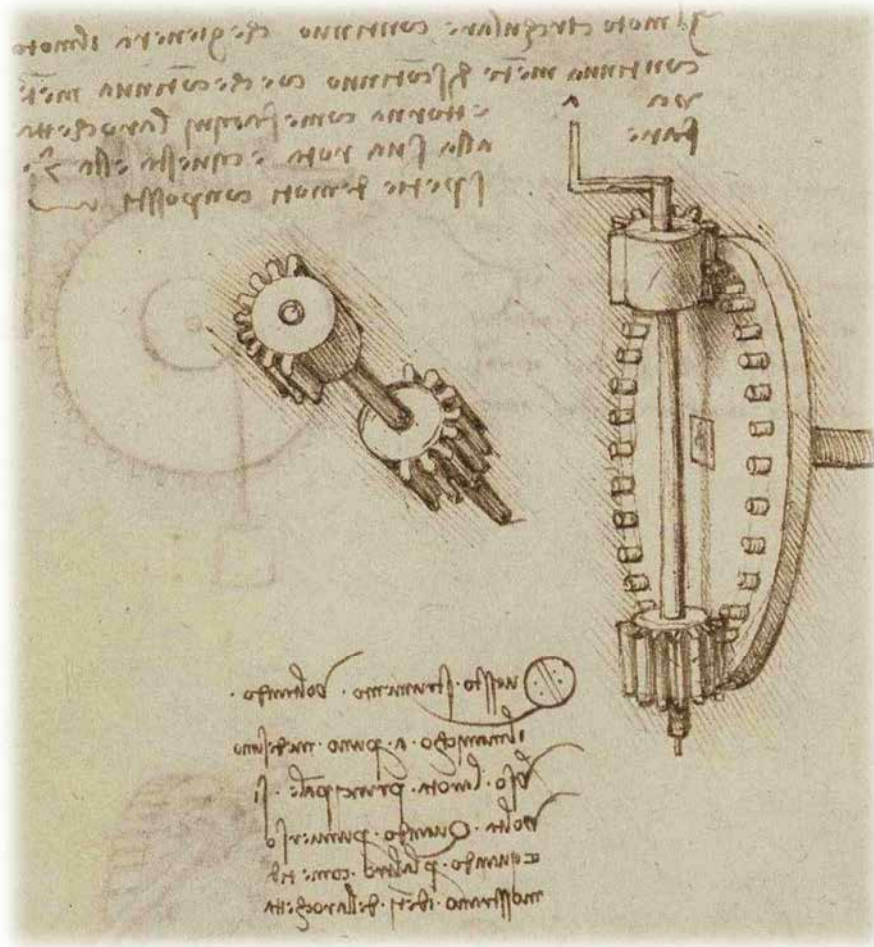


Figura 5.158: Piñones semidentados y corona.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0017r (detalle)

5.3.7.2.2. Ruedas semidentadas y piñones tipo jaula (CM1_0019v y CM1_0011v).

El mismo efecto se produce con un dispositivo más complejo. La manivela conduce una rueda vertical que sólo lleva dientes en la mitad de su superficie. La rueda engrana con dos ruedas similares colocadas en ángulo recto con ella. Como resultado los dos piñones m y n giran alternando sus direcciones.

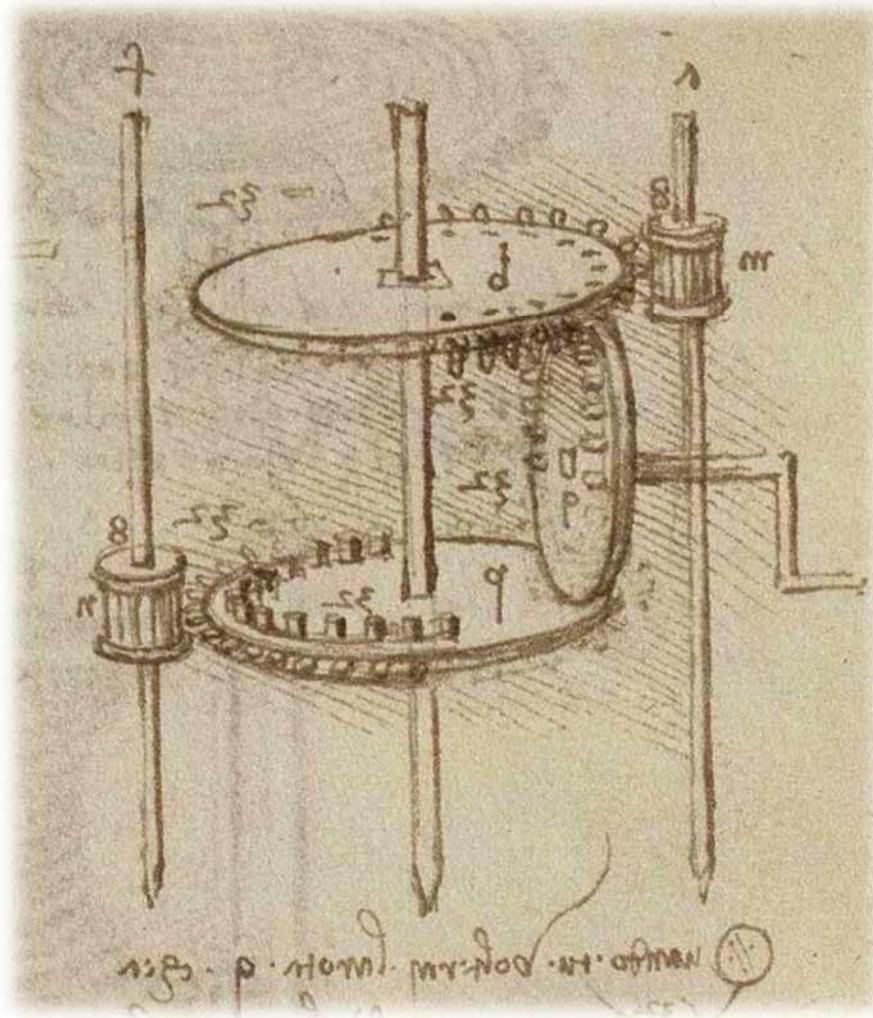


Figura 5.159: Ruedas semidentadas y piñones.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0019v (detalle)

Otro ejemplo parecido nos ofrece Leonardo en el folio 11 verso del Códice de Madrid I. En este caso el mecanismo es accionado por una manivela (M) que hace girar la gran rueda dentada (A) a través de una transmisión de tipo jaula (B). la rueda grande (A) tiene 16 dientes dispuestos a lo largo de la mitad de su borde exterior. De esta manera, el sistema engrana alternativamente con el cilindro de la derecha (1) primero y con el de la izquierda (2) después. Los cilindros externos están unidos a dos discos o engranajes superiores que reciben un movimiento de rotación alterno. Según el número de dientes indicados por Leonardo (8-16), los discos deberían girar alternativamente dos veces y después pararse otras tantas veces.

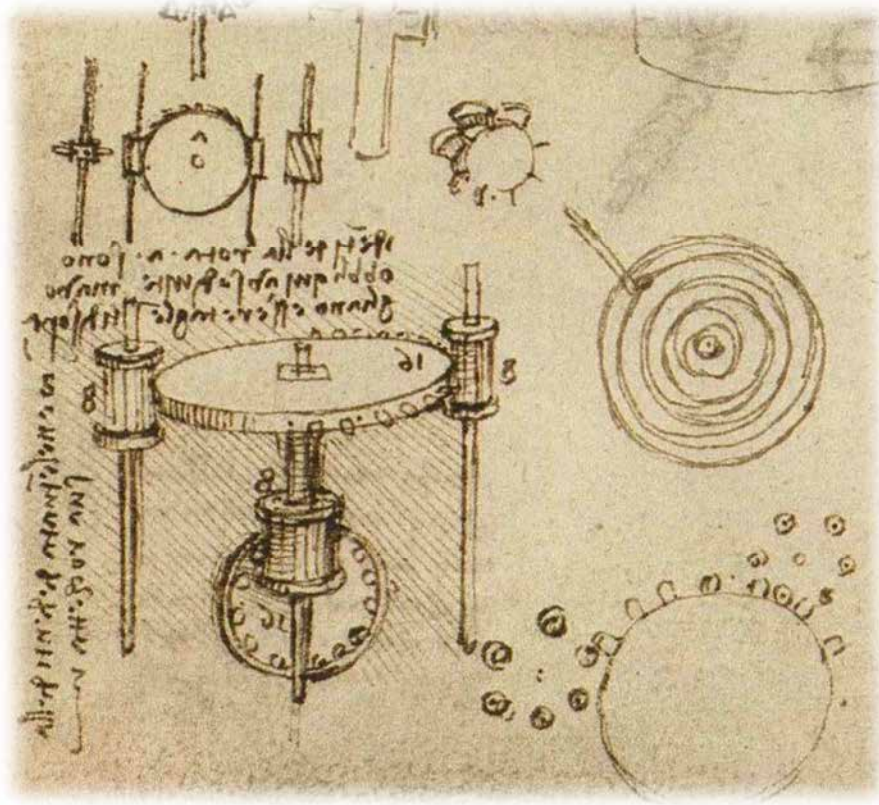


Figura 5.160: Ruedas semidentadas y piñones.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0011v (detalle)

5.3.7.2.3. Rueda semidentada y arco circular dentado (CM1_0011r).

Leonardo trató de mejorar el sistema de rotación alterna –que presenta defectos de engranaje- y propuso la realización del mecanismo principal utilizando un segmento de círculo de 45°. La manivela (M) hace girar la rueda (R), de 16 dientes dispuestos sólo en una mitad. Éstos engranan alternativamente con el segmento del círculo (A), que hace girar el disco (B) cuatro vueltas. En una fase posterior, la rueda (R), que sigue girando en el mismo sentido, engrana con el segmento del círculo (C), que de igual manera hace girar cuatro veces el disco (D). Es interesante la utilización de una campanilla que, cuando el segmento de círculo (A) termina sus giros, empieza a sonar y lo hace mientras dura el giro del segmento de círculo (C).

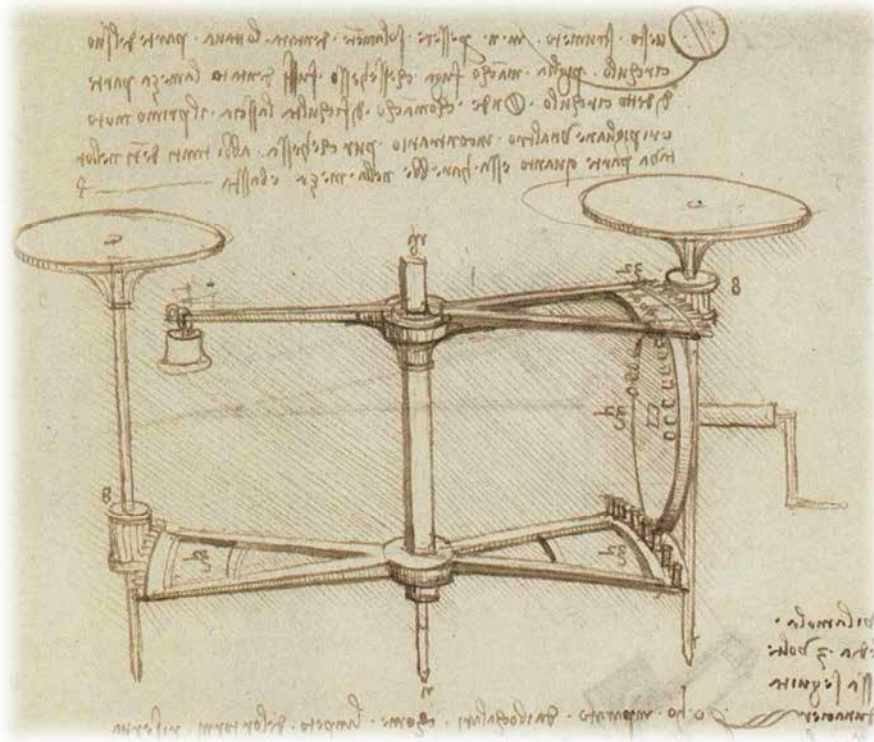


Figura 5.161: Ruedas semidentadas y sector circular.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0011r (detalle)

5.3.7.3. Mecanismos para transformar un movimiento giratorio continuo de entrada en movimiento lineal de salida.

5.3.7.3.1. Manivela, piñón, rueda dentada y cremallera (CA_0998r).

Una rueda dentada, conducida por medio de una manivela y un piñón, engrana con una cremallera, convirtiendo el movimiento giratorio en un movimiento lineal.

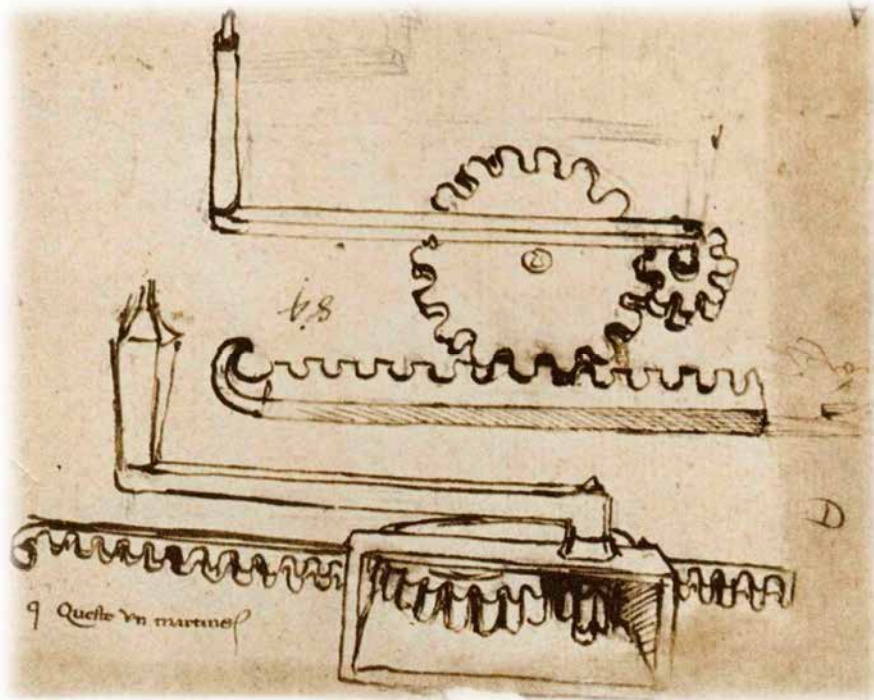


Figura 5.162: Mecanismo para convertir un movimiento giratorio continuo en lineal.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0998r (posiblemente no fue dibujado por Leonardo)

La figura adjunta muestra el esquema del **gato mecánico** que ideó Leonardo. Todo aquél que haya tenido que cambiar alguna vez un neumático encontrará este diseño completamente familiar. Al girar la manivela, el piñón provoca el movimiento de la rueda dentada que, a su vez, asciende por la cremallera. De esta manera, si se apoya el objeto a elevar sobre la caja que contiene al piñón y a la rueda, éste podrá elevarse.

Resumiendo el funcionamiento, la clave de esta máquina simple consiste en mantener fija o quieta la cremallera. Leonardo no explicó claramente este objetivo, pero es fácilmente comprensible a la vista de sus dibujos, en los cuales queda claramente sugerido en el diseño de la caja que rodea y contiene al mecanismo piñón-rueda; por lo tanto, es de suponer dicho objetivo. Sea como fuere, no completó totalmente su diseño como máquina elevadora. O, dicho de otra manera, superó dicho diseño con el correspondiente a las máquinas de elevación mediante husillo que se comentan más adelante, en las que prefirió la utilización de tornillos sinfín, seguramente por ser un mecanismo mucho más seguro –evitando el riesgo de caída de los pesos- y ser adecuados para obtener buenas relaciones de reducción.

5.3.7.4. Mecanismos para transformar un movimiento giratorio continuo de entrada en movimiento lineal alterno de salida.

5.3.7.4.1. Tornillo sinfín, corona, árbol de levas y barra (CM1_0027r).

La manivela mueve un tornillo sin fin, conduciendo de esta forma a la rueda dentada. Las espigas solidarias de la rueda activan un árbol de levas, haciendo que la barra unida a su extremo se mueva alternadamente.

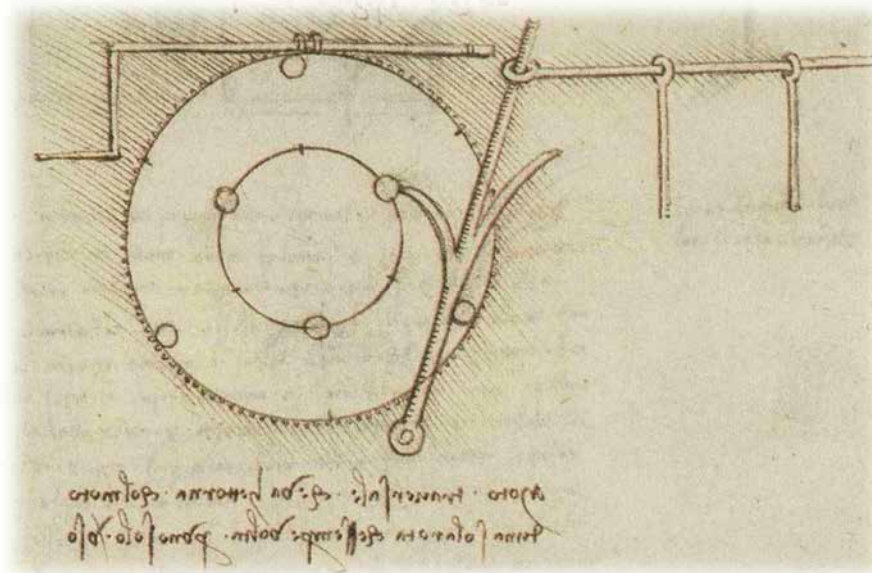


Figura 5.163: Engranaje y árbol de levas.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0027r (detalle)

5.3.7.4.2. Rueda dentada, piñón y cremallera (CM1_0028r).

"Si giras la manivela en la misma dirección, la cremallera m-n se moverá alternadamente" El dibujo inferior muestra el mismo sistema, en la que la cremallera ha sido reemplazada por una varilla movida por un piñón que está conectado por medio de cuerdas.

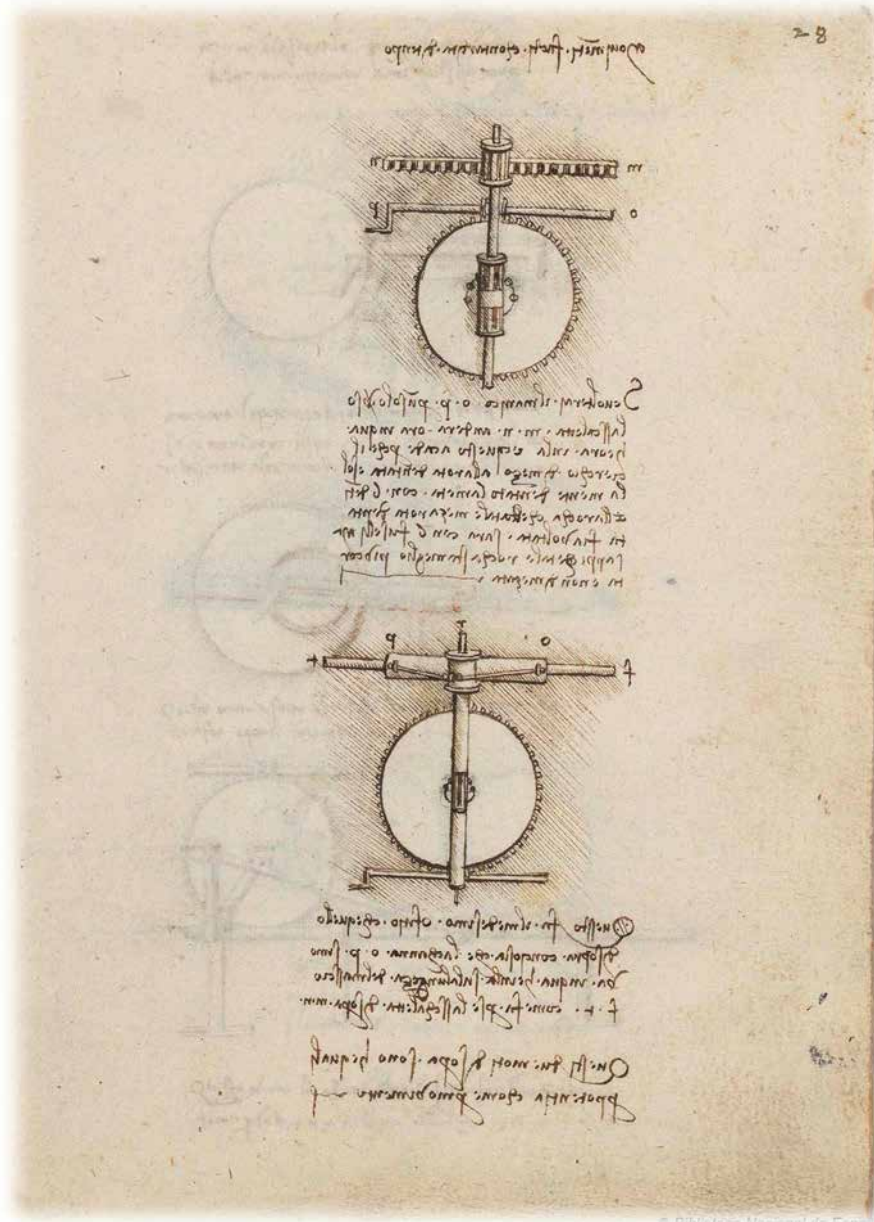


Figura 5.164: Rueda dentada, piñón y cremallera.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0028r

5.3.7.4.3. Ruedas semidentadas, cremallera, y barras (CM1_0002r).

En el sistema mostrado en el dibujo superior, cada revolución completa de la rueda dentada provoca que la cremallera horizontal se mueva de forma alternativa. La cremallera es impulsada por el sector dentado conectado al eje por dos piñones que engranan alternativamente con una serie discontinua de pasadores. En el dibujo inferior, la rueda motriz mueve alternadamente las dos barras, que, estando conectadas por una cuerda, alternan un movimiento recíproco entre sí de vaivén.

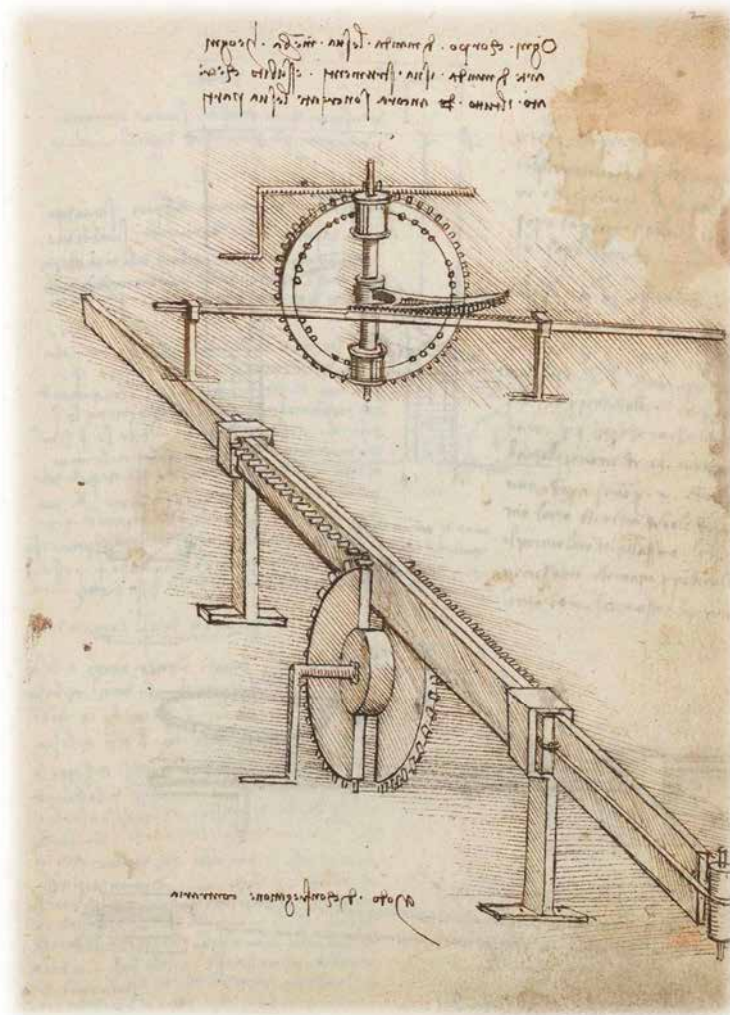


Figura 5.165: Mecanismo para convertir un movimiento giratorio continuo en lineal alternativo.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0002r

Leonardo llamó al efecto de estas dos máquinas “fricción contraria”. La primera, movida por una manivela (m), aprovecha el movimiento de una gran rueda sobre cuya superficie se sitúan unos dientes en grupos. Estos grupos de dientes engranan alternativamente con el cilindro superior (a) primero, y con el cilindro inferior (b) después. Los dos cilindros transmiten el movimiento alterno a la media luna dentada (f) que hace que se mueva la barra dentada (g) primero en una dirección y después en la otra.

La segunda solución es más sencilla: la manivela (m) mueve dos medias ruedas dentadas (C y D) que engranan alternativamente con las dos barras dentadas. Las dos barras están unidas entre ellas por el cilindro (r) que las devuelve a la posición inicial y que recibe un movimiento alterno.

5.3.7.5. Mecanismos para transformar un movimiento lineal alternativo de entrada en movimiento giratorio continuo de salida.

5.3.7.5.1. Sistema doble de barras articulado con rueda dentada a modo de trinquete (CM1_0123v).

Leonardo muestra el dispositivo desde dos ángulos diferentes: "Movimiento, por el cual un mango que da vueltas hacia adelante y hacia atrás, hace girar una rueda, siempre en la misma dirección".

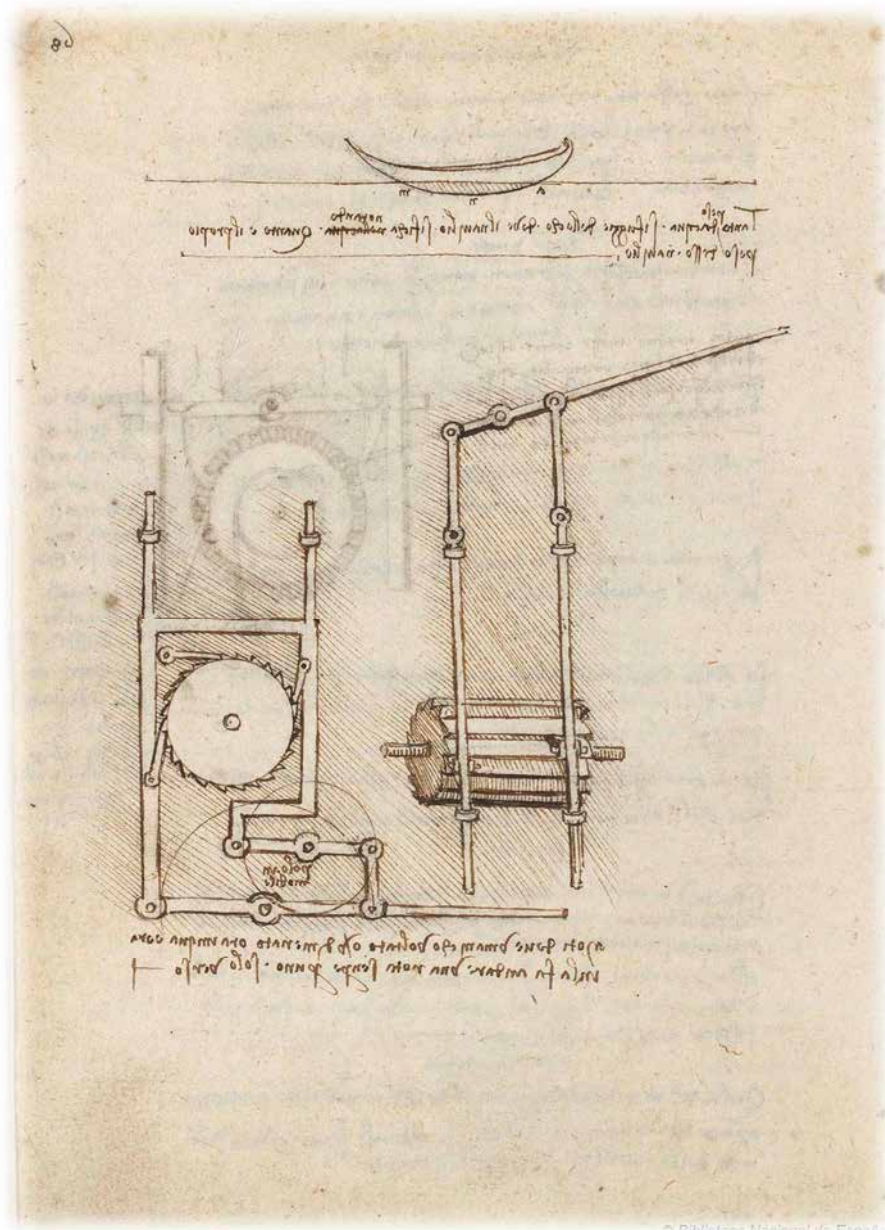


Figura 5.166: Sistema doble de barras articulado.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0123v

Capítulo 6

Leonardo da Vinci INGENIERO HIDRÁULICO

*Así como el hierro se oxida por falta de uso,
también la inactividad destruye el intelecto
(Leonardo da Vinci)*

6.1. Introducción.

Leonardo realizó numerosos estudios de hidráulica.

Casi con toda seguridad, ya al final de su juventud empezó a preocuparse por la problemática agua, pero debió de ser la temporada que pasó en Lombardía, la que le hizo descubrir las posibilidades de aplicación de sus estudios de hidráulica. Lombardía es una región del norte de Italia atravesada por varios ríos entre los que destacan: Mincio, Tesino, Adda y Po. Por este motivo existía desde la antigüedad una avanzada práctica de canalizaciones y Leonardo, en calidad de Ingeniero, debía aplicar los conocimientos que estaba desarrollando para resolver los problemas fundamentales relativos al agua, de cuya reglamentación dependían no sólo la agricultura sino también la posibilidad de mover máquinas y molinos y la navegación fluvial y como no el abastecimiento de agua para garantizar su consumo en pueblos y ciudades.

A pesar de que por aquella época se realizaban frecuentes canalizaciones, acueductos y otras obras hidráulicas, no se conocían los fundamentos teóricos y se encontraba ante grandes dificultades para realizar mediciones precisas. Según se detalla más adelante, Leonardo se esforzó en racionalizar y entender las claves del movimiento de agua, con el objetivo de obtener mejores resultados prácticos. En cualquier caso, son merecedores de una mención especial los grandes proyectos de Leonardo, en gran medida utópicos, de desvíos del curso de ríos o de construcción de canales a los que se hacen referencias en apartados específicos.

Ilusionado con la idea de que el hombre pudiese andar sobre y debajo del agua, Leonardo diseñó flotadores y respiradores. Perfeccionó el movimiento de las embarcaciones, diseñando unos cascos que imitaban la forma de los peces. También mejoró los mecanismos de accionamiento interno de las naves, que hicieran mover las palas de forma más eficiente. Leonardo trabajó en el perfeccionamiento de surtidores para abastecer de agua a los centros urbanos, así como en el de dragas para limpiar lagunas y áreas pantanosas. Propuso nuevos diseños de ruedas y turbinas hidráulicas.

6.2. Comparativa entre el Códice Leicester y “Los veintiún libros de los ingenios y máquinas de Juanelo”.

En este apartado hemos querido reproducir parte del magnífico artículo que publicara el profesor Nicolás García Tapia en la revista Ingeniería del Agua titulado “*Ingeniería del agua en los Códices de Leonardo y en los manuscritos españoles del siglo XVI*” en 1996. (GARCIA TAPIA, 1996).

Numerosos son los textos de Leonardo dedicados a la hidráulica, intercalados de forma desordenada, en varias de sus anotaciones. De todos ellos, es el conocido como el código Leicester el que destina más espacio al agua y sus aplicaciones, con un índice que indica la intención de Leonardo de realizar un verdadero tratado de hidráulica, llamado “*il libro dell'acqua*”, que no llegó a completar. Por este motivo, tomaremos el Códice Leicester como principal referencia de comparación en asuntos relacionados con el agua.

Por otra parte, el manuscrito español más completo sobre hidráulica del siglo XVI es el conocido como “*Los veintiún libros de los ingenios, y máquinas de Juanelo*”, según la denominación que aparece en la portada del libro que se conserva en la Biblioteca Nacional de Madrid. Juanelo era un relojero de origen italiano al servicio de Carlos V y luego de su hijo Felipe II, famoso porque hizo en Toledo una insólita elevación de aguas desde el Tajo al Alcázar, por medio de un complejo mecanismo a base de ruedas hidráulicas que movían palancas con cazos que se pasaban el agua de uno hasta a otro hasta alcanzar una altura considerable.

La fama de Juanelo y el hecho de que apareciera escrito su nombre en la portada, se conjugaron para hacer pensar que el libro era suyo. Sin embargo, se ha puesto en cuestión esta autoría, al comprobarse que el contenido del texto y su léxico correspondían a un autor de origen aragonés. La identificación que hicimos de este autor con el aragonés Pedro Juan de Lastanosa, basada en una abundante documentación que lo probaba sin lugar a dudas, provocó una absurda polémica por parte de algunos que negaron rotundamente la autoría de Lastanosa, y mantuvieron que el autor era una especie de técnico práctico ignorante, aislado en las montañas de Aragón que, naturalmente, no han logrado encontrar.

Por este motivo, García Tapia creyó interesante comparar algunas partes del manuscrito español con ciertos pasajes del código Leicester de Leonardo da Vinci, advirtiendo que, en este caso, el conocimiento de los textos vicianos por parte de Lastanosa sólo pudo realizarse de forma indirecta a través de fuentes comunes, consultadas seguramente durante su estancia en Italia.

6.2.1. Obstáculos en una corriente.

Uno de los estudios de hidráulica más notables de Leonardo es la visualización de remolinos tras un obstáculo. En el caso particular de las pilas de los puentes, Leonardo se refiere a ellas en varias ocasiones en el código Leicester (fols. 9r. y 16v.):

"Todos los puentes caen en sentido inverso a la corriente de agua que percute sobre él, destruyendo su cimentación." (fol. 16v.-2). En “Los veintiún libros...” hay también varias citas a remolinos tras un obstáculo en una corriente. En el caso de un puente, se dice lo siguiente:

"... a la parte detrás de las pilas se hacen ordinariamente unos remolinos de aguas, los cuales suelen llamar algunos revolvimientos, y aún se acumula mucha más agua en las popas, que no hace en las proas, y estos remolinos suelen hacer muy grandes daños en las popas o en la parte detrás de las pilas, porque suelen ir cavando el suelo del río...". Añade Lastanosa cómo por esta causa el puente puede caer hacia atrás, en sentido inverso de la corriente. (fols.367v-368r.).

Además de la observación de la formación de remolinos tras un obstáculo, está el interés del autor español por el efecto dañino que esta disipación de energía turbulenta puede tener en los puentes, justificando así formas de pilas que eviten en lo posible los remolinos traseros. Lastanosa, con ciertas limitaciones, conocía cualitativamente, como Leonardo, la diferencia entre "remolino" (vórtice en sentido actual), "revolvimiento" (retroceso de una corriente) y "regolfo" (giro de una masa de agua en equilibrio relativo en un recipiente cilíndrico). Sin embargo, a diferencia de Leonardo, su interés se dirigía más hacia los efectos prácticos en las obras de ingeniería hidráulica que hacia el fenómeno de turbulencia en sí mismo.

6.2.2. Sifones.

En varias ocasiones Leonardo se ocupa de los sifones. (Por ejemplo en el código Leicester en los folios 34v. y 16r.). Dice, entre otras cosas:

"... la experiencia nos muestra que si la descarga del sifón no está más abajo que su entrada, nunca saldrá el agua por la tubería"

En el caso de "Los veintiún libros..." el análisis del sifón se realiza para demostrar, por analogía y realizando luego la experiencia, como hizo Leonardo, que el agua en una conducción no puede alcanzar jamás la altura de partida, a causa de lo que hoy llamaríamos pérdida de carga. Así, dice que:

"... ello (la pérdida de altura del agua) se puede ver con facilidad por la experiencia de los sifones de vidrio, en los que el agua jamás sube tan alta como baja..." (fol. 121v.-122r.).

La experiencia fue realizada, en efecto, por Lastanosa y la pérdida de nivel relativa cuantificada como de una parte sobre nueve. Evidentemente, el valor de la pérdida de carga no es válido para todas las velocidades y diámetros del tubo. Pasarían varios siglos hasta que se hiciesen experiencias para intentar establecer una ley de pérdida de carga. (Leyes de Chezy, Darcy, Manning, Nikuradse, Colebrook, etc.).

Sin embargo, no era tan evidente en la época este concepto de pérdida de energía del agua en las conducciones. Entre los hidráulicos prácticos se dieron muchos casos de fracasos en los abastecimientos de agua a una población a causa de no tener en cuenta la necesidad de disponer de un desnivel suficiente.

6.2.3. Origen de los ríos.

Leonardo se refiere en varias ocasiones, entre ellas en el código Leicester (fols. 3r, 3v y 33v), al origen de los ríos, examinando las distintas explicaciones conocidas en la época. Rechaza la teoría de que el diluvio universal era el causante de la aparición de conchas marinas por encima del nivel del mar. Leonardo se adhiere, en cambio, a la hipótesis de que las ramificaciones de agua subterránea, a causa del calor interno de la tierra, ascienden hasta la superficie donde se condensan para formar los ríos, igual que en un alambique. Este calor interno, según él, es la causa de los temblores de tierra y de los volcanes, entre otros efectos naturales.

Curiosamente, el autor de "*Los veintiún libros...*" coincide plenamente con Leonardo da Vinci en esta explicación del origen de los ríos. Lo mismo que el italiano, Lastanosa rechaza todas las teorías existentes, después de examinarlas a la luz de la razón y de la experiencia. Es muy crítico con las enseñanzas bíblicas que no se ajustan a la realidad. Establece que las conchas marinas provienen de antiguos animales hoy desaparecidos y petrificados. Perfila una teoría evolutiva en la formación de valles y montes y, finalmente, atribuye el origen de los ríos al calor interno de la tierra que hace ascender las corrientes subterráneas por "*los canales de la tierra*" (libro 1, fol. 8r.), donde se condensa como en un alambique.

También igual que Leonardo, Lastanosa atribuye los terremotos y otros fenómenos a las corrientes subterráneas de agua caliente y narra experiencias vividas por él durante su estancia en Nápoles.

6.2.4. Ascenso del agua en una vasija por medio del calor.

Ligado a lo anterior está una experiencia de Leonardo con una vasija caliente (Leicester, fol. 3v.). Sobre el dibujo anota: "*carbon di fuocho*" (carbón del fuego), y la nota que lo acompaña explica que si se coloca un carbón ardiente sobre una vasija con un receptáculo de agua, el calor del carbón forzaría a que el agua suba desde el nivel inferior al superior, porque el aire se consume por el calor y el agua subirá al vacío. Leonardo no explica cómo se forma el vacío, fenómeno desconocido en la época.

Idéntico experimento es realizado por Lastanosa en "*Los veintiún libros...*" (Libro 2, fol.28r.). Con una vasija calentada por la parte de arriba, hace elevar el agua. Tampoco se explica aquí el efecto del vacío. Pero, esta vez, la experiencia tiene una finalidad práctica: la de buscar el agua subterránea, para lo cual se introduce el cuello de la vasija a cierta profundidad en la tierra y se observa si asciende hasta arriba llenando el vacío. Lastanosa no va más allá ni en sus conclusiones ni en la aplicación, pero los principios de las futuras máquinas de vapor empezaban a percibirse. Unas décadas después, en 1606, un español, Jerónimo de Ayanz, aprovecharía esta experiencia para proyectar y diseñar lo que iba a ser el primer ingenio de vapor patentado y utilizable para desaguar una mina.

Hay que decir también que esta experiencia para buscar agua se seguía recomendando a principios del siglo XVIII por Teodoro Ardemans que la había aprendido precisamente en "*Los veintiún libros...*".

6.2.5. Estructuras de ingeniería sobre ríos: puentes, presas y sistemas de cimentación.

En las anotaciones de Leonardo se estudian las estructuras necesarias para reforzar las márgenes de los ríos, desviar la corriente, hacer una presa de embalse para uso de un molino o incluso la forma de construir un puente para pasar sobre un río. Todo esto entra dentro de la ingeniería del agua en el siglo XVI.

En el código Leicester hay dibujado un puente con un aliviadero en forma de óculo circular (fol 7r.) que aparece de forma similar en "*Los veintiún libros...*" (libro 18, fol. 373r.). Leonardo explica también cómo se construyen las presas (fols. 7r., 27v. y 28v. del código Leicester). Dice, por ejemplo, cómo se deben emplear unas grandes estacas de madera clavadas verticalmente cada cierto trecho, trabadas horizontalmente con leños y troncos con sus ramas, todo ello cargado con ripios y piedras. Este tipo de presa corresponde a la que el autor de "*Los veintiún libros...*" llama "azud de selva" que se construye de la siguiente forma, según Lastanosa:

"... se van hincando estacas de palo en el suelo del río, cuando el suelo no es de peña, y en este azud, después de ser hincados los palos, se van entretejiendo de ramas y piedras..." (libro 9, fol. 154r.).

Coincidencias parecidas se extienden a otros tipos de azudes de los anotados por Leonardo, con los explicados en "*Los veintiún libros...*".

Para clavar los pilotes a fin de cimentar los puentes y las presas, Leonardo describe una serie de instrumentos en el código Leicester (fols. 28v., 10v. y 21r.). El martinete se expone en varias figuras al margen (fol. 28v.), suspendido de una cuerda que pende de una polea. Leonardo sugiere atar a una viga la otra extremidad de la cuerda, de la cual están suspendidas veinte cuerdas más, de las que tiran veinte hombres, para poder subir así un martinete que

pesa 4000 libras. La figura pequeña en el margen central muestra la plataforma para los veinte hombres, con una escalera para permitir una mayor elevación al pisón, y por tanto una energía mayor en el golpe. Los dos diseños en el margen, ilustran un sistema alternativo de martinete considerado por Leonardo de menor eficacia porque es movido por un solo hombre.

Otro martinete lo expone Leonardo en el folio 10v, donde se dibujan también los pilotes terminados en punta. En el folio 21r se indica una máquina de clavar pilotes con un pisón guiado por una plataforma oblicua para clavar pilotes inclinados.

Las máquinas de clavar pilotes eran conocidas en Italia en la época de Leonardo. El "ingeniero-arquitecto" Juan Bautista de Toledo, trajo algunos modelos de Italia al objeto de emplearlos en algunas obras que se hacían en torno a Madrid y Aranjuez. En particular, utilizó una máquina que tenía un hierro largo del que pendían veinte cuerdas para poder tirar de él veinte hombres, lo cual coincide con la de Leonardo, tanto en el funcionamiento como en el número de personas que lo manejaban. Esta máquina fue perfeccionada por un carpintero flamenco que trabajaba en España, llamado Juan de Bruselas, que ideó una máquina para clavar al tiempo cinco pilotes de cimentación de un puente, empleando para ello cinco mazos que se movían simultáneamente. Este "ingenio" superaba a los ideados por Leonardo y Juan Bautista de Toledo, causando una gran admiración entre los que lo vieron funcionar.

Las máquinas de clavar pilotes están descritas en libros y manuscritos españoles del siglo XVI, como los de Pedro Juan de Lastanosa y los de Cristóbal de Rojas para hacer fortificaciones, y su construcción es parecida a la descrita por Leonardo, salvo en los aditamentos de las barras de amarre y la escalera donde se situaban los operarios. También se dibujan y describen las estacas de pilotes terminadas en una punta forrada de hierro que coinciden con los dibujados en el códice Leicester.

6.2.6. Molinos y máquinas hidráulicas.

En el códice Leicester apenas si hay alguna mención a molinos, solamente un diseño en el folio 30v que representa los diversos niveles de una caída de agua, probablemente en relación al molino de San Niccolò, en Florencia. Pero el tema de los molinos interesó ampliamente a Leonardo y a otros ingenieros de su época. El funcionamiento de molinos a diversos niveles (similar al de Leonardo) es analizado extensamente por Pedro Juan de Lastanosa en "*Los veintiún libros...*" (libro 11, fols. 300r.-302v.), en los que un mismo recipiente cilíndrico o "cubo" sirve para alimentar una serie de cuatro molinos, lo cual Lastanosa atribuye a su propia invención. El cubo permitía acumular el agua que funcionaba como un depósito con un orificio en su base por el que salía el agua. Este caso es profusamente analizado por Leonardo, y aparece un dibujo incluso en el mismo folio del códice Leicester, al lado del dibujo del molino. La velocidad de salida del agua por el orificio de un depósito es considerada por Leonardo como proporcional al peso del agua que queda por salir, lo que establece una relación, generalmente no tenida en cuenta en la época, aunque sin llegar a establecer la ley de altura con el cuadrado de la velocidad que descubriría Torricelli en el siglo XVII.

Lastanosa, en su manuscrito, como Leonardo, establece una relación de proporcionalidad entre la altura del cubo del molino y la velocidad del chorro de agua, aunque sin llegar tampoco a la ley de relación al cuadrado.

En la alimentación de los molinos situados a distinto nivel, el autor de "*Los veintiún libros...*" pone de manifiesto la existencia de una pérdida de energía, aunque sin cuantificarla en esta ocasión.

El estudio de los molinos constituyó la preocupación principal, no sólo de Lastanosa, sino de numerosos inventores españoles del siglo XVI. El manuscrito de Francisco Lobato, al que nos hemos referido antes, está casi por completo dedicado al estudio de los molinos. Se

trata de un texto de anotaciones personales y dibujos que no iba destinado a la imprenta. De esta forma, podemos conocer de primera mano lo que pensaba en materia de tecnología un personaje del pueblo con escasa formación. A pesar de ello, Lobato llega a dar forma aerodinámica a los álabes de un molino, e intuye la noción de la reacción del agua a la salida del rodete, diseñando una anticipación de lo que sería después la turbina hidráulica de reacción. El método de Lobato para descubrir y observar las cosas, nos recuerda, salvando las distancias, al de Leonardo, a pesar de que es difícil que llegase a ver nunca un escrito del italiano.

6.3. Ingenios y proyectos hidráulicos en los manuscritos de Leonardo.

6.3.1. Sistema del portón de cierre del canal (CA_0656r).

Tal y como aparece en diversas ocasiones en el Códice Atlántico, el problema de la navegación fluvial de las embarcaciones fue un tema recurrente para Leonardo.

Como más adelante veremos en este capítulo, proyectó un canal desde Florencia al mar que aunque no llegó a realizarse, muestra a las claras su audacia y capacidad para realizar planes que en su tiempo podían ser considerados como utópicos.

Sea cual fuere el grado de utopía, al discurrir el río por distintos niveles, se hacía necesaria la articulación de canales con sistemas de cierre para poder pasar el agua en la dirección apropiada, de manera que se igualaran los niveles de modo adecuado para que así los barcos pudieran superar los desniveles. Pero evidentemente, no era esa la única aplicación, pues el sistema de esclusas debía regular los flujos de agua, tan necesaria para la agricultura de la región.

En la zona lombarda eran conocidos trabajos de este tipo y Leonardo perfeccionó los sistemas de cierre y apertura de las puertas o portones para los canales. De hecho diseñó distintos modelos de entre los que se ha elegido el que aparece en la figura adjunta.

Según se puede observar, en la parte inferior dispone de una pequeña puerta secundaria, a modo de escotilla, que se puede abrir por medio de un pestillo o cerrojo controlado desde la parte superior por medio de una cuerda y una polea; cuerda que puede ser fijada. Al abrir el pestillo, permite el paso del agua, de modo y manera que se vayan equilibrando progresivamente las presiones a ambos lados y así la puerta principal pueda ser abierta sin dificultad.

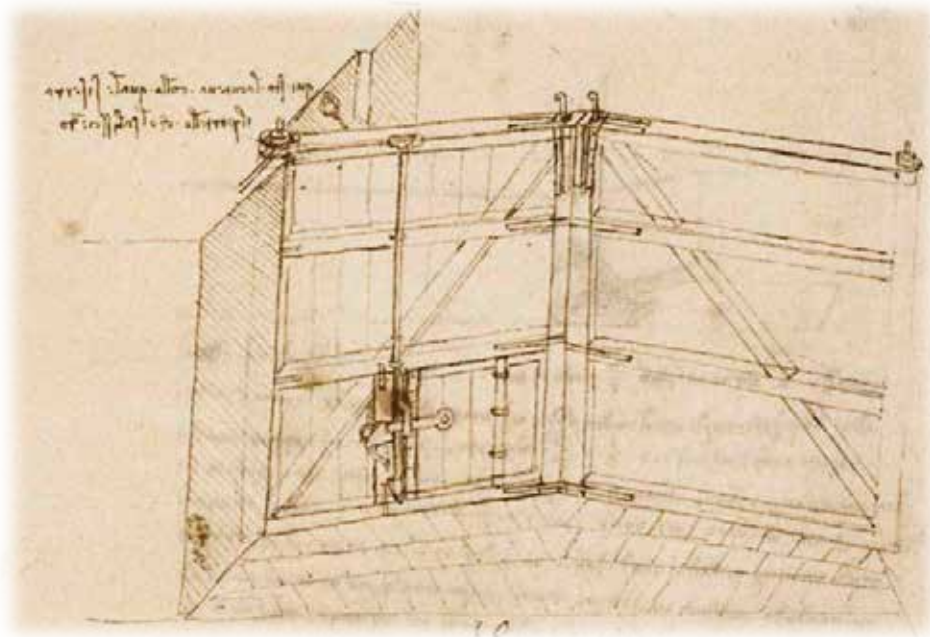


Figura 6.1: Sistema de portón de cierre de canal.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0656r

6.3.2. Desvío del curso del río Arno alrededor de Pisa (CM2_0052v y CM2_0053r).

Ocupando el cargo de ministro de la guerra en Florencia, Maquiavelo que conocía a Leonardo, debió proponerle la idea de la desviación del Arno con objeto de privar a los pisanos de su acceso desde el mar de Liguria en el golfo de Génova, todo ello dentro de la campaña militar contra Pisa. Leonardo que había trabajado también como ingeniero militar, realizó una serie de estudios preparatorios.

En dos folios contiguos del Códice de Madrid II (52 recto y 53 verso) dibujó el plano de la desembocadura del río Arno y el área de operaciones militares alrededor de Pisa. No hay ningún tipo de explicación adicional salvo las puramente toponímicas y una referencia que aparece en el folio l (verso) del mismo código, donde viene señalado lo siguiente: "*Nivelación del Arno realizada el día de la Magdalena de 1503*". En este folio aparecen otra serie de anotaciones entremezcladas, que nada tienen que ver con lo anterior. Sin embargo, parece ser que el proyecto fue planificado con todo detalle, calculando incluso el número de trabajadores y días necesarios para llevar a cabo la tarea. En todo caso, a pesar del interés de Maquiavelo, los trabajos no se llevaron a cabo. No está claro cuál fue la opinión de Leonardo, aunque parece ser que fue bastante crítico e indeciso al respecto.



Figura 6.2: Desvío del curso del río Arno alrededor de Pisa.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid II, f. 0052v y f. 0053r

6.3.3. Canal de Florencia al mar (CM2_0022v y CM2_0023r).

En el Códice de Madrid II aparece materializada la idea de un canal artificial que uniera Florencia con el mar.

Tal y como se puede apreciar en la parte superior, Leonardo estudió varias alternativas entre Florencia y Pistoia. Y desde este punto, propuso rodear el Monte Albano y cortar mediante un túnel en el paso de Serravalle. Como curiosidad podemos decir que esta propuesta fue tenida en cuenta cuatrocientos cincuenta años más tarde, por los constructores de la autopista de Florencia al mar.

En realidad, la idea de unir Florencia con el mar por medio de un canal era vieja. Parece ser que ya en el año 1347 la había planteado el gobierno de la ciudad, y debió de ser replanteada en vida de Leonardo. Cuando éste la estudió, parece ser que tenía en mente objetivos de tipo económico y no de tipo militar como en el caso citado en el apartado anterior. Precisamente, en el mapa de la región de Toscana en los folios 22 (verso) y 23 (recto) del Códice Madrid II donde aparece el discurrir del río Arno entre Florencia y Pisa, Leonardo escribió la siguiente anotación: *"La ley dice que el que quiera construir molinos podrá pasar el agua por todo terreno, pagándola el doble de su valor"*.

Analizando actualmente el problema entonces planteado, podemos concluir que, dada la naturaleza del recorrido, la diferencia de niveles, y la necesidad de construir esclusas de grandes dimensiones, era excesivamente dificultoso para la época. No es de extrañar que la empresa fuera muy pronto abandonada.



Figura 6.3: Canal de Florencia al mar.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid II, f. 0022v y f. 0023r

6.3.4. Excavaciones para construcción de canales (CM2_0010r, CM2_0010v, CA_0003r, CA_0004r).

Los trabajos de desviación del curso de los ríos y preparación de canales demandaban un trabajo ingente de excavación y movimiento de tierras, motivo por el cual Leonardo diseñó diversas máquinas para facilitar los trabajos de excavación. En realidad, más que para excavar, las máquinas reflejadas en el Códice Atlántico, folio 3 (recto) debían servir para levantar y transportar el material de excavación, ayudando notablemente la labor de los hombres.

No sólo diseñó las máquinas sino que también definió el método de trabajo que habían de seguir los trabajadores para aprovechar mejor su esfuerzo, tal y como quedó reflejado en los esquemas de escalonamiento de la excavación, del Códice de Madrid II, folio 10 (recto y verso). Respecto al número de cavadores necesarios, escribió los siguientes comentarios: “*Las dos varas del fondo piden 13 hombres para arrojar la tierra fuera del foso. Y en las primeras que tienen una vara de alto piden un hombre*”. También estudió distintos casos: “*Cuando la excavación sea de 16 codos de ancho se tendrán que colocar 4 filas de hombres de las cuales sólo las dos de fuera son las que arrojan la tierra al exterior y las otras dos filas, colocadas en el medio de la fosa, son las que arrojan la tierra a los que están colocados a la orilla de la excavación; los cuales también junto a los otros, la arrojan fuera de la fosa*”. Y así va realizando distintos cálculos. En el plan para desviar el Arno anteriormente citado, aparecía un canal de 60 pies de ancho y 21 pies de profundidad (unos 18 m y 6 m respectivamente) a lo largo de 7 millas (alrededor de 11 km). Era una labor realmente ingente. Calculó que serían necesarios dos mil trabajadores durante seis meses, cálculo en el que erró en un factor de cinco.

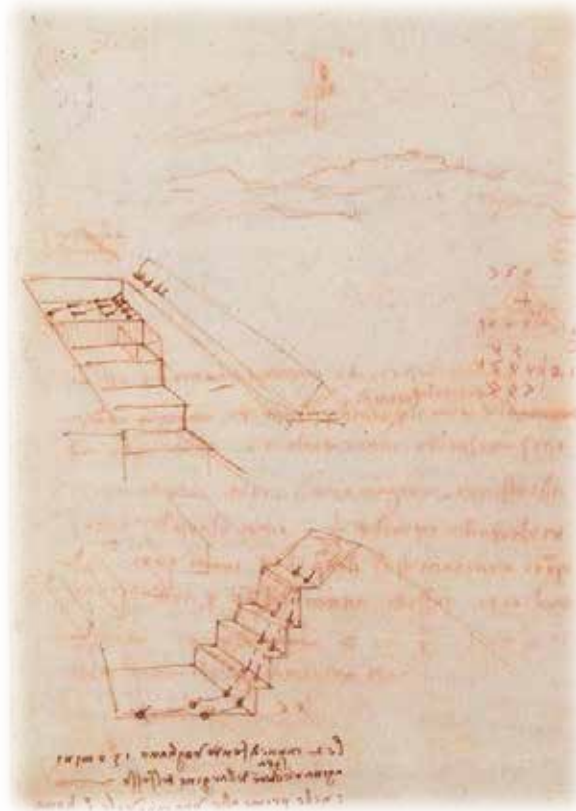


Figura 6.4: Canal de Florencia al mar.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid II, f. 0010v

Es posible que las gigantescas máquinas dibujadas en el Códice Atlántico, folio 3 (recto) y folio 4 (recto), fueran diseñadas para ser utilizadas en este caso, pues Leonardo era consciente de la ineficacia de llevar a cabo la excavación en base únicamente a las palas manejadas a mano. Merece comentario aparte la primera de las máquinas en la que pueden observar dos grúas con los brazos anteriores de diferente longitud que pueden casi operar con un sistema de contrapesos a dos o más niveles de excavación. Los brazos pueden además rotar 180 grados de modo que puede cubrir la anchura total del canal. Según se ve en la base, en este caso la máquina está montada sobre una parte móvil y la parte que avanza es la que realiza el trabajo.

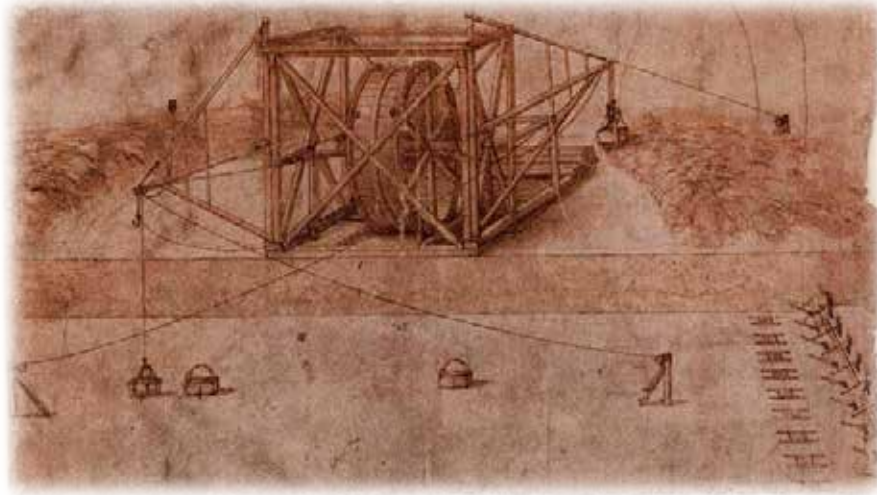


Figura 6.5: Grúa excavadora de canal.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0003r

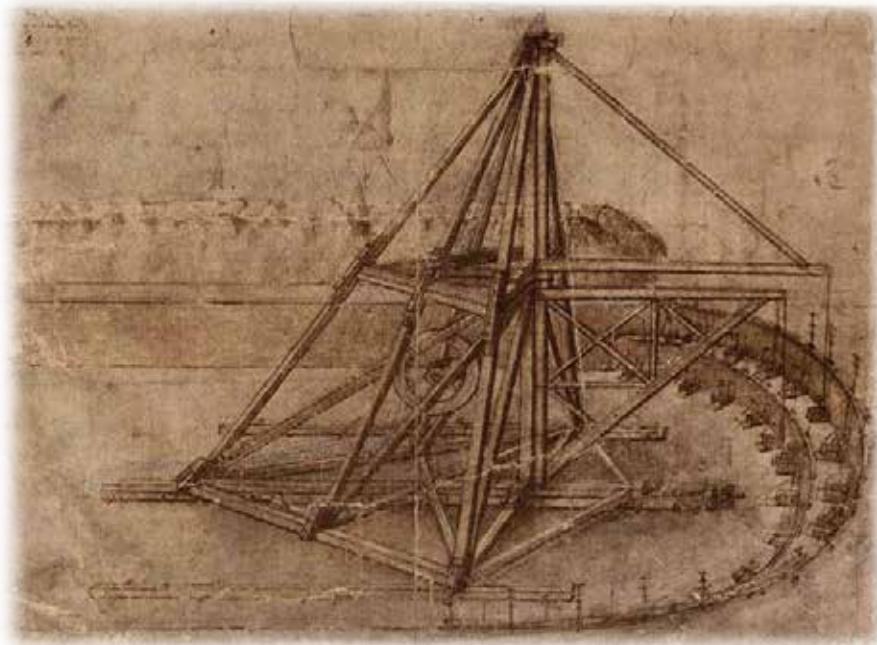


Figura 6.6: Grúa excavadora de canal.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0004r

6.3.5. Draga (MsE_0075v).

Así como en los apartados anteriores nos hemos referido a los trabajos de excavación para la construcción de nuevos canales, en este caso nos referimos a un sencillo y práctico diseño de draga para limpieza de canales.

El mecanismo de la draga se fundamenta en la acción de un tambor que es accionado mediante una manivela. El tambor dispone en dirección radial de cuatro palas excavadoras que penetran bajo el agua para extraer y recoger el barro o fango del fondo del canal. El tambor está instalado en un eje que tiene sus apoyos de cada lado en sendas barcas, separadas convenientemente para que puedan actuar las palas, y entre las que puede intercalarse una tercera barca que habrá de cargar para posteriormente acarrear el material extraído. El sistema se completa con unas cuerdas atadas al eje del tambor y a la orilla, que se van enrollando en la medida en que gira el tambor y así ir limpiando el fondo del canal. Aunque en este diseño no queda reflejada ni es evidente esta posibilidad, es posible regular la altura del eje, con lo que se conseguiría regular la profundidad de la excavación. Como curiosidad, digamos que un modelo de esta draga construido a escala, puede ser contemplado en el museo de Milán.



Figura 6.7: Draga.

Institut de France (Paris), Manuscrito E de Francia, f. 0075v

6.3.6. La excavación del túnel de Serravalle (CM1_0110v y CM1_0111r).

Tal y como hemos citado anteriormente, Leonardo pensó en hacer un túnel por debajo de Serravalle. Para ello se planteó el problema de la nivelación de la galería, como se puede observar en el estudio realizado en el Códice de Madrid I, folio 110 (verso).

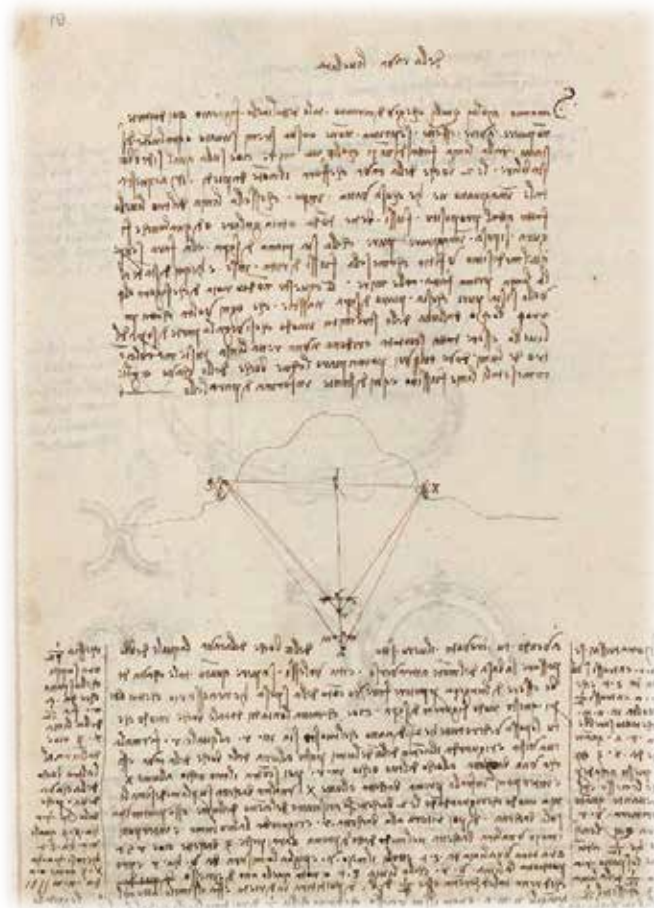


Figura 6.8: Excavación del túnel de Serravalle.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0110v

Al mismo tiempo Leonardo reflexionó sobre los problemas que surgirían al hacer el túnel e ideó un método para resolverlos. Para ello inventó un instrumento adecuado y escribió las siguientes explicaciones en el recto del folio 111:

"Método para horadar una montaña. Utiliza este instrumento cuando quieras horadar una montaña, de modo que, empezando a horadar por ambos lados de la montaña, las perforaciones se junten sobre la misma línea. Pero toma antes los niveles en las entradas de la perforación, luego, utilizando el mencionado instrumento o nivel, determina la altura de las bocas. Para volver a nuestro caso y enseñarte sus principios, colócate primero en la mitad de la montaña donde vaya a estar la primera boca, y planta una vara en el lugar donde te encuentres. Luego coloca otra vara entre la primera y el centro de la boca, que se señalará mediante una luz, de manera que estén en una misma línea. Esta primera vara la denominaremos h . Después te irás a la parte opuesta de la montaña, hasta un lugar desde el cual sea visible el sitio de la boca opuesta, que será f , y planta en t otra vara, esto es en un punto donde f sea visible. Y la vara t se plantará alineada con las primeras varas h y r . Luego alineando con la mirada las varas r y t , se verá el sitio donde se va a hacer la segunda boca, sobre la luz f . Y así, plantando a lo largo de la línea muchas varas, encontrarás las

perpendiculares de las alturas de las bocas. Quedan ahora por determinar sus alturas. Para esto utilizarás el instrumento aquí figurado. Harás colocar dos luces en los lugares donde creas que puedan estar las 2 bocas opuestas de la perforación. Luego te colocarás con tu nivel, en un lugar desde el que puedas ver las dos luces. Planta después tu nivel en el suelo y enderézalo utilizando la plomada. Luego lo subes y lo bajas hasta poner el centro de una de las luces sobre la línea b c del nivel. Asegura ahora el nivel mediante su tornillo. Haz que las luces de las dos lámparas tengan sus centros en línea con el nivel b c. Después date la vuelta en dirección a la luz de la segunda boca, teniendo en tu mano una luz, que subirás o bajarás de acuerdo con lo que desees que haga con su linterna el guardián de enfrente, con el cual te habrás puesto antes de acuerdo. Y cuando la luz esté donde debe, cubre tu linterna y entonces tu compañero comprenderá que la suya se encuentra en el sitio correcto. Y debes saber que las dos luces han de ser linternas o lámparas, para evitar que vaya quedando más abajo la luz al consumirse. Y cuando perfores la boca, trata siempre de ver alineadas 2 o 3 varas frente al centro de la boca de la perforación. Si una de las bocas ha de estar más alta que la otra, mantén tu nivel inclinado en la misma oblicuidad y guíate por ella".

Aunque la cita ha sido larga, creemos que merece la pena observar la meticulosidad de Leonardo en su descripción metodológica, en lo que sería una especie de manual de uso del instrumento.

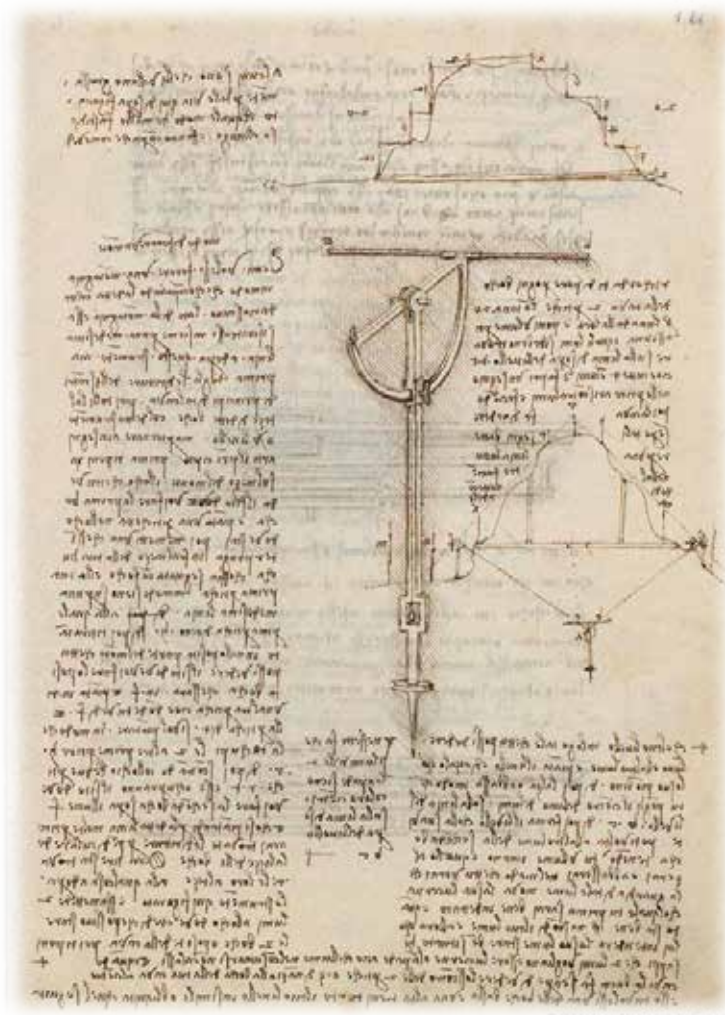


Figura 6.9: Excavación del túnel de Serravalle.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0111r

6.3.7. Escafandra y respirador (CA_0909v y CAr_0024v).

Desde muy antiguo se había considerado la posibilidad de caminar sobre el agua, como está recogido en códices medievales y también en algunos escritos de Arquímedes. Incluso se había imaginado la posibilidad de descender bajo el agua y permanecer dentro por un periodo largo de tiempo. Por tanto, no fue Leonardo el primero en estudiar el tema, pero sí se le ha de reconocer la autoría de nuevos diseños de diversos artilugios que aparecen dibujados en el Códice Atlántico, en el Códice Arundel o en el manuscrito Ms. B de Francia. Entre los más característicos, citaremos los flotadores similares a los actuales, el salvavidas que colocado alrededor del cuello protegía fundamentalmente la boca para poder respirar con mayor seguridad, las raquetas flotantes a modo de zapatos ayudados por bastones al estilo de los esquís de hoy en día, y las aletas de tipo palmípedo que curiosamente Leonardo diseñó a modo de guantes para las manos a diferencia de las usuales en nuestros días, que como todos sabemos se colocan en los pies. Y es que, según se ve, parece ser que una de sus pretensiones era la de dominar en la medida de lo posible la fuerza del agua.

Para completar esta lista presentamos aquí dos de sus diseños singulares. En el primero de ellos, que aparece en el Códice Atlántico, folio 909 (verso) podemos ver una máscara o escafandra que cubre no solo la cabeza de la persona que lo use sino también su cuerpo, aunque en el dibujo no se aprecia más que la parte superior del mismo. Según parece, habría de ser realizada en piel perfectamente cerrada, pues por lo que se aprecia en la bolsa pectoral, debía estar inflada con aire para así aumentar su volumen, posiblemente para aprovechar el principio de Arquímedes de la flotación.

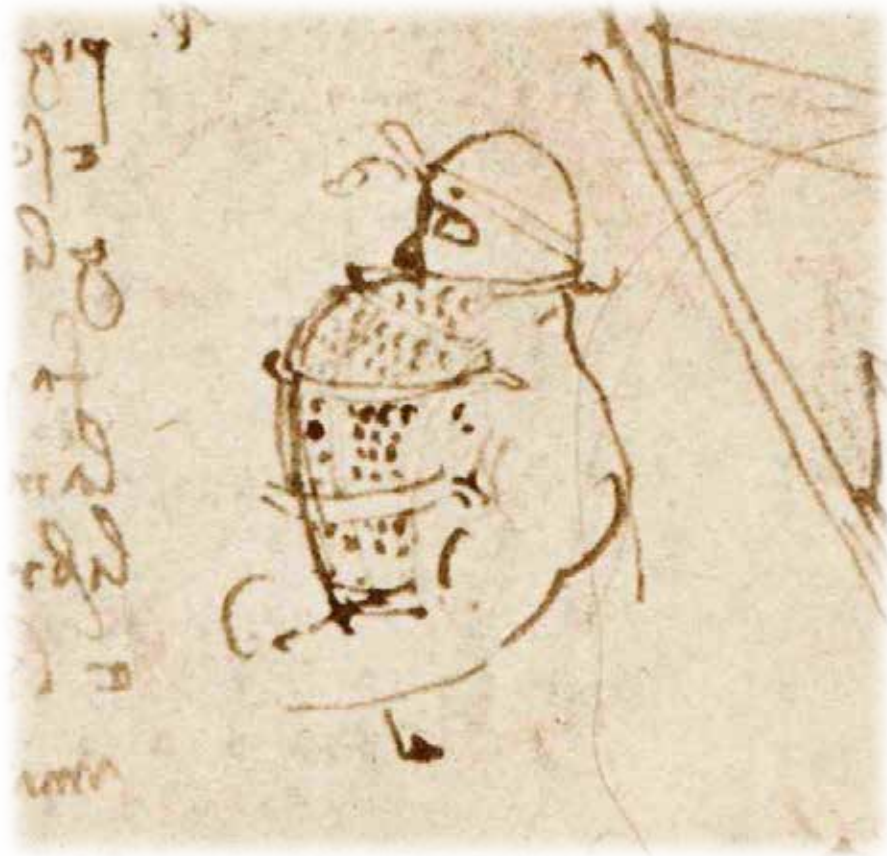


Figura 6.10: Escafandra.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0909v (detalle)

En la segunda figura que pertenece al Códice Arundel, folio 24 (verso), está diseñado un conjunto de escafandra y tubos respiradores, que comunican la capucha con la superficie a través de dos tubos flexibles. En la parte superior aparece una especie de campana protectora flotante. Los tubos serían preferiblemente de caña hueca conectada por piel en las articulaciones. También diseñó las válvulas para la entrada y salida de aire, y en ninguno de los dibujos olvidó las aberturas para los ojos aunque no está clara la forma de evitar la entrada de agua por las mismas.

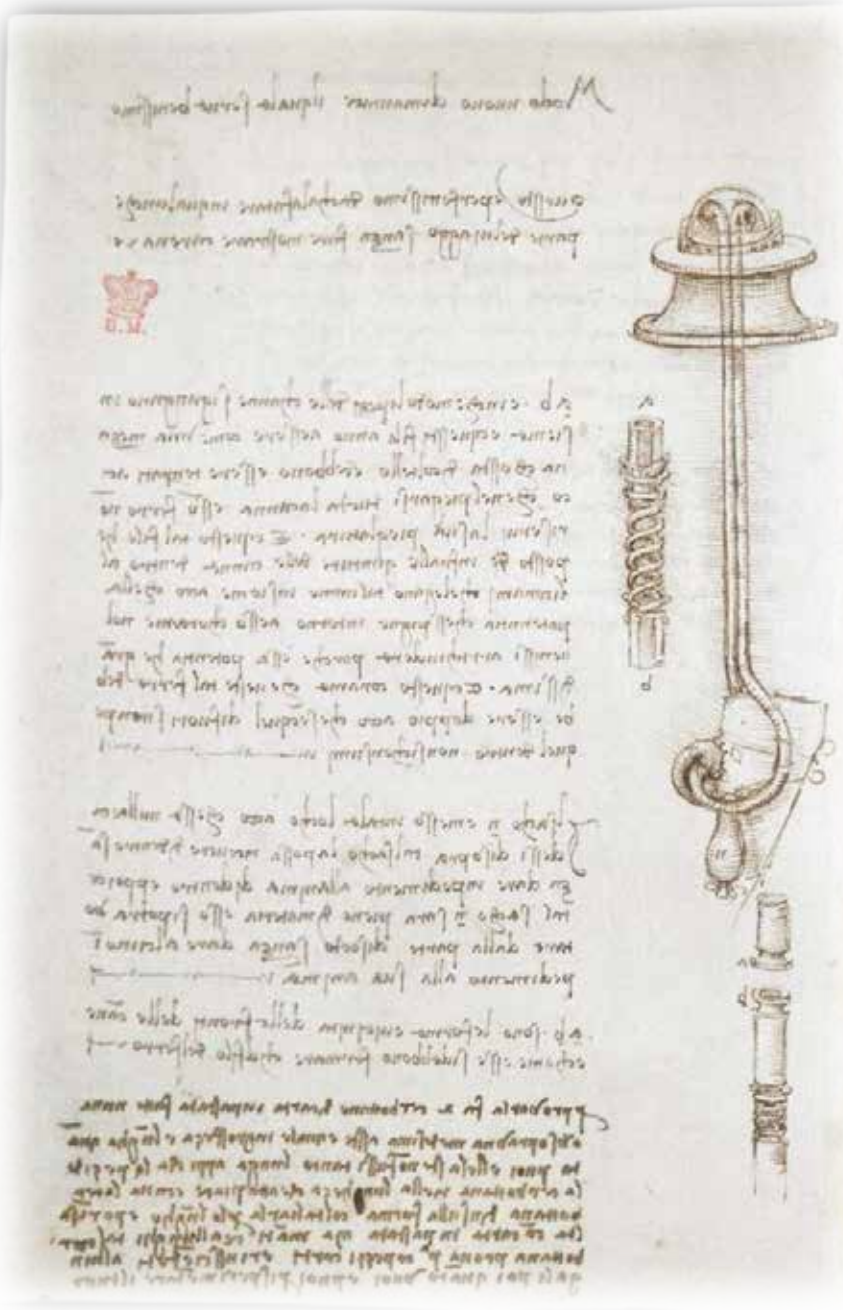


Figura 6.11: Escafandra y tubo respirador.
British Museum (Londres), Códice Arundel, f. 0024v

6.3.8. Estudio de la forma de los peces y la dinámica de los barcos (MsG_0050v y CM2_0035r).

En diversos diseños reflejados en el Códice Atlántico y en el Ms. B, Leonardo estudió tanto la forma de los cascos de los barcos como el accionamiento de los mismos, ya fuera por medio de palas accionadas mediante manivelas o mediante velas para ayudarse de la fuerza del viento, todo ello con el objetivo de hacer más fácil la navegación.

En cuanto a la forma más adecuada o, como podríamos decir hoy en día, hidrodinámica, Leonardo tomó como modelo la forma de los peces, tal como se puede observar en la serie de dibujos del Ms. G, folio 50 (verso).

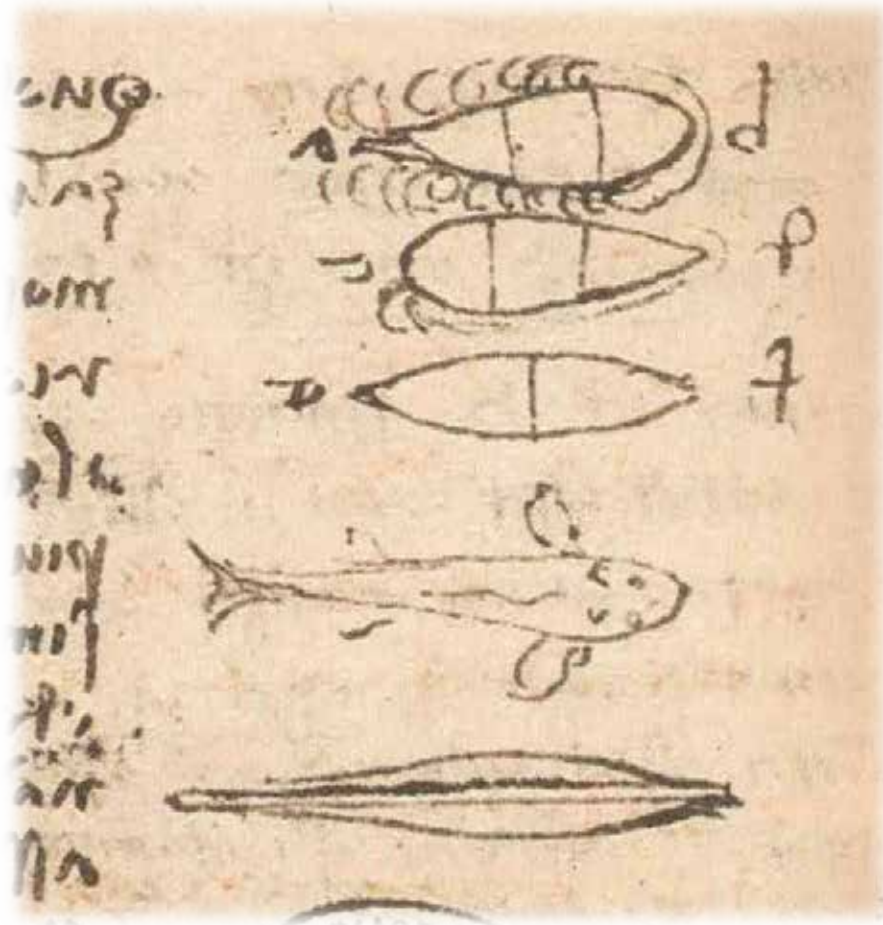


Figura 6.12: Estudio hidrodinámico.

Institut de France (Paris), Manuscrito G de Francia, f. 0050v

Por otro lado, en el caso de los barcos de vela del Códice de Madrid II, folio 35 (recto), Leonardo estudió la dirección del viento en dos casos, para reflexionar sobre la posición relativa de la vela y el centro de aplicación de la fuerza. Refiriéndose al primer dibujo escribió: *"Camina hacia el siroco con el viento greco, y la potencia del viento se aplica en f"*. Respecto al segundo dibujo: *"Ésta viene desde siroco con el viento greco, y la potencia del viento se aplica en g"*.

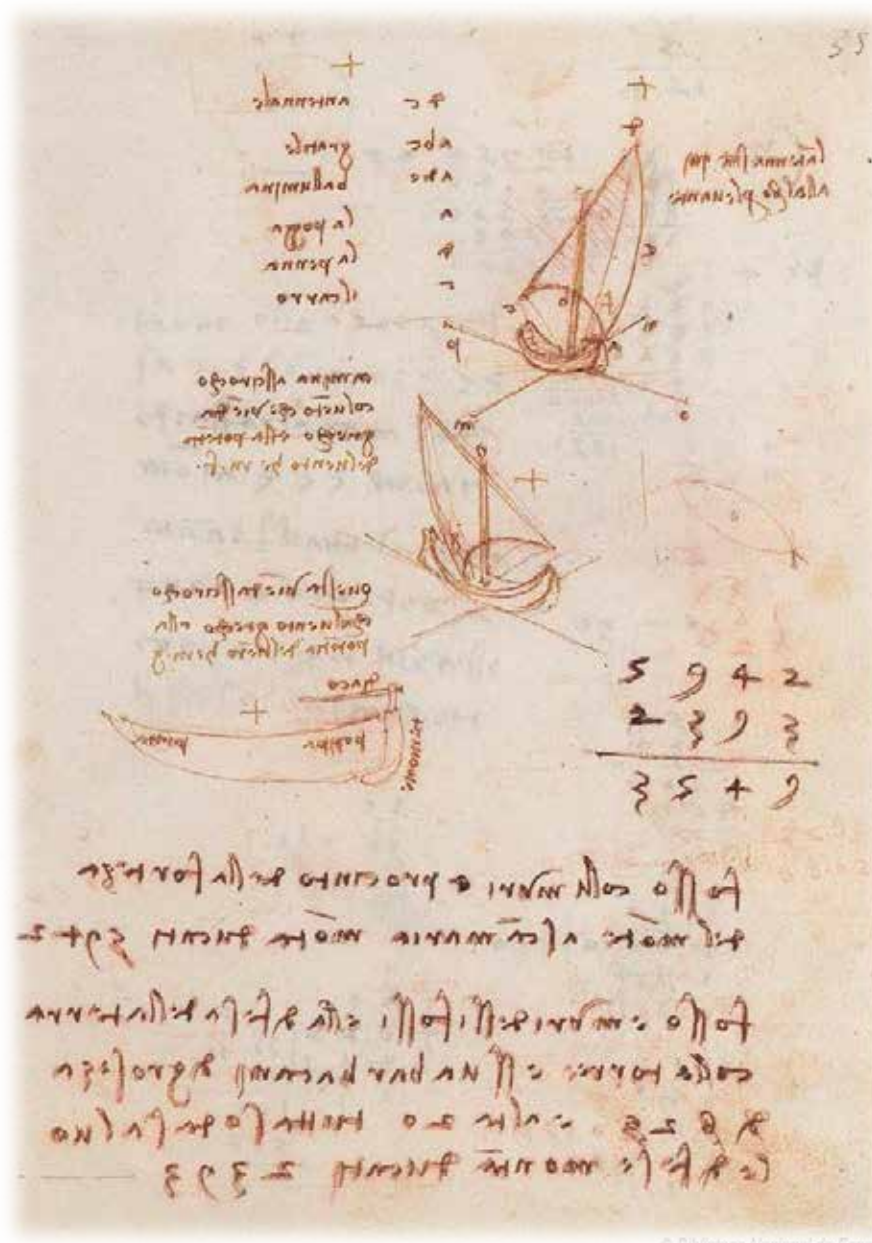


Figura 6.13: Dinámica de los barcos.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid II, f. 0035r

6.3.9. Movimiento de los fluidos. (CM2_0024r, CM2_0064r, CM1_0134v, CM1_0151r y CM1_0152r).

Leonardo fue un gran observador y, en el caso del movimiento de los fluidos, partió de la observación directa del mismo, tanto en la naturaleza, donde analizó el de los remolinos y el de las olas del mar, como en pequeños montajes experimentales destinados a estudiar la efectividad del agua para mover los molinos. En los Códices de Madrid aparecen numerosos dibujos dedicados al estudio de estas cuestiones, algunos de los cuales serán citados a continuación.

En cuanto al movimiento de las olas del mar en los folios 24 (recto) y 64 (recto) del Códice Madrid II aparecen los siguientes dibujos acompañados de los correspondientes comentarios entre los que destacaremos el segundo de ellos, por la descripción cualitativa del fenómeno. Dice así: *"La ola del mar que percute en la orilla oblicua se rompe contra ella con ímpetu. Después de romperse consume su ímpetu al correr por la playa antes batida. Al volver atrás embiste la base de la ola siguiente y la retrasa. Por lo tanto caminando más la cresta que la base de la ola llega un momento que carece de base y se desploma sobre ella entrando bajo la espuma que queda atrás. Esta espuma marcha hacia la base de la ola siguiente"*.



Figura 6.14: Estudio del movimiento de las olas del mar.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid II, f. 0024r (detalle)

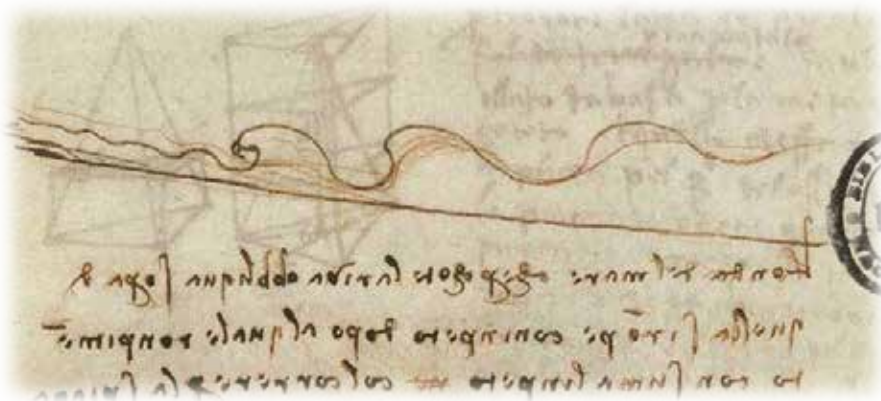


Figura 6.15: Estudio del movimiento de las olas del mar.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid II, f. 0064r (detalle)

En las figuras del Códice Madrid I, folios 134 (verso), 151 (recto), 152 (recto) Leonardo estudió experimentalmente las distintas caídas del agua, analizando las condiciones para alcanzar una mayor percusión y potencia para mover las ruedas de molino, al tiempo que consideraba cual era la disposición más adecuada para lanzar más lejos el agua.



Figura 6.16: Estudio experimental sobre la caída del agua para mover ruedas de molino.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0134v

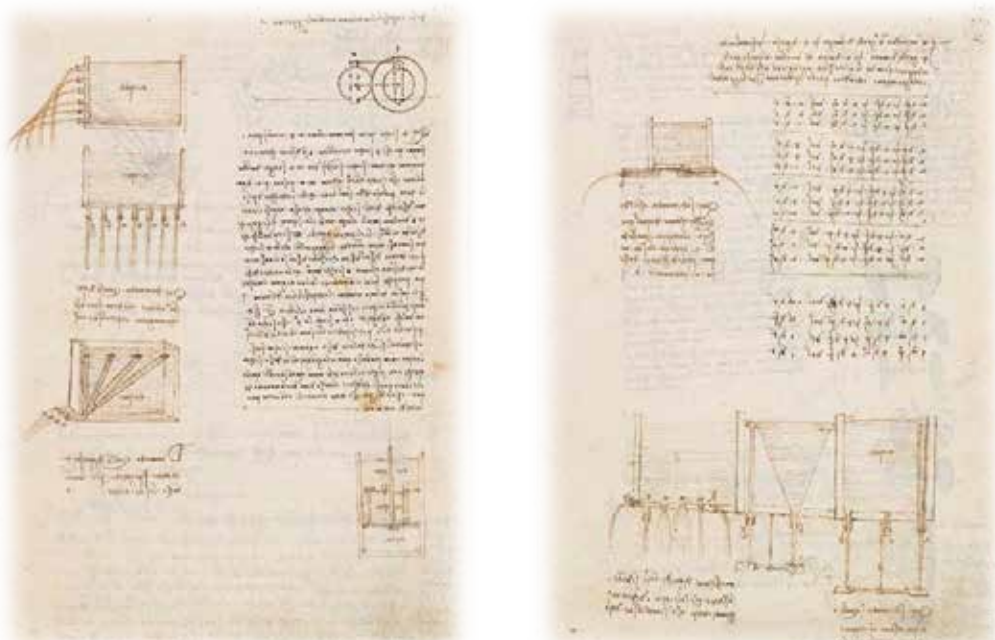


Figura 6.17: Estudio experimental sobre la caída del agua para mover ruedas de molino.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0151r y f. 0152r

6.3.10. Turbina hidráulica (CM1_0022v).

A principios de nuestra era, en China y en Oriente próximo, se inventó la rueda hidráulica, una máquina capaz de convertir la energía mecánica del agua en energía mecánica de rotación, útil para producir trabajo.

La rueda primitiva de madera, lleva varios álabes o cangilones montados en su periferia. Un chorro de agua tangencial a la rueda impulsa los álabes y con ello, imprime un movimiento de rotación a la máquina, cuyo eje lo transmite a un engranaje, también de madera. Junto con el molino de viento, dicha rueda constituyó la base de la técnica medieval, propiciando el desarrollo de otras máquinas o instrumentos, a los que proporciona energía, entre los que se encuentra el “Tornillo de Arquímedes”.

Gracias al progreso de la hidráulica en el siglo XVIII y a la incipiente metalurgia moderna, la rueda de madera fue sustituida por la turbina hidráulica un siglo más tarde. Por tanto, esta máquina no es invención de Leonardo, ya que *en* el Renacimiento todos los ingenieros conocían su existencia y la usaban habitualmente; pero contribuyó de forma decisiva a su desarrollo y aplicación práctica.

Sus grandes dotes de observación le llevaron a aprovechar un salto de agua en una rueda con paletas para lo que diseñó un gran número de ellas, buscando, en cada caso, su aplicación óptima. En uno de sus diseños -Códice Madrid I, folio 22 (verso)- escribió lo siguiente: *"Me encuentro con un salto de agua de gran altura pero de poco caudal. Y quisiera convertirlo en algo útil. Para hacer tal cosa, me doy cuenta de que debo valerme de su peso y de su percusión. Para realizarlo, tomaré un caño, cuyo calibre corresponda al de la vena del agua y que tenga la misma altura del salto. En esta forma se logrará un gran resultado., ya que el caño sin fondo quedará repleto de agua y, al mismo tiempo, ésta pesará o, mejor dicho, hará percusión sobre la rueda. A más de esto, el agua llenará todos los cangilones, esto es m o p r t v. Así, entre el peso del agua que hace percusión, y el peso que se encuentra en los 6 cangilones, la rueda adquirirá tanto peso por uno de sus lados, como para mover, en la parte opuesta, cualquier gran peso"*. No podemos obviar el parecido de esta turbina con las turbinas Pelton utilizadas en nuestros tiempos.

Como se ha dicho, la rueda hidráulica es una máquina que permite aprovechar la energía de una corriente o de un pequeño salto de agua pudiendo ser de álabes, de cangilones o de paletas.

La aplicación actual de esta rueda es el rotor de las turbinas hidráulicas, las cuales están constituidas básicamente por un distribuidor y un rotor. El distribuidor, similar al canal vertical n de la figura, es un órgano fijo formado por uno o más conductos regulables, a través de los cuales entra el agua procedente de la cámara de carga. El rotor está formado por una rueda provista de un cierto número de paletas o álabes. El agua ejerce su acción sobre estos álabes y obliga a toda la rueda a girar. (IRIONDO, 1997)

Los elementos fundamentales que condicionan el funcionamiento de una turbina hidráulica son: el salto o desnivel entre la superficie libre del agua en la presa y la superficie del agua en el canal de descarga, el caudal de agua que pasa por la turbina, así como el número de revoluciones del rotor y el rendimiento. Los dos primeros condicionantes fueron conocidos y analizados por Leonardo.

Otra de las aplicaciones clásicas de este tipo de rueda es la de los molinos de agua. El agua de un río mueve una rueda con cangilones, similar a la de la figura, que a su vez mueve la rueda de moler.

Las dos pequeñas figuras de la parte inferior se refieren al estudio de la fuerza que ejerce el agua en su caída libre sobre una superficie sólida. Leonardo escribió lo siguiente: *"Tú*

podrías preguntarme: qué golpe del agua sobre las palas de la rueda tiene más valor, ¿el del agua que cae sobre el agua contenida en los cangilones o el del agua que percute la tablilla lisa de madera de las palas de la rueda? A eso yo contestaría: no se puede negar que una vez que el agua ha llenado uno de los cangilones, ese agua ejerce todo su peso sobre el lado de la rueda en donde está. A este peso, hay que agregar la percusión del agua en el momento de caer, que son dos potencias juntas, esto es, percusión y peso. Es cierto, sin embargo, que la percusión del agua sobre el agua no tiene tanto valor como la que hace sobre un cuerpo más denso, como la madera de las palas de dicha rueda".

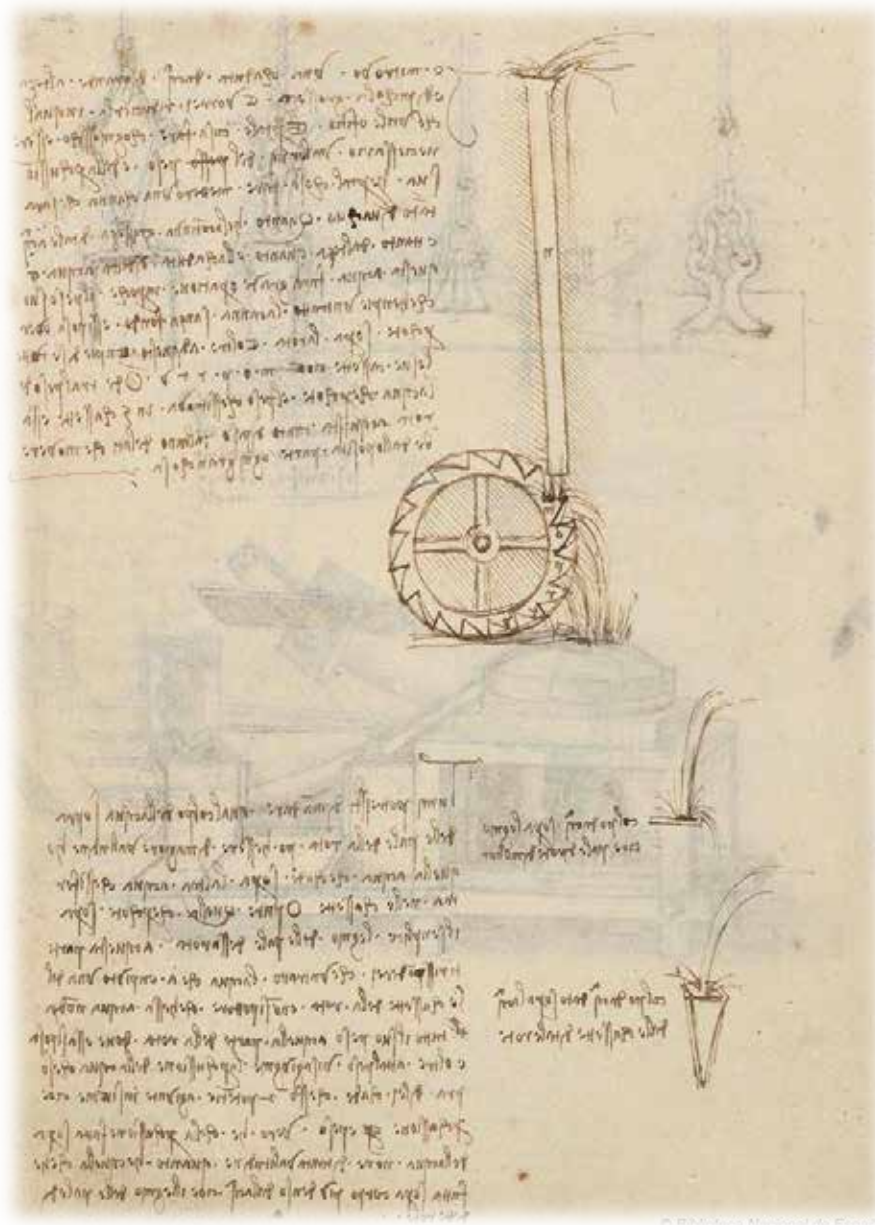


Figura 6.18: Turbina hidráulica.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0022v

6.3.11. Acoplamiento entre la rueda hidráulica y el tornillo de Arquímedes (CA_0026v y CM1_0025v).

En la figura del Códice Atlántico, folio 26 (verso) se observa el acoplamiento entre la rueda hidráulica y el tornillo de Arquímedes, conjunto estudiado por Leonardo para elevar y conducir el agua para el abastecimiento de ciudades a través de un sistema de tubos de madera, cuyos anclajes y la forma de agujerearlos se indican en la segunda figura, perteneciente al Códice de Madrid I, folio 25 (verso).

El tornillo de Arquímedes consiste en una superficie helicoidal que gira en el interior de un cilindro ajustado. Este mecanismo permite elevar, mediante el giro del tornillo interior, líquidos o materiales pulvulentos o granulados y, ha servido de base para la construcción de máquinas elevadoras de líquidos y áridos. Esta aplicación es posible gracias a que los tornillos, considerados como máquinas simples, derivan en cuanto a su funcionamiento de las propiedades del plano inclinado y de la palanca. El avance y la potencia aplicables, dependen del paso del propio tornillo y de la palanca aplicada a su eje de giro.

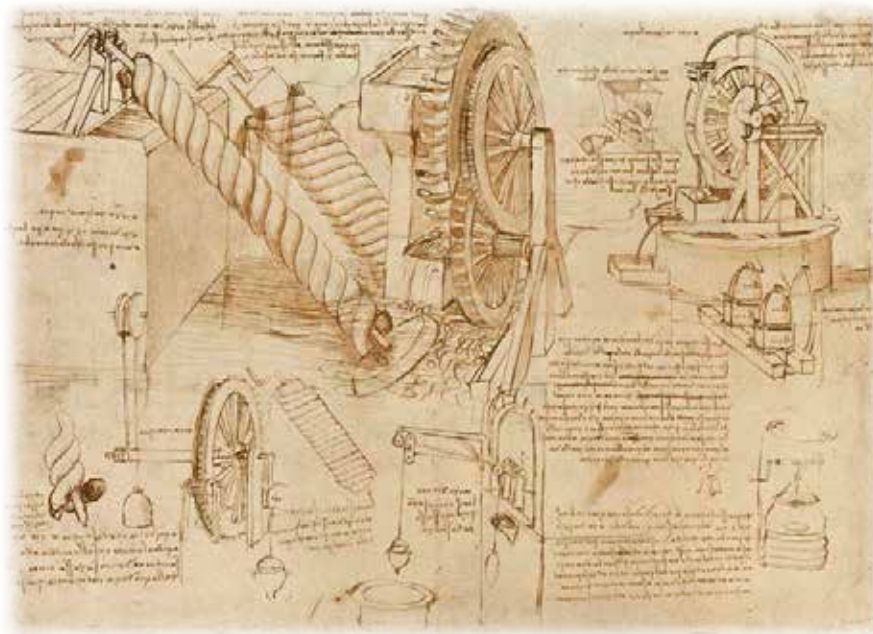


Figura 6.19: Rueda hidráulica y tornillo de Arquímedes.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0026v

En el comentario adicional a la fabricación de los tubos Leonardo escribió lo siguiente en el folio 25 (recto) del Códice Madrid I: “*Procedimientos para hacer conductos de agua en madera. Éstas son varias maneras para hacer los caños de las bombas de extraer agua. Se preparan maderos del mismo largo que haya de tener la bomba. Quien no los encuentre de ese largo, puede hacerlos en partes, uniéndolos cada medio codo con cierres, como se ve en la 2 figuras de aquí al lado*”.

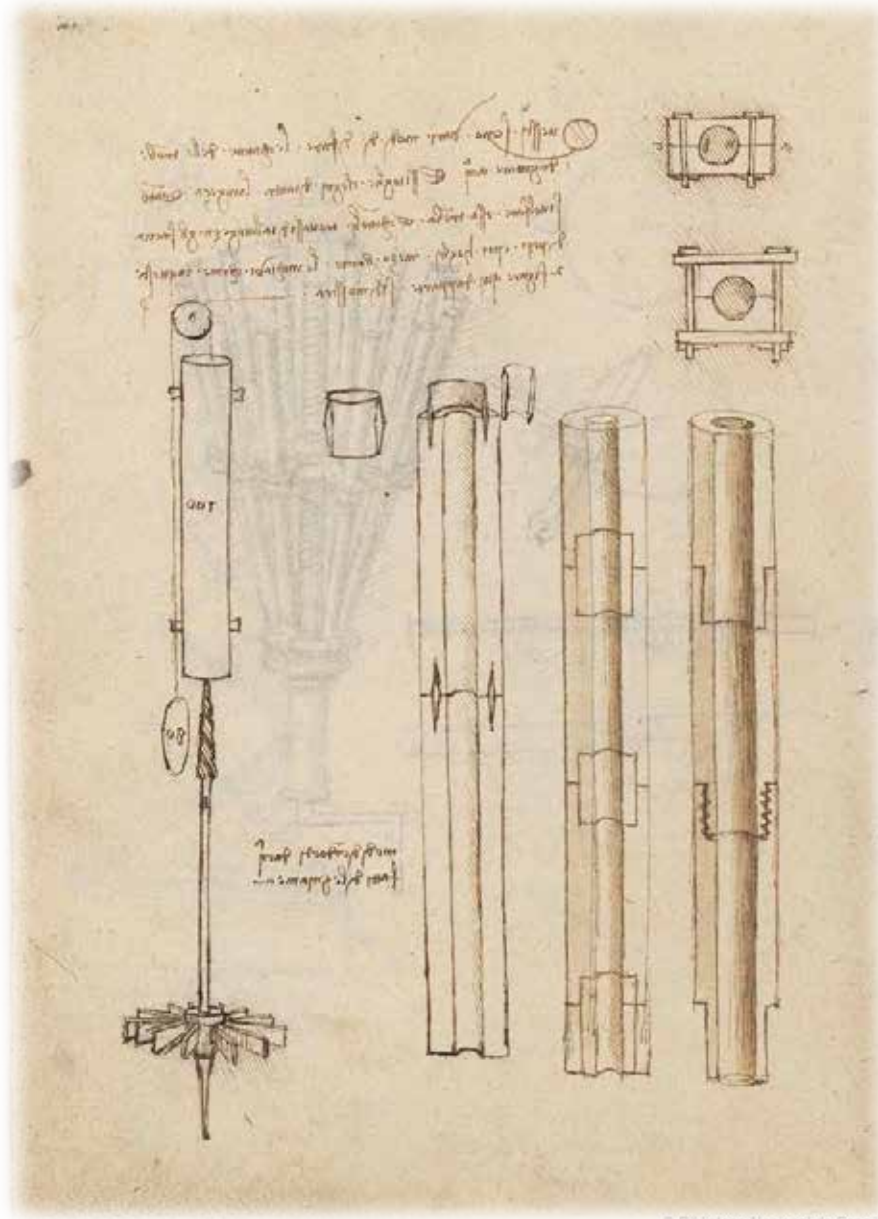


Figura 6.20: Conductos de agua en madera.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0025v

6.3.12. Diversos estudios de hidráulica (CM1_0145r, CM1_0151r y CM1_0151v).

En las siguientes figuras y comentarios están reflejados alguno de los estudios de hidráulica realizados por Leonardo da Vinci. Estos estudios le ayudaron a comprender algunas de las leyes de la hidráulica.



Figura 6.21: Imposibilidad del movimiento perpetuo accidental.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0151r (detalle)

La primera figura, que aparece en el Códice de Madrid I, folio 151 (recto), es un minúsculo gráfico, que no se entiende muy claramente, pero que una vez leído el texto complementario, nos damos cuenta de que en realidad es un estudio sobre lo que él llama "*la imposibilidad del movimiento perpetuo accidental*".

"Aquí 4 cangilones se contraponen a 8, pero no se puede evitar que los 8 tengan 8 codos de palanca contra 4. Supongamos que de los 8 cangilones se viertan en 4. Sin duda alguna, ese cangilón de agua, al llegar a 4 pesará por 2 de los de 8, debido a su palanca, que dobla su peso. Pero el cangilón que desciende, antes de que pueda elevar otro cangilón a 8, a la altura de su punto de partida, deberá descender dos veces su altura. Y si tú quisieras que se genere aquí un movimiento continuo, haría falta que al descender los 4 cangilones de agua, hagan subir con su descenso 8 cangilones de agua a la misma altura, posibilidad negada por las indicadas palancas y contrapalancas. En la quinta de mi tratado he demostrado la imposibilidad de tal movimiento. Antes bien, resistirán por igual uno a otro. Y si tú quisieras agregar otro cangilón a los 4, el quinto cangilón no tendría ningún peso, porque penetraría debajo del nivel del agua. Y si tú quisieras que por el lado del cangilón agregado el agua estuviera tanto más baja cuanto supone el añadido de este cangilón, las ruedas se moverían como la harían en el caso de existir una diferencia de nivel entre las aguas, pero este sería un movimiento natural y no accidental, como lo habías prometido".

Este problema lo estudió también en base a la ley de la palanca como se puede observar en el dibujo que aparece en el Códice de Madrid I, folio 145 (recto). En este caso no añadió ninguna explicación, aunque el dibujo en sí es tan expresivo que realmente se puede decir que la explicación escrita es innecesaria. Según se puede observar en este caso, el dibujo es tan perfecto que la reciprocidad entre pesos y brazos de palanca se cumple a la perfección, de donde se deduce la imposibilidad del movimiento accidental perpetuo.

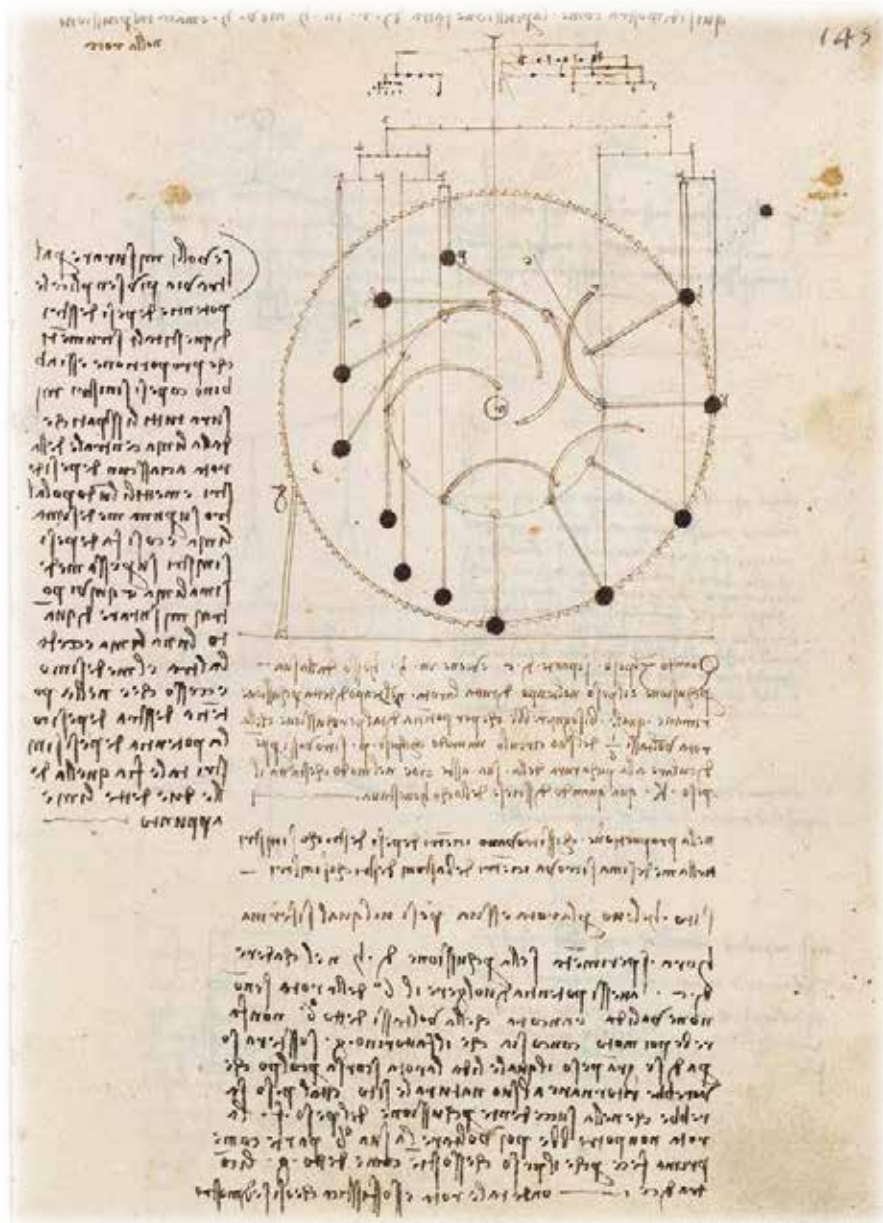


Figura 6.22: Imposibilidad del movimiento perpetuo accidental.
Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0145r

En la figura del folio 151 (verso) Leonardo hace unos cálculos de los canales que llevan el agua hasta los molinos y la fuerza que realiza para mover dichos molinos. Este es uno de los muchos estudios que tuvo que realizar como director de la mayoría de los canales que se construyeron en Lombardía. En el comentario adicional dice lo siguiente: *"Los lombardos acostumbraban hacer cierto tipo de molinos, que operan con una caída aproximada de 3 codos. Estos molinos están situados en un mismo margen, a diversas distancias de la orilla, de acuerdo con las necesidades de colocarlos uno después del otro, dentro de los edificios de los molinos, como se ve en el dibujo. El primer molino a es el que tiene más fuerza; el más*

lento es d, pero todos trabajan con la misma corriente de agua. Si la oblicuidad de la canal de a estuviere en el centro, donde más empuja el agua, la razón pide que tal agua tenga más fuerza que la de los otros molinos. Si el agua cae de una altura de tres codos y luego percute sobre las palas de la rueda, ten cuidado de que el agua, al salir de la percusión, no hunda la porción de la rueda que junto con el eje, intenta salir del agua. Es usual entre los lombardos, hacer las bocas de los saetines de los molinos muy anchas. El saetín luego se va estrechando progresivamente hasta la percusión en las palas de las ruedas. Así que si el saetín es de un codo y 1/2 en la boca, al final será de menos de medio codo. Y sucede que siendo la altura del agua de un cuarto de codo en la boca, alcanzará al pie una altura de 3/4 y por esta razón la percusión se hará muy cerca del eje de la rueda del primer motor. Podría aducirse que cuanto más alto es el agua tanto más pesa. Pero también es cierto que la superficie de esa bajada de agua es menos oblicua que su fondo. Y por eso podremos afirmar, que tanto pesa un gran peso sobre una superficie poco oblicua, cuanto un peso menor que cae por gran oblicuidad. Hay otra desventaja y es que el peso sea mayor; al actuar cerca del eje es de poco provecho, porque no da mucha fuerza. Así que si la boca es de un codo y 1/2, hágase que tanto su final como las palas, tengan un ancho de un codo y 1/2 y así se habrá obtenido que la altura del agua sea igual y que la percusión se realice lejos del eje".



Figura 6.23: Cálculos de los canales que llevan el agua hasta los molinos y la fuerza que realiza para moverlos.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0151v

6.3.13. Canal de San Cristóforo (CA_1097r).

En la parte superior del manuscrito se puede leer “*Navilio di San Crisstofano di Milano facto addi 3 di maggio 1509*” (“canal de San Cristóforo, 3 de mayo de 1509). Pocas veces nos encontramos con la suerte de que uno de los manuscritos de Leonardo esté fechado por él mismo, en este caso particular se trata de “Canal Grande de Milán” justo el tramo que se encuentra en frente de la iglesia de San Cristóforo.

Históricamente se le han atribuido a Leonardo los mecanismos que controlan y regulan los diversos niveles del canal sin que haya pruebas concluyentes. No obstante el diseño de este tramo le da verosimilitud a los que defienden dicha hipótesis. En cualquier caso, observando el folio parece que Leonardo intentaba realizar un diseño que tratara de aprovechar el agua del canal y la forma de regularlo, tanto si era para el riego en la campiña de los alrededores o para cualquier otro uso descrito por Leonardo en sus numerosas máquinas hidráulicas repartidas por sus manuscritos, especialmente en el Códice Atlántico.

Se aprecian dos dibujos. El primero y más grande, una vista del canal en perspectiva caballera, y el más pequeño, una sección transversal del mismo, en la esquina inferior derecha. Se aprecia claramente la intención de Leonardo de drenar el agua mediante dos salidas superpuestas, una encima de la otra. Y muestra una secuencia de las tres posibilidades. En la esclusa de la derecha se abre sólo la inferior, en la de en medio se abre la superior, y en la de la izquierda la apertura es de las dos esclusas.

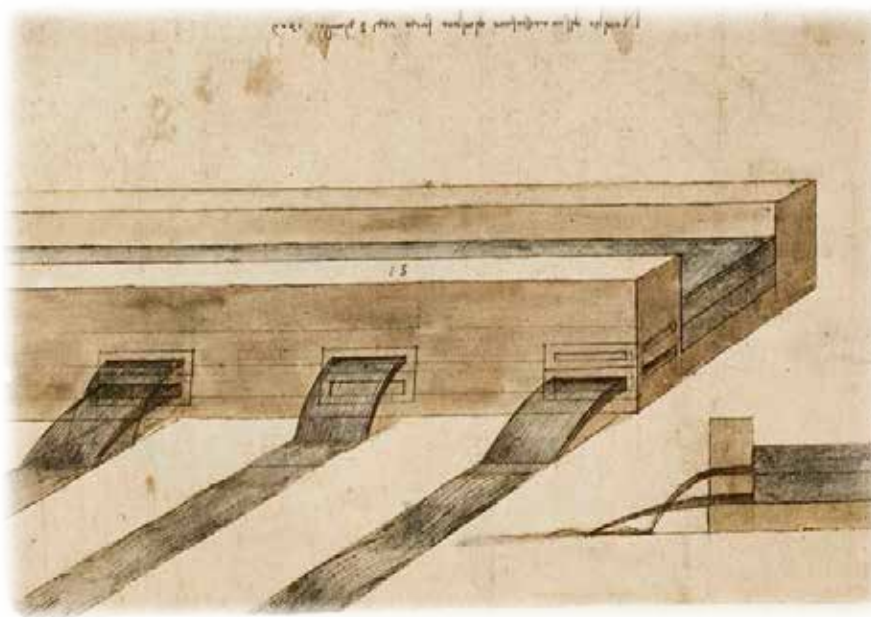


Figura 6.24: Canal de San Cristóforo.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 1097r

6.3.14. Máquinas para elevar el agua (CA_1069r).

Al igual que el folio 26 v del Códice Atlántico, nos encontramos una gran cantidad de artefactos hidráulicos repartidos por todo el folio de una forma caótica pero con un trazado exquisito y de gran precisión además de un gran efecto visual. Todos los diseños de este folio están directamente relacionados con el problema de la elevación del agua.

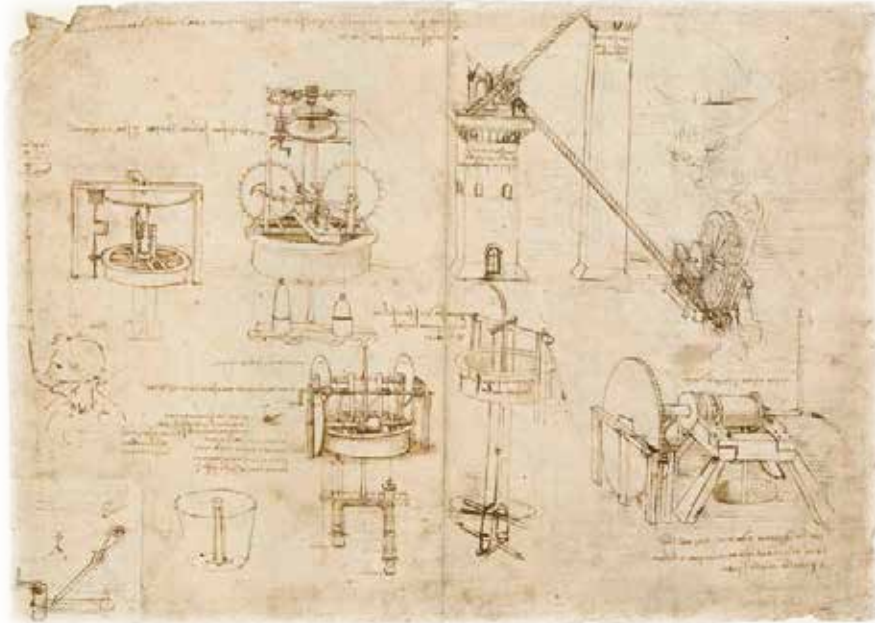


Figura 6.25: Máquinas para elevar el agua.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 1069r

En la parte superior derecha del folio nos encontramos con una torre donde Leonardo escribió: “Esta torre ha de llenarse por completo de agua”. El problema que quería solventar era como elevar el agua de un río cercano a un depósito situado en la torre más alta. Para ello ideó un molino hidráulico accionado por la corriente de un río que a su vez ponía en marcha un tornillo de Arquímedes que elevaba el agua a una primera torre intermedia. En su tejado a su vez otro tornillo de Arquímedes era el encargado de captar el agua que recibe del primer tornillo, y a su vez accionado por unos engranajes, elevar el agua al depósito de la segunda torre más alta.

El resto de las máquinas repartidas por el folio representan todas lo mismo: cómo extraer agua del fondo de un pozo y se aprecian soluciones como bombas accionadas por varios engranajes, pesos y contrapeso.

En la parte central del margen izquierdo del folio se puede apreciar la cabeza de una figura humana con lo que parece ser un dispositivo de respiración submarina con un flotador de corcho circular en la parte superior de la caña.

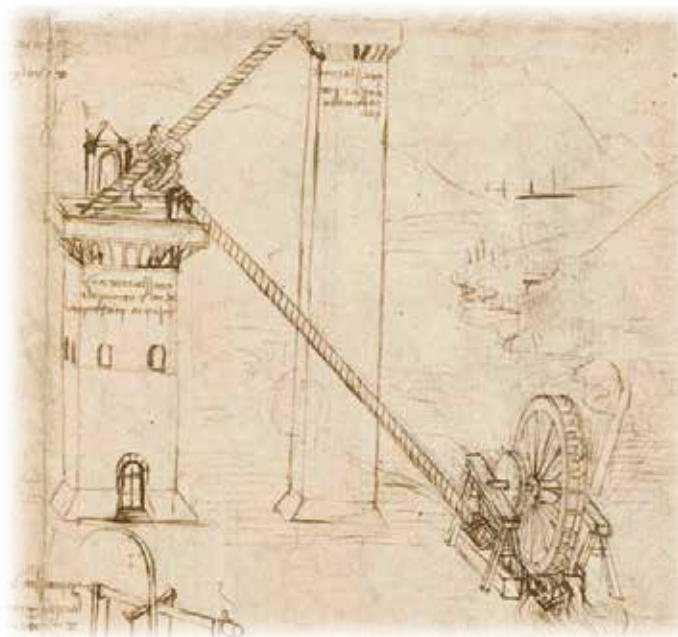


Figura 6.26: Rueda hidráulica y tornillo de Arquímedes.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 1069r (detalle)

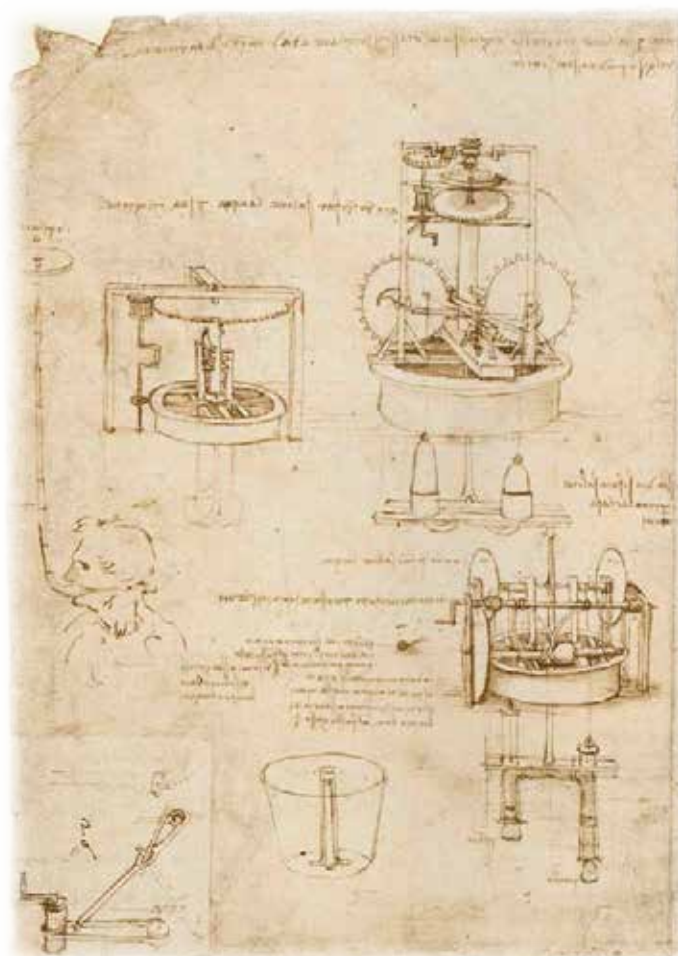


Figura 6.27: Máquinas para elevar el agua y dispositivo de respiración submarina.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 1069r (detalle)

6.3.15. Bomba hidráulica doble (CA_0020r).

Se aprecia con claridad una gran bomba doble con un balancín donde están conectadas ambas. El balancín se gobierna por la acción de una viga oscilante en cuyo extremo hay una enorme piedra de peso 10.000 libras (4.536 kg), tal y como se puede apreciar en la anotación hecha por el propio Leonardo. Las dos barras situadas a los lados del contrapeso dan a entender que la maquina estaría accionada por tracción humana: es decir dos personas tienen que hacer oscilar la viga. La energía cinética acumulada por el contrapeso hace que la viga se mueva con mayor rapidez, y de esta forma transmite el movimiento alterno al balancín, que a su vez acciona las dos bombas.

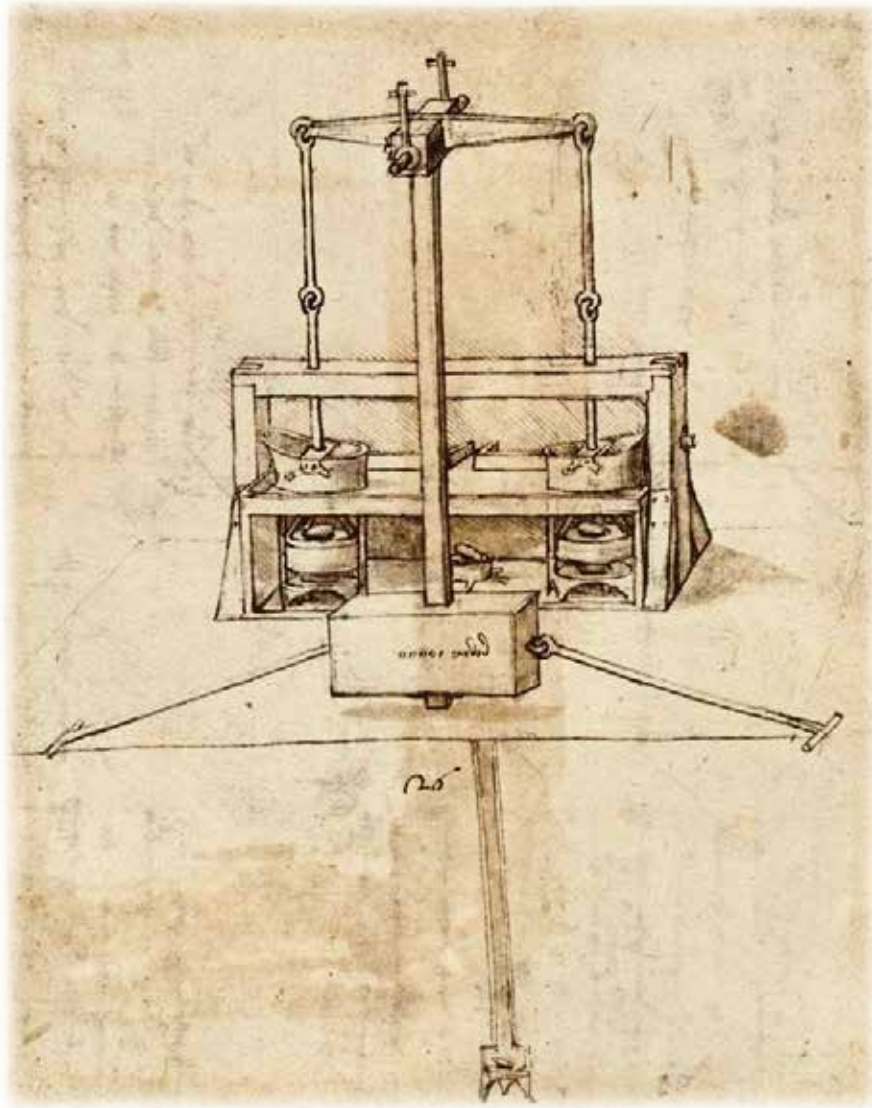


Figura 6.28: Bomba hidráulica doble.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0020r (detalle)

6.3.16. Diferentes formas de elevar el agua (CA_0156r).

En la parte superior derecha Leonardo propone una forma peculiar de vaciar fosos, pozas o canales, seguramente pensado para uso militar si se necesitaba drenar por ejemplo un foso en un asedio. Un cabrestante accionado por una manivela maneja un poste largo a modo de palanca que hace elevar en su extremo una gran tela, probablemente de cuero para que fuera lo más impermeable posible, y de esta forma el agua depositada en la tela, al elevarla, fuera cayendo sobre el depósito rectangular situado junto al canal.

En la parte inferior se puede apreciar una rueda para bombear agua. Y en la parte central a ambos lados del folio, Leonardo diseñó dos procedimientos distintos para roscar tornillos (una vez más se demuestra como Leonardo va diseñando en un mismo folio dispositivos o máquinas de temáticas muy diferentes).

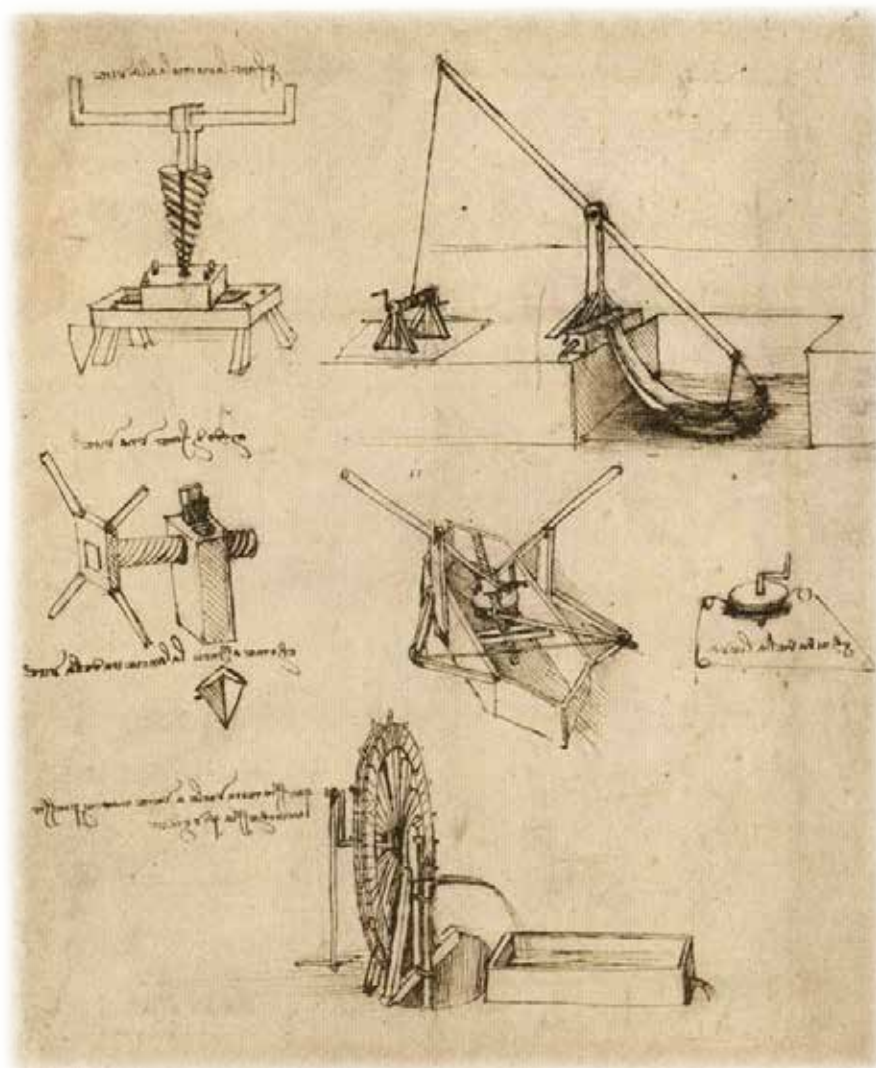


Figura 6.29: Diferentes formas de elevar el agua.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0156r (detalle)

6.3.17. Máquinas para elevar agua (CA_0006r).

A diferencia del folio anterior, éste, está dedicado íntegramente a resolver el problema de la elevación del agua. Se aprecia como Leonardo dibujó con la precisión y el detalle que le caracteriza numerosos dispositivos para elevar el agua.

En el cuadrante superior izquierdo, una rueda de palas movida por una corriente de agua, acciona mediante unos engranajes un tubo helicoidal que va elevando el agua hasta la parte superior donde va cayendo a un depósito. Sin embargo en el dibujo que está justo a su derecha es la acción del hombre la que permite elevar el agua, manejando una manivela que al girar hace que una rueda que engrana con el extremo de un tornillo de Arquímedes que no se ve (por estar en el interior de un tubo cilíndrico), vaya tomando agua abajo y transportándola hasta el depósito de arriba. En la parte central a la derecha se aprecia como una bomba de fuelle insufla aire a una cierta presión permitiendo sacar el agua del interior de una poza por el tubo de la izquierda que lo vierte en una pequeña fuente. Los dos dibujos de abajo son prácticamente similares, un sistema de engranajes unidos solidariamente a un eje, que al girar mueven unas cadenas con cangilones que en su trayectoria van cogiendo agua del fondo del pozo, la transportan, la suben y finalmente la van vertiendo en sus respectivos depósitos.

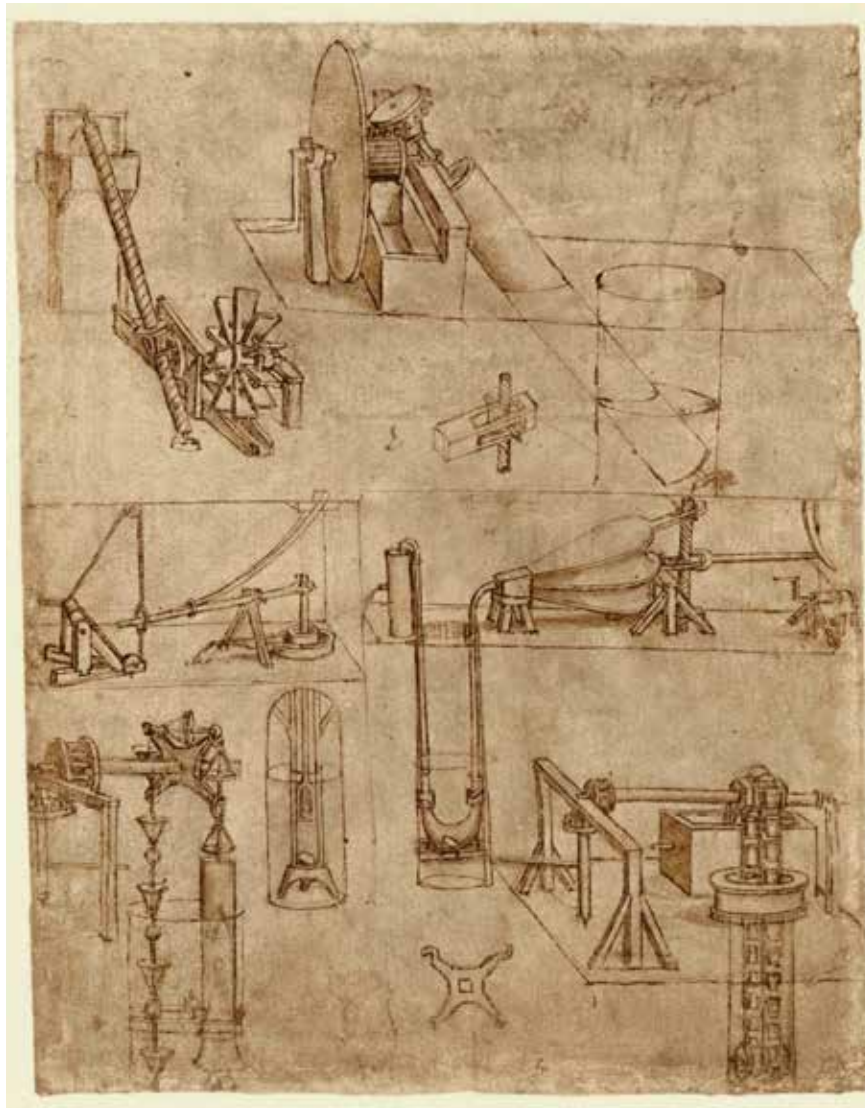


Figura 6.30: Máquinas para elevar el agua.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0006r (detalle)

Capítulo 7

Leonardo da Vinci INGENIERO CIVIL

*Todo lo que hay de bello en el hombre
pasa y no dura
(Leonardo da Vinci)*

7.1. Introducción.

A los 63 años de edad Leonardo escribió “*Recuerda las soldaduras de la bolas de Santa María del Fiore*”. Se refiere al encargo que recibió Verrocchio de construir la esfera de cobre (de dos metros y medio de diámetro) que debía coronar la linterna de la cúpula de Brunelleschi, sería el remate final al mayor monumento del Quattrocento florentino, una forma geométrica perfecta. Según Pedretti en las “máquinas”, afirma que ya a los 18 años Leonardo comenzó a estudiar la posible utilización de energía solar mediante espejos parabólicos. Sistema que se remonta a la antigüedad y que había sido utilizado por Verrocchio precisamente para soldar las numerosas piezas de la esfera de cobre de la cúpula de la catedral de Florencia. Siendo Leonardo alumno aventajado de Verrocchio no es de extrañar que participara activamente en todo el proceso.

De esta forma se iban perfeccionando los dispositivos utilizados para soldar. Evidentemente en esta época no se utiliza todavía la llama de acetileno, por lo que por una parte las pequeñas soldaduras se realizaban en la forja; mientras que para las grandes soldaduras era necesaria una potencia mayor, y la energía del sol usada adecuadamente era la única disponible. La catóptrica era la ciencia de los espejos, y se estudiaba en los textos clásicos de Tolomeo, Euclides y Arquímedes, además de los compedios medievales de Witelo y Alhacén.

De esta forma se explica según Pedretti, la persistencia con que Leonardo, en su juventud, estudió las máquinas para tallar espejos ustorios o de “*fuego*”, como él mismo los denominaba (PEDRETTI, 1999). Su diámetro variaba entre 70 cm y un metro, para ser fabricados de una sola pieza. Su curvatura se calculaba tomando como referencia el punto en el que se concentrarían los rayos reflejados, donde se produciría la fusión. Se trataría de determinar lo que hoy la ciencia denomina “caústica de reflexión” o “catacaústica”.

En aquella época, fabricar una superficie especular cóncava como la de las grandes antenas de las sondas espaciales, era prácticamente imposible. No obstante, Leonardo al recordar la esfera de Verrocchio construida por piezas, llega a la conclusión de que el mismo proceso se podría aplicar a la fabricación de un espejo parabólico. Sería necesario, un

instrumento de enorme precisión, un escantillón que alisara las diferentes piezas para obtener la curvatura preestablecida.

Numerosos estudios al respecto se pueden apreciar en los folios 84 (verso) y 85 (recto) del manuscrito G de Francia, con referencias explícitas a estudios y cálculos sobre espejos parabólicos y soldaduras efectuadas en 1469 en la esfera de cobre de la linterna de la catedral de Florencia (c. 1515). También nos encontramos máquinas para tallar espejos cóncavos en los folios 17 (verso) y 1103 (verso) del Códice Atlántico; en el folio 61 (recto) del Códice de Madrid I; en el folio 13 (recto) del manuscrito B de Francia y en numerosos folios del Códice Atlántico 0087r y el 17 (verso) ya comentado.

Estudios sobre las cáusticas de reflexión y dispositivo para fabricar espejos parabólicos nos los encontramos en los folios 823 (recto), 750 (recto) del Códice Atlántico, ff. 86 (verso) y 87 (recto) del Códice Arundel; y 84v y 88r del Códice Arundel.

Entre 1513 y 1516, Leonardo se encuentra en Roma trabajando en el Vaticano al servicio de Giuliano de Médicis, hermano del Papa. Le asisten dos técnicos alemanes, fabricantes de espejos. Su proyecto consiste en instalar el equipo necesario para aprovechar la energía solar para uso industrial. Parece probable que los Médicis tuvieran la intención de desarrollar en Roma una industria textil como la que había proporcionado la prosperidad económica a Florencia.

Los estudios de Leonardo apenas dejan de entrever el objetivo del proyecto, se pregunta si *“la pirámide (haz de rayos solares reflejados) se condensan para concentrar toda la potencia en un solo punto, y si se vuelve más densa que el aire que la sostiene”*. A continuación viene la anotación que permite saber de qué se trata: *“Con esto se hará hervir cualquier caldero de tintorería. Y con ella se calentará una piscina porque siempre habrá agua hirviendo”*. Un sistema pues de calefacción central para alimentar incluso las piscinas. Pero todavía hay más, el enorme espejo ustorio construido por piezas no es sino un telescopio de espejo segmentado.

En el siguiente capítulo hemos prescindido de los grandes ingenios de ingeniería civil diseñados por Leonardo y ya comentados en el capítulo dedicado a Leonardo INGENIERO HIDRÁULICO. Nos hemos querido centrar en aquellos diseños de uso civil como pueden ser las grúas para elevar pesos usados en construcción, maquinaria textil, máquinas herramientas, etc.

7.2. Los ingenios civiles en los manuscritos de Leonardo.

7.2.1. Cabrestantes para la construcción de edificios (CA_1083v).

Una vez más Leonardo diseña numerosos mecanismos destinados a elevar o levantar con el menor esfuerzo posible grandes pesos, probablemente materiales para la construcción en general.

Se aprecia a tal efecto, multitud de cabrestantes repartidos a lo largo de todo el folio. Llama la atención el cabrestante de la figura inferior derecha, una especie de grúa sostenida en un puente con un gran tornillo central conducido por una rueda. Algunos especialistas sostienen que Leonardo se inspiró en las máquinas que Filippo Brunelleschi había utilizado en la construcción de la catedral de Florencia.

En la parte central del folio destaca sobremanera el diseño de un enorme cabrestante de varias velocidades, muy probablemente pensado para que la fuerza motriz fuera animal, más concretamente accionada por la fuerza de unos bueyes.

En la parte superior derecha del folio se aprecia el diseño de un trinquete ya comentado en el capítulo 4 (Leonardo INGENIERO MECÁNICO), con uñeta vertical, evitando que la rueda dentada gire en sentido contrario.

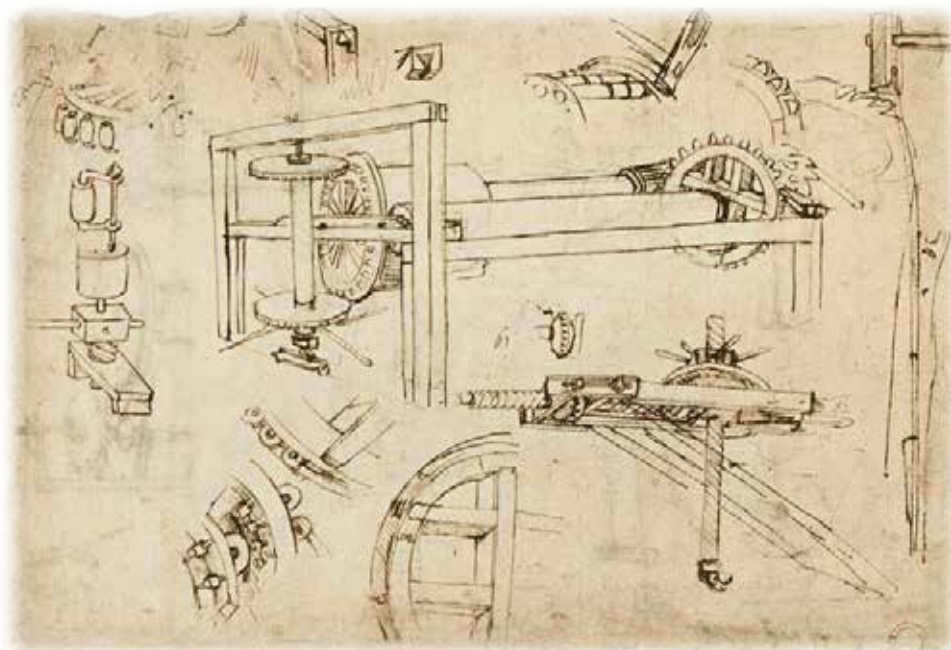


Figura 7.1: Cabrestantes.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 1083r

7.2.2. Máquinas elevadoras (CA_0138r).

En este folio Leonardo continúa afrontando el problema de levantar materiales de la forma más rápida y segura posible con la finalidad, seguramente, de construir edificios a una determinada altura.

En la parte derecha del folio observamos una grúa móvil, sustentada en la parte inferior por un carrito con rueda (facilitando el desplazamiento). Toda la grúa descansa en una especie de mecanismo troncocónico invertido con una barra saliente dando a entender que toda la grúa tendría un grado de libertad de 360°, es decir se podría girar dando una vuelta, de esta forma se llevaría la carga más fácilmente al lugar que se quisiera transportar, agilizando el trabajo. Ni que decir tiene que el centro de gravedad de la grúa se vería seriamente desplazado en función del peso que se elevara. Aunque Leonardo no lo indica expresamente en su diseño, una vez situada la grúa en su sitio de trabajo, habría que fijarla con unos tensores o bien con unos contrapesos en la base, evitando de esta forma la caída de la grúa.

La máquina de la izquierda tal y como escribe Leonardo de su puño y letra “*máquina para levantar y enderezar columnas monolíticas*”; permite levantar y manipular mucho más fácilmente columnas desde su base. Para ello ideó un bastidor con forma piramidal que descansa sobre unos rodillos. Dicho bastidor es arrastrado por una cuerda accionada por un cabrestante (parte izquierda), de esta forma la estructura se podría desplazar con menos esfuerzo. En la parte superior del bastidor hay otro enorme cabrestante que acciona un tornillo sinfin que es el que sube y baja la columna, enderezándola y ayudando a su correcta colocación y posición.

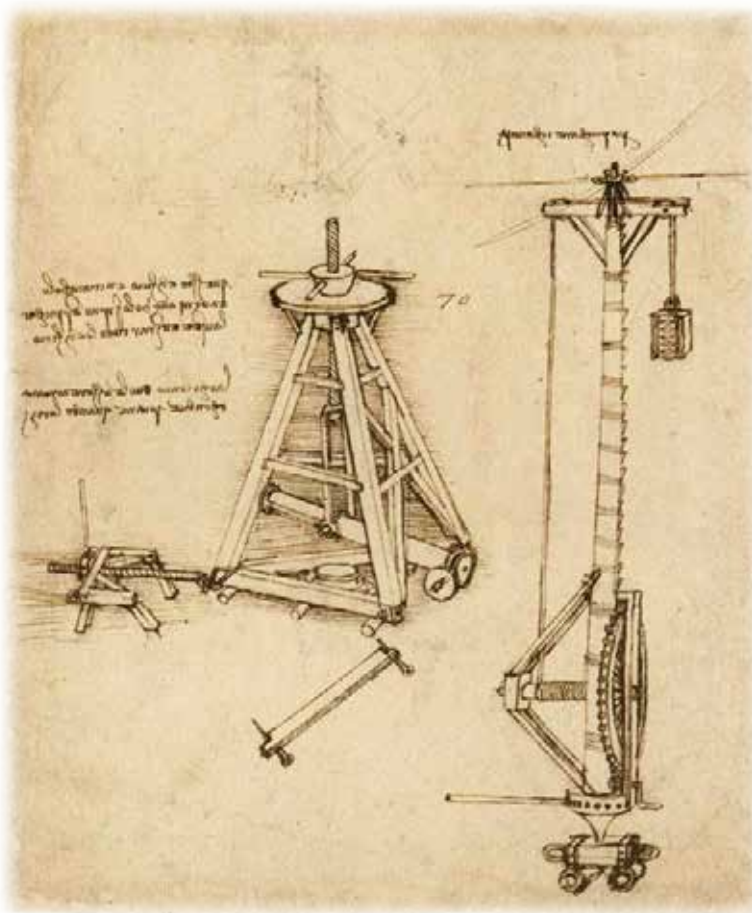


Figura 7.2: Máquinas elevadoras.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0138r

7.2.3. Grúa rotativa (CA_0965r).

Por la datación del folio (1478 – 1480) algunos especialistas señalan que Leonardo se inspiró en las máquinas elevadoras que se emplearon en la construcción de *Santa María de Fiore*, de Brunellechi en Florencia. Sea como fuere, lo que si es cierto es que la grúa que ideó en este folio Leonardo, estaba pensada para levantar enormes pesos, y gracias a un sistema de contrapesos regulables en el lado opuesto al brazo de elevación se podía mantener un equilibrio perfecto. Se aprecia a media altura del andamiaje una plataforma giratoria, con lo que se permitía rotar toda la parte superior de la máquina.

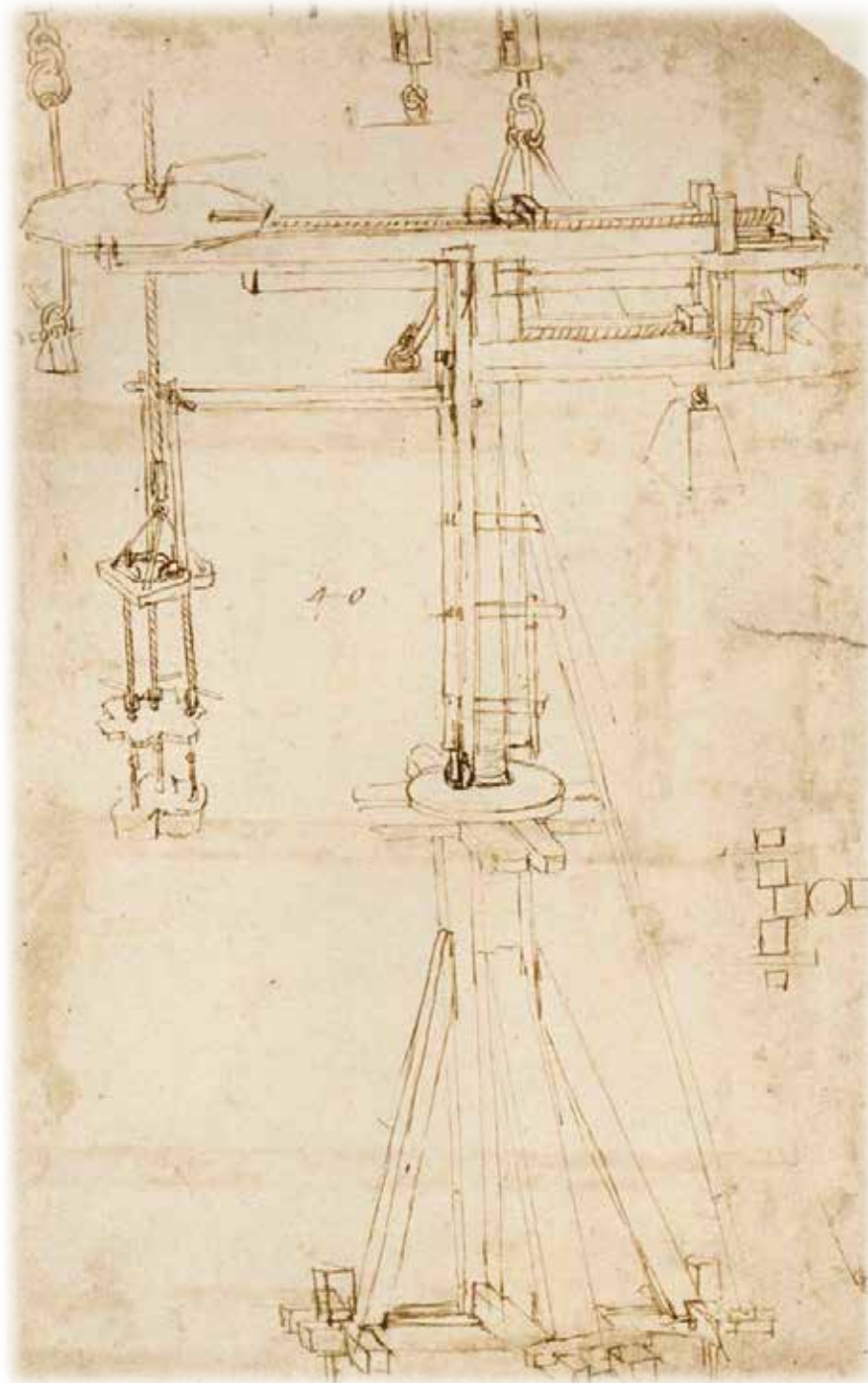


Figura 7.3: Grúa rotativa.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0965r

7.2.4. Andamios móviles con grúa giratoria (CA_808v).

En este diseño Leonardo ideó un enorme andamiaje que descansa sobre una plataforma circular, en la leyenda que escribió junto al dibujo explica que el andamiaje se tiene que ir instalando poco a poco mediante cuatro tornillos sobre una plataforma sólida, consolidando de esta forma la base. El hecho de que toda la grúa descansa sobre una plataforma circular implica la posibilidad de rotarla y asegurarla de nuevo para que pueda operar de forma segura.

En la parte superior del andamiaje hay una estructura horizontal en forma de U donde está colocada una plataforma circular donde hay un cabrestante que accionaría un tornillo sinfin vertical encargado de elevar la carga. Toda esta estructura a su vez se desplazaría horizontalmente gracias a la acción de otro tornillo sinfin horizontal situado en la parte superior derecha del brazo de la grúa.

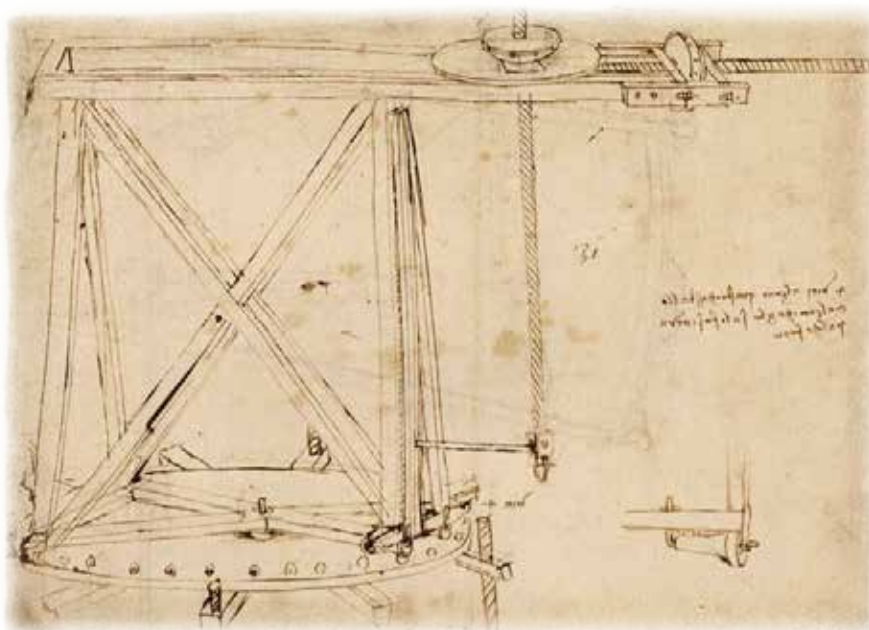


Figura 7.4: Andamios móviles con grúa giratoria.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0808v

7.2.5. Banco de trabajo para el aserrado de piedras (CA_0002r).

El título del folio lo podemos encontrar escrito por puño y letra de Leonardo, ya que en la parte superior derecha del mismo se puede leer “*sierra para el aserrado de piedras*” y “*banco de trabajo para el aserrado de piedras*”.

Independientemente de que Leonardo escribiera lo que pretendía mostrar; una vez más el lenguaje visual de Leonardo es tan perfecto que las palabras sobran. Se ve claramente en el escorzo un banco de trabajo donde hay un gran bloque de piedra sujeto en su centro y una sierra manejada por unos manillares. Recorriendo todo el folio se aprecian numerosos detalles de cada una de las partes que componen el banco de trabajo. Concretamente, en la parte superior derecha se aprecia la vista en planta de la agarradera de fijación central de los bloques de piedra, la sierra y los dos manillares.

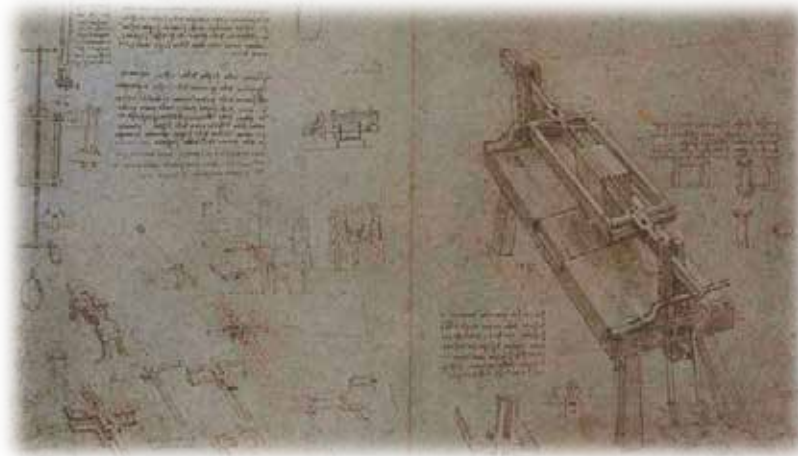


Figura 7.5: Banco de trabajo para el aserrado de piedras.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0002r

7.2.6. Pulidora de espejos (CA_0017v).

En el texto que hay junto al diseño, Leonardo escribe que la construcción de espejos cóncavos tenía como finalidad “*generar fuego*”. No es de extrañar puesto que el aprovechamiento de la energía solar mediante espejos se remonta a la Antigüedad, era de sobra conocido por Leonardo y de hecho lo aprovechó para producir energía en la fabricación de tejidos.

Centrándonos en el funcionamiento de la máquina pulidora, se aprecia como una excéntrica a modo de polea con una manivela accionada por la acción del hombre pone en marcha todo el mecanismo. Al girar la excéntrica se transmite la potencia a través de una correa que por fricción hace girar un eje que pivota sobre una especie de trompo que facilita la rotación. En la parte superior de dicho eje se sitúa el espejo a pulir que girará de forma solidaria. La encargada de pulir es una enorme piedra situada en la parte superior del bastidor marcada con la letra T. La velocidad de giro, la posición vertical de la piedra y su forma, van puliendo el espejo poco a poco dándole la forma cóncava que se pretendía.

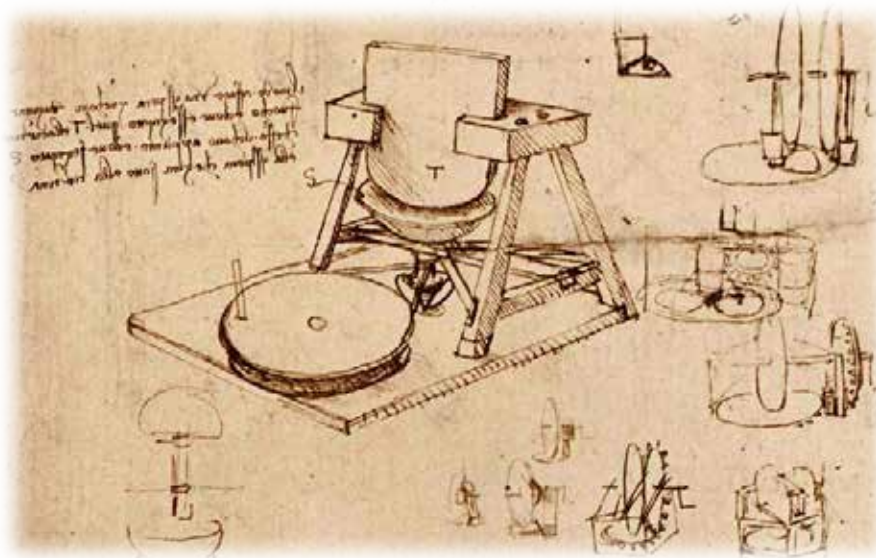


Figura 7.6: Máquina para pulir espejos cóncavos.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0017v

7.2.7. Prensa de estampación (CA_0029r).

La complejidad del mecanismo de engranajes y contrapesos junto con la combinación del trazo jugando con tonos negros y rojos, hacen que este sea uno de los diseños tecnológicos más atractivos del Códice Atlántico.

Se aprecia claramente como una enorme punta de estampado vertical golpea fuertemente sobre una placa metálica, todo gobernado gracias al mecanismo sustentado en la parte superior del bastidor formado por un complicado sistema de pesos, contrapesos, poleas, trinquetes y engranajes.

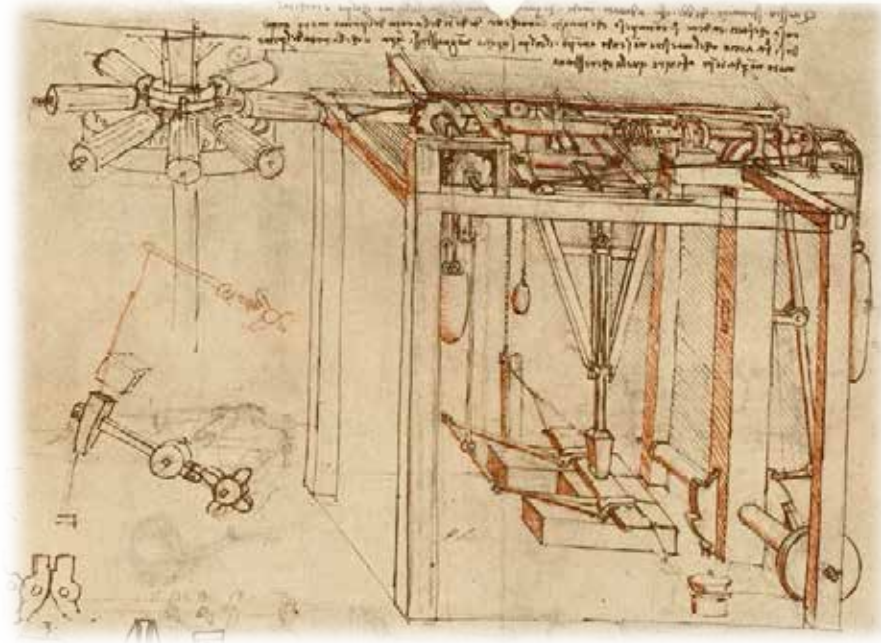


Figura 7.7: Prensa de estampación.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0029r (detalle)

7.2.8. Máquina para estirar duelas metálicas (CA_0010r).

No nos deja de asombrar la capacidad de Leonardo para desarrollar máquinas que intentaran automatizar al máximo procesos que requieren mucho esfuerzo por parte del hombre. Tal es el caso de la máquina para estirar duelas metálicas (es decir barras de hierro que se utilizaban para la fabricación de cañones) que nos encontramos en el folio 10 (recto) del Códice Atlántico. Labor de estirado nada agradable para quien la realizaba.

Sin embargo con este mecanismo, gracias a la acción de una rueda motora de dientes helicoidales (en la parte inferior izquierda), muy probablemente movida por un molino hidráulico, se consigue a partir de un tornillo sinfín vertical, transmitir la potencia a dos ruedas dentadas. La rueda de la derecha tiene en su centro un agujero roscado por donde pasa a su vez un tornillo que se va desplazando horizontalmente y es su desplazamiento arrastra consigo la duela que tiene sujeta en su extremo.

La otra rueda dentada, la de la izquierda es la encargada de mover a su vez a otro mecanismo formado por otras dos ruedas dentadas que al girar produce el efecto de estirado de la barra metálica que pasa por debajo de ella.

Ni que decir tiene que aunque no se aprecia en el diseño, la rueda motora original tiene que transmitir un movimiento giratorio alterno. De esta forma se consigue que la barra metálica se mueva también de forma lineal alterna, es decir hacia adelante y hacia atrás.

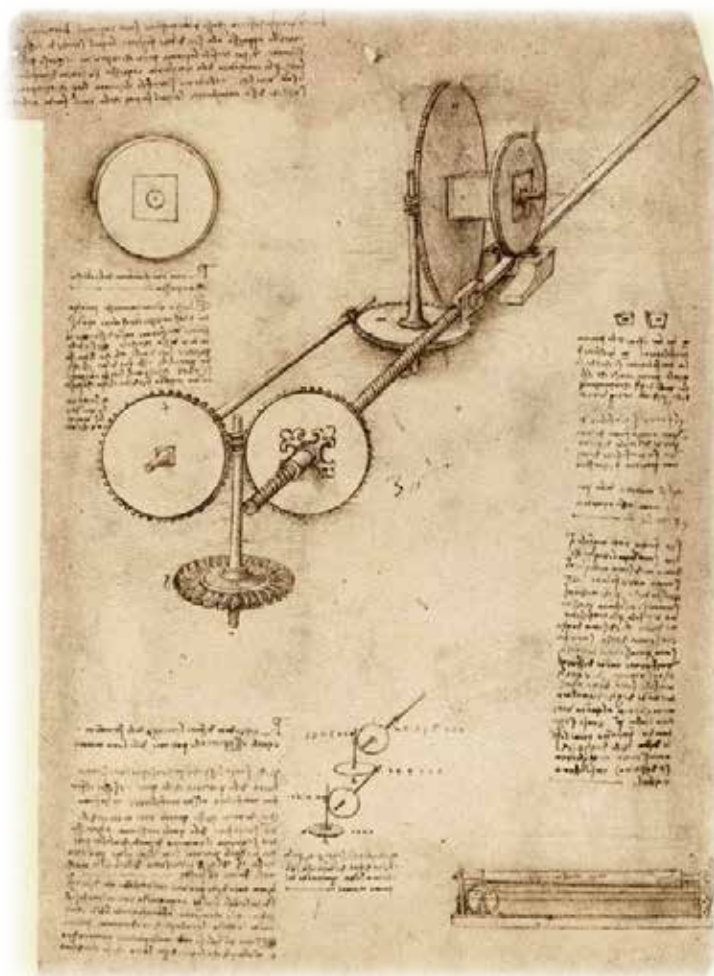


Figura 7.8: Máquina para estirar duelas metálicas.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0010r

7.2.9. Máquina para fabricar limas (CA_0024r).

En la línea de la máquina anterior, Leonardo ideó también un mecanismo capaz de automatizar el proceso de entallar limas, tan sólo con el accionamiento de una manivela. Efectivamente, un hombre con un esfuerzo relativamente menor, sería capaz de manipular una manivela, que tiene enrollada una soga, de la cual pende en su extremo un peso que pasa por una polea, de esta forma se carga el mecanismo encargado de transmitir toda la potencia. Al soltar la manivela caería el peso que en su caída provocaría que el eje del rodillo diera varias vueltas.

Un sistema de engranaje de linterna hace girar la gran rueda que a su vez provoca que un gran tornillo roscado solidario (a la izquierda) se mueva con ella. Este tornillo es su giro hace que la plataforma donde descansa la lima que se quiere grabar, se desplace linealmente. De hecho por cada vuelta de la rueda y por consiguiente del tornillo, la lima se desplazaría lógicamente la longitud del paso de la rosca, por tanto un dato de diseño a tener en cuenta, en función del tipo de lima que se quiera obtener, sería el paso de la rosca del gran tornillo horizontal.

A su vez una rueda de palas en el extremo del eje de la manivela hace que unas cuerdas tensen y destensen el eje donde está sujeto el pie del martillo. De esta forma se consigue que el martillo suba y baje en cada vuelta de la manivela, y en su caída produzca el golpe que entalla la lima. Se aprecian también en el folio diferentes tipos de puntas de martillo.

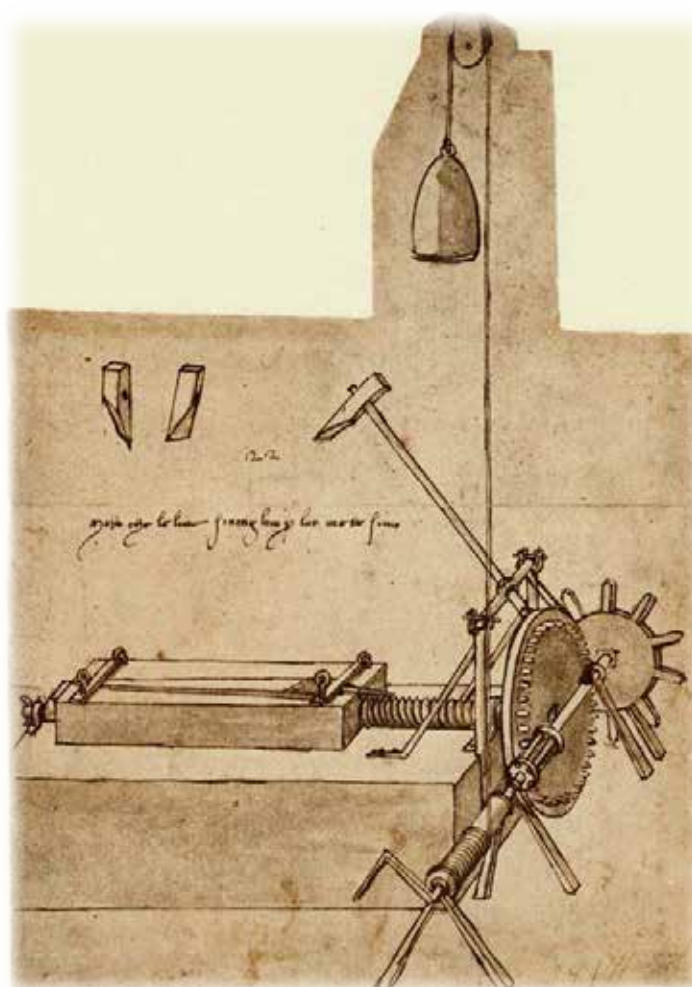


Figura 7.9: Máquina para fabricar limas.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0024r

7.2.10. Asadores automáticos (CA_0021r).

Se puede leer en la parte inferior del folio “*he aquí el auténtico modo de hacer asados*”. De esta forma Leonardo sentencia su firme propósito de automatizar la tarea de asar cochinitos, aves o cualquier otro tipo de presa. El dispositivo lo único que pretende es que una vez encendida la lumbre y colocado el animal en su eje, éste de vueltas de forma automática para que se vaya asando poco a poco. Para ello ideó dos tipos de automatizaciones, una más compleja basada en un complicado sistema de engranajes (en la parte superior) y otra un poco más sencilla en la parte inferior del folio.

En el segundo mecanismo, observamos como Leonardo proyecta todo el ingenio en la misma chimenea donde se va a llevar a cabo el asado. Una hélice situada en la parte estrecha de la chimenea, al pasar el aire caliente a través de sus álabes, mueve un eje vertical que transmite el movimiento a un engranaje de linterna que acciona a su vez un eje horizontal. Dicho eje superior transmite el movimiento mediante unas poleas y unas correas a otro eje horizontal inferior, que es donde se sitúa el asado para que vaya dando vueltas.

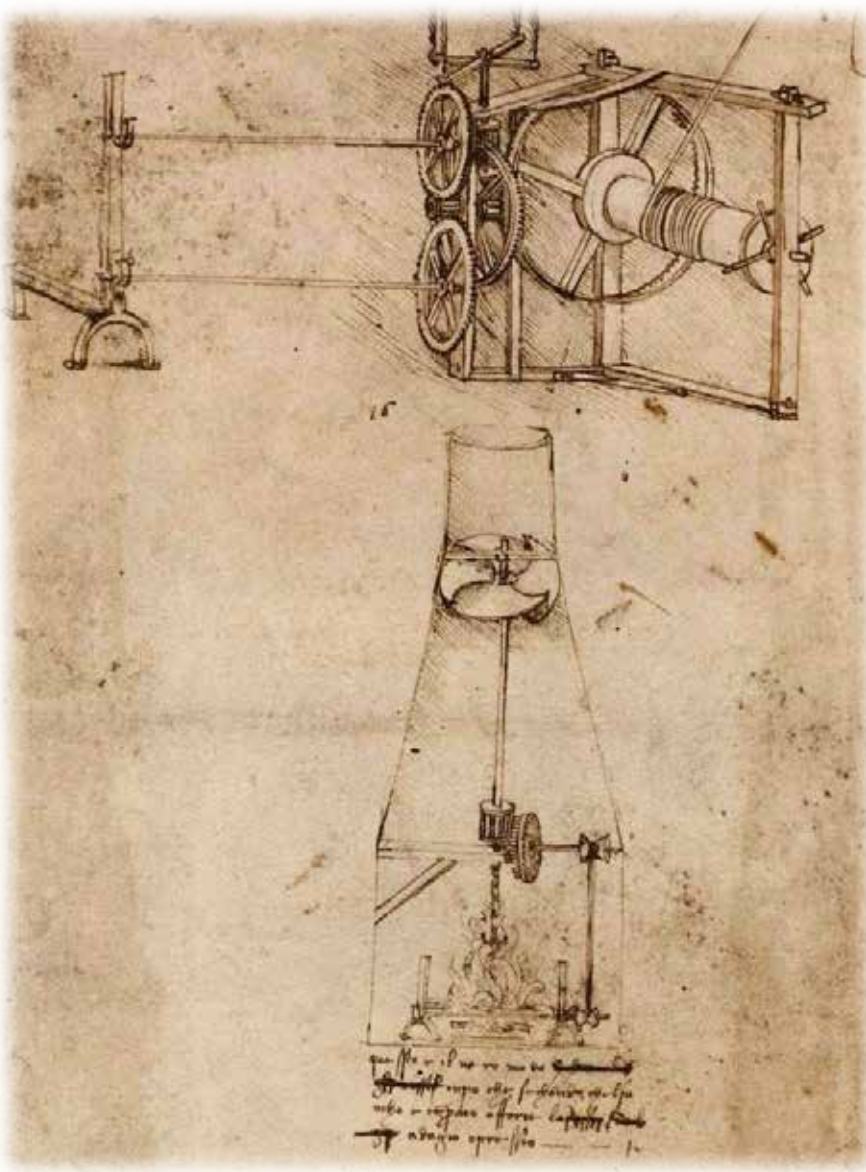


Figura 7.10: Asadores automáticos.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0021r

7.2.11. Máquina de desbarbado (CA_1105r).

Con el propósito de conseguir un tejido lo más liso posible, Leonardo ideó esta bella máquina automática de desbarbado. Cortar, eliminar si es posible de raíz el pelo sobrante de una tela para que esta fuera más manipulable en los procesos sucesivos o bien simplemente para que la tela fuera más agradable al contacto con la piel; fue una tarea que Leonardo desarrolló a lo largo de numerosos ingenios que nos ha dejado dibujados en sus manuscritos. Siempre con la idea de automatizar los trabajos manuales y acelerar los procesos, con el objetivo de ganar tiempo y dinero. En la máquina que nos ocupa, en el texto que acompaña de puño y letra de Leonardo, nos cuenta como unas tijeras pueden “*descender hasta llegar a la raíz del pelo*”.

En la parte superior derecha del folio se aprecia como dos cilindros accionados mediante una manivela permiten que la tela se desplace a través de la máquina. También se aprecia un boceto de unas tijeras a su izquierda.

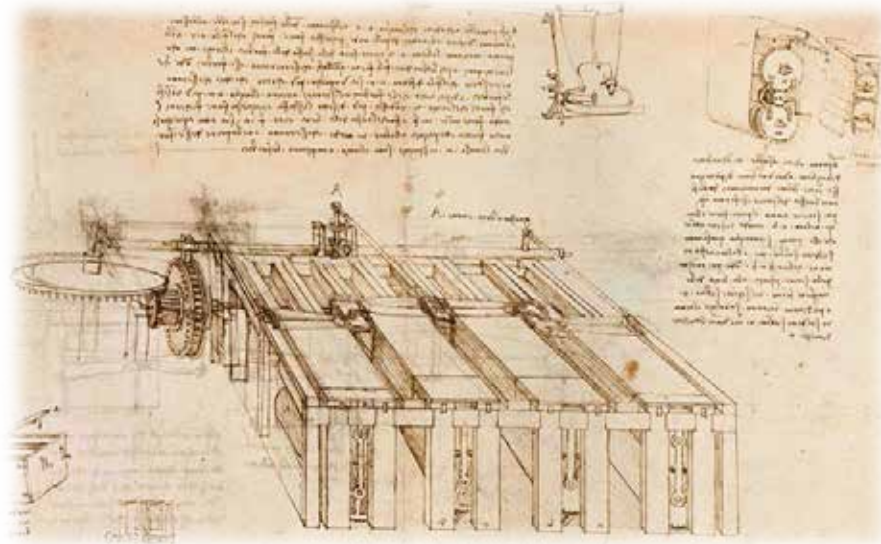


Figura 7.11: Máquina de desbarbado.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 1105r (detalle)

7.2.12. Máquina de cardado (CA_0106r).

Una vez más Leonardo intenta automatizar procesos en la industria textil. En este caso diseña una máquina para cardar, es decir cepillar las telas para que éstas fueran lo más lisas y aterciopeladas posibles. Se ve claramente como entre dos rodillos están tensadas cinco telas de lana, que al girar, en la parte inferior de las mismas, gracias a la acción de unos cepillos de espinos de flores, realizan de forma automática el cardado de las telas.

No obstante tal y como refleja los textos del folio junto al diseño, Leonardo era consciente de que la máquina era mejorable. Lo cual es cierto y así lo constatan las numerosas anotaciones y diseños que Leonardo realizó en otros folios del Códice Atlántico para mejorar este diseño.

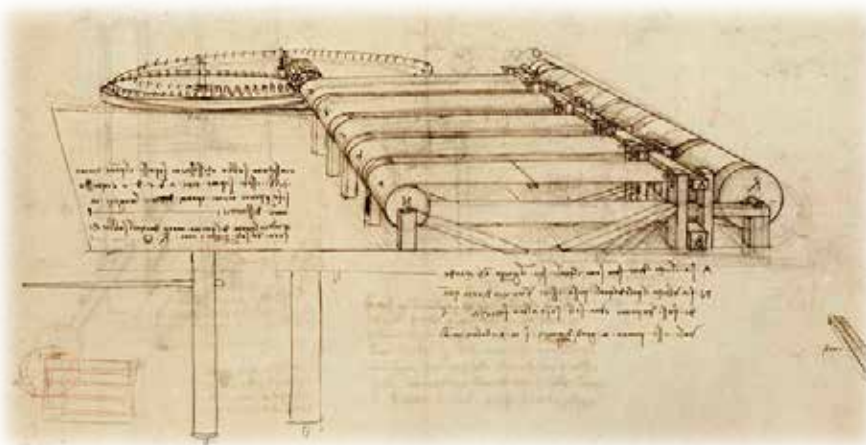


Figura 7.12: Máquina de cardado.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0106r

7.2.13. Máquina para fabricar cuerdas (CA_0012r).

Magnífica perspectiva con todo lujo de detalles, donde Leonardo dibujó una máquina para la fabricación de cuerdas. La máquina consta de un gran tambor o cilindro de eje horizontal acanalado, manejado por una manivela. Se aprecia una serie de bobinas dispuestas en semicírculo alrededor del tambor, concretamente 15, tantas como hebras se quieren entrelazar. El camino que ideó Leonardo en el tambor hace que a cada vuelta del mismo se vayan entrelazando todas las hebras para ir formando la cuerda.

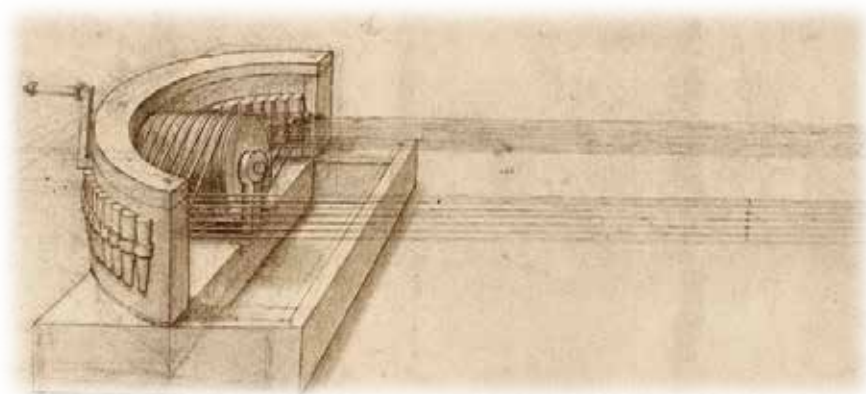


Figura 7.13: Máquina para fabricar cuerdas.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0012r

7.2.14. Máquina de hilar accionada por manivela con uso de aleta (CA_1090v).

El proceso de hilado, es decir el procedimiento por el cual se parten de unas fibras textiles para obtener hilo, es algo que la humanidad domina desde la Antigüedad. No obstante, en la época de Leonardo seguía siendo un proceso muy rudimentario, por supuesto manual, donde a partir del giro del huso de una rueca y unas manos expertas, casi siempre de mujeres, se obtenía unos pocos tramos de hilo. En su afán de automatizar las tareas más laboriosas y para aumentar la productividad, Leonardo proyectó la siguiente máquina de hilar.

Mediante una manivela y una serie de engranajes transforma el movimiento giratorio en rectilíneo y mediante la transmisión por correa a un huso conseguía realizar las tres tareas básicas en toda hilatura: el estirado, la torsión y el arrollado del hilo en las bobinas. Se aprecian detalles de la máquina por todo el folio. Destacamos el detalle de la sección en planta en la parte inferior derecha por su claridad. Sección que sería la envidia de los delineantes actuales y que reproduce fielmente lo que las normas actuales del dibujo industrial de hoy en día se define como un corte de detalle.

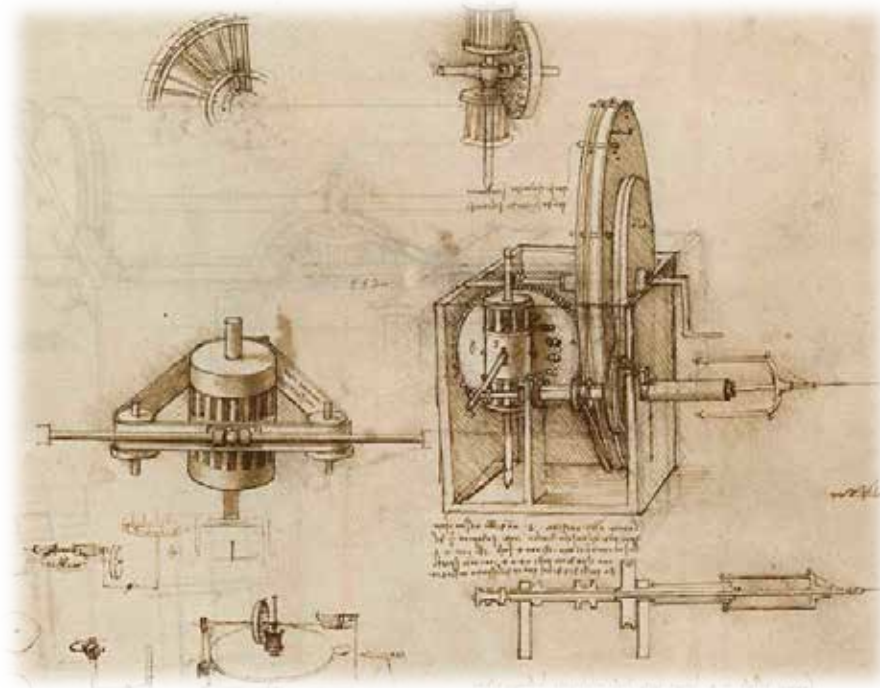


Figura 7.14: Máquina de hilar accionada por manivela con uso de aleta.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 1090v

Capítulo 8

Leonardo da Vinci INGENIERO AERONÁUTICO

*El alma tiene ilusiones como el pájaro alas,
eso es lo que la sostiene.
(Francis Bacon)*

8.1. Introducción.

Probablemente la posibilidad de que el hombre imitara el vuelo de los pájaros y lograra volar por medio de algún artilugio mecánico, provistos de alas mecánicas y accionadas por complicados dispositivos, haya sido uno de los temas que más ha contribuido a mitificar la figura de Leonardo.

Si bien es verdad que Leonardo dedicó mucho esfuerzo y tiempo en tratar de emular el vuelo de los pájaros; recientes investigaciones de los manuscritos de Leonardo, principalmente el Códice Atlántico, han permitido elaborar otro tipo de teorías que permitiera explicar más plausiblemente los extraordinarios diseños que nos dejó Leonardo.

Es evidente que Leonardo dedicó sus primeros diseños en intentar reproducir el vuelo de forma mecánica por medio de alas artificiales con la energía producida por el hombre; sin embargo, parece ser que según Taddei y Zanon, no se trataba tanto de conseguir una máquina voladora real que permitiera volar al hombre de una forma artificial, como de sencillamente diseñar unas máquinas escénicas para representaciones teatrales.

En una siguiente etapa, Leonardo dedicó mucho tiempo, gracias a sus excepcionales dotes de observación y a su increíble modo de recrear gráficamente todo lo que le rodea, a estudiar el vuelo de los pájaros, mostrando especial interés en la fuerza del viento, en las trayectorias ascendentes y descendentes de los pájaros, y en cómo aprovechaban para planear sobre el viento y dejarse llevar por las corrientes. Es en este período cuando Leonardo más que intentar reproducir el vuelo mecánico en sí, lo que pretende es imitar los principios del vuelo natural, aprovechando la fuerza del viento. Como ser capaz de vislumbrar los primeros atisbos de los principios que rigen los planeadores modernos. Es cierto que muchas de las anotaciones que Leonardo nos dejó en sus manuscritos apuntan en esta dirección, como las relativas al forro de tela con el que se revestían las estructuras de las alas mecánicas, diseñadas por Leonardo con mucha precisión, o el famoso boceto del paracaídas, fabricado con “tela de lino”, que permitiera un vuelo de planeo o a vela.

Si nos remontamos a los primeros estudios relativos a una máquina voladora, quizás el más antiguo sea el contenido en la hoja 447E de los Uffizi. Es probable, tal y como postulan Taddei y Zenon, que estos estudios de Leonardo (y otros similares de la misma época) pertenezcan al ámbito del diseño de “ingenios”, es decir, de máquinas escénicas proyectadas por los talleres florentino. En Florencia se habían dedicado con éxito a proyectos análogos

ingenieros y artistas como Brunelleschi y Verrocchio. Si es fuerte la dependencia de Leonardo de este contexto, igualmente fuerte es su intención de superarlo. Encontramos una traza de ello en esta misma hoja de los Uffizi, mínima, pero muy clara. En el reverso de la hoja Leonardo ha dibujado la trayectoria del vuelo en descenso de un ave, anotándola. Así pues, el estudio se traslada de la dimensión empírica a la teórica y zoológica.

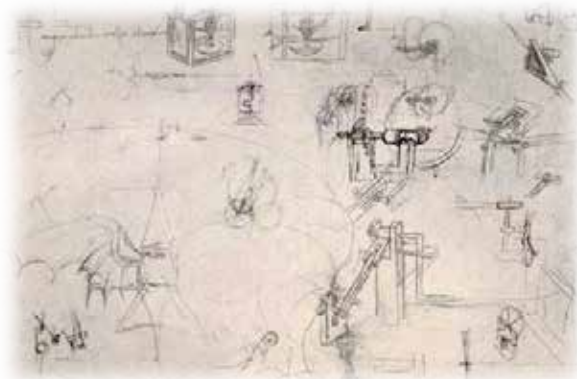


Figura 8.1: Primeros estudios de máquina voladora.
Galería de los Uffizi (Florencia), f. 447E

Cuando marcha a Milán para ofrecer sus servicios de ingeniero a Ludovico el Moro, no hace alusión, en la carta con la que se presenta, a máquinas voladoras. Quizás podemos deducir que en su mente el proyecto aún no se había desvinculado de su empleo escénico. Tal vez, sencillamente, una máquina para volar habría parecido algo inútil o demencial. En cualquier caso, las mentes más avanzadas de los siglos anteriores ya habían pensado en el vuelo humano.

Aparte de las tentativas más o menos empíricas de las que tenemos noticias, y que tienen escaso significado desde un punto de vista científico, hay que recordar que en pleno siglo XIII Roger Bacon aludió a la posibilidad de hacer volar al hombre con alas mecánicas. Además, en el siglo XIV, entre los paneles que decoran la base del “*campanile de Giotto*”, representando las distintas actividades industriales, uno representaba el mito de Dédalo: una figura humana con alas atadas a los hombros. En efecto, si bien era indudablemente una figura mítica, entre los ingenieros florentinos existía la idea del vuelo humano, aunque fuera de forma utópica; y sería Leonardo quien se lo tomara en serio y la desarrollara de forma científica.



Figura 8.2: Dédalo.
Paneles que decoran la base del campanario de Giotto.
Es la torre campanario de la iglesia Santa María del Fiore, Catedral de Florencia.

Este desarrollo se produjo después del traslado a Milán. A diferencia de lo que se esperaría, no fue la zoología el principal campo científico en el que Leonardo se inspiró para los proyectos de máquinas voladoras realizados en las décadas de 1480 y 1490. En este periodo el estudio del mundo animal pasó a un segundo plano (para ser retomado después de 1500). En estos años, para proyectar la máquina voladora partió sobre todo del hombre. Sus proyectos nacieron de la convergencia de dos campos de estudio: la anatomía y la mecánica (el estudio de los pesos y del movimiento).

Leonardo, por un lado, estudia la estructura anatómica del cuerpo humano, sus proporciones, y por otro investiga el comportamiento de los pesos, las características dinámicas y cinemáticas del movimiento. Este último ámbito, la ciencia de *ponderibus*, tenía a sus espaldas una tradición ilustre, pero se había quedado como una disciplina abstracta, raramente aplicada a la realidad. Leonardo, en cambio, ya en el transcurso de la década de 1480, estudió y midió los potenciales dinámicos del cuerpo humano. Hay hojas en las que se ve el cuerpo humano representado en las más diversas posturas y situaciones especiales, con el fin de probar su capacidad de desarrollar fuerza. Muchos proyectos de máquina voladora de este periodo son la aplicación de estos estudios sobre los potenciales dinámicos del cuerpo humano. Por ejemplo, el famoso proyecto conocido como “ornitóptero” tiene poco que ver con el mundo animal (Manuscrito B de Francia, f. 80 recto).

El problema de las maniobras de viraje es desarrollado en otro grupo de proyectos, en los que el piloto tiene una posición horizontal (por ejemplo, Códice Atlántico f. 824 verso y Manuscrito B de Francia, f. 79 recto). En este grupo de estudios se aprecia también una mayor atención al vuelo natural; sin embargo, hay que subrayar que, a pesar de algunos dibujos de conjunto (por ejemplo los folios 70br y 846v del Códice Atlántico), en raras ocasiones Leonardo propone una síntesis entre proyectos centrados en la fuerza a desarrollar para volar y proyectos destinados a las maniobras de viraje.

A comienzos del siglo XVI, en Florencia, Leonardo volvió a estudiar de modo sistemático el vuelo humano. La naturaleza, la zoología, el estudio del vuelo natural de las aves, adquiere para él una nueva relevancia. Leonardo pasa horas al aire libre observando las técnicas de vuelo de los pájaros. De esos años datan algunos códices que son efectivamente libretas de bolsillo en las que Leonardo apuntaba rápida y directamente, con un dibujo, con una nota escrita, cuanto observaba. Los Manuscritos L y K1 de Francia son pequeños códices de este tipo. Por tanto, no sorprende que algunas notas contenidas en el Manuscrito K1 fueran posteriormente tachadas: se trataba de apuntes rápidos, que después, en la calma de su estudio, desarrollaría mejor.

El Códice sobre el vuelo de los pájaros (de un formato algo más grande que los otros), de este periodo. Es un raro ejemplo de manuscrito leonardiano casi enteramente dedicado a un solo tema: el vuelo, el natural y su imitación con la máquina voladora. Ahora más que nunca, de hecho, el proyecto de la máquina voladora se configura como un intento de radical imitación de la naturaleza, del pájaro natural, en su forma y en sus acciones. Esto resulta evidente analizando el contenido del Códice sobre el vuelo de los pájaros, que se compone de dos secciones principales; una centrada en el vuelo batiente o vuelo activo (es decir, obtenido batiendo las alas), y la otra sobre las maniobras de equilibrio durante el vuelo en caso de viento. Es muy significativo que cada sección se componga a su vez de dos tipos de estudios: por un lado estudios naturalistas relativos a las técnicas de vuelo de las aves, a las leyes anatómicas y aerodinámicas en las que se basan, y por otro lado, a estudios en los que intenta realizar un modelo de máquina voladora capaz de imitar lo estudiado en la naturaleza.

Hay que resaltar que Leonardo creía firmemente en la posibilidad humana de imitar el vuelo de los pájaros. Esta confianza deriva de su concepción general del mundo natural, que en esos años se manifiesta especialmente: está convencido de que existe una profunda analogía entre todos los seres vivos. En sus estudios de anatomía comparada intenta demostrar una serie de semejanzas entre el hombre y los otros animales, por ejemplo los cuadrúpedos. Observa que,

cuando es un recién nacido, el hombre camina también a cuatro patas, y que, cuando crece, en el acto de andar la relación dinámica entre las extremidades superiores e inferiores en el hombre es análoga a la relación entre las patas delanteras y traseras en los cuadrúpedos. La posibilidad del vuelo humano se basa, según Leonardo, en esta analogía general entre hombres y animales.

Posteriormente, continuaría creyendo en la posibilidad del vuelo humano activo, gracias a la fuerza desarrollada por sus músculos. Sin embargo, en la última etapa de su vida, adquirió más importancia la consideración del vuelo aerostático (es famoso el estudio del vuelo planeado de un hombre colgado de una tabla en el Manuscrito G de Francia, folio 74 recto), y disminuyeron los proyectos de máquinas, aumentando los dedicados al estudio puramente teórico (muchos están entre las páginas del Manuscrito E). También las acrobacias durante el vuelo de las aves, en esta época, son estudiadas no ya en función de la invención de una máquina para volar, sino para comprender indirectamente las leyes que regulan las corrientes aéreas y los vientos. Tampoco en este periodo faltan, como hemos dicho, las alusiones al vuelo artificial. Sin embargo, las fuentes antiguas (VASARI, LOMAZZO) hablan de resultados muy distintos. Él se dedica, por ejemplo, a la realización de pájaros y objetos obtenidos con mecanismos automáticos o incluso inflando materiales elásticos. Por tanto, un epílogo de tipo evasivo, lúdico. Un destino que hace referencia a otros ámbitos de la investigación sobre máquinas de Leonardo.

8.2. El sueño de volar de Leonardo en sus manuscritos.

8.2.1. Pájaros en vuelo (CA_0845r).

Leonardo siempre se sintió atraído con la idea de hacer realidad el sueño de conseguir que los humanos consiguieran volar. Fascinado por el vuelo de los pájaros, los estudió con enorme dedicación, siempre intentando reproducir con sus dibujos cualquier observación que le permitiera comprender cómo los pájaros podían volar...y los más difícil todavía, si el hombre sería capaz de imitarlos.



Figura 8.3: Estudio de pájaros en vuelo.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0845r

En este sentido, en el folio 845 (recto) del Códice Atlántico, nos encontramos esbozados con gran efecto artístico, una representación dinámica, casi en movimiento, de las distintas trayectorias de los vuelos de los pájaros aprovechando ciertas condiciones de viento.

Según anotó Leonardo, las figuras en espiral del margen superior izquierdo y la figura central más grande, representan la trayectoria descrita por los pájaros que “vuelan sin batir sus alas, a favor del viento”, es decir, aprovechando la fuerza del viento para dejarse llevar por él.

Por el contrario, la espiral que hay dibujada en el margen superior derecho, representaría el vuelo contra el viento. Y finalmente, en la parte inferior, se observan dos trayectorias de vuelo que se confunden: la de la izquierda representa el vuelo con viento suave y, la de la derecha, con viento fuerte.

8.2.2. Hombre volador (CA_0166r y CA_0166v).

En este folio Leonardo trata los temas sobre elementos naturales, el concepto físico de la fuerza y el impulso, así como el problema del alma. Pero si destaca por algo este folio es precisamente por su dibujo central, de un hombre joven con alas, como si fuera un Ícaro. En la parte central izquierda se puede apreciar esbozado un dibujo que intenta reproducir la estructura de las alas. En el reverso del folio (CA_0166v) se puede apreciar esta misma estructura alada con mucho más detalle.



Figura 8.4: Hombre volador y estructura alada.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, ff. 0166r y 0166v



Figura 8.5: Detalle ampliado del hombre volador.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0166r (detalle)

8.2.3. Alas mecánicas.

8.2.3.1. Mecanismo de ala mecánica fijándose en una libélula (CA_1051v).

Por su datación en 1482 se puede decir que el folio 1051 verso del Códice Atlántico es uno de los ejemplos más antiguos de trabajo de investigación de Leonardo sobre el estudio de una máquina voladora y su conexión con el vuelo natural de un animal, en este caso de una libélula. Posiblemente sea precisamente la libélula el primer boceto que realizó Leonardo (a la derecha del folio) junto con otro insecto volador (en la mitad izquierda). Por el trazado, Leonardo no pretendía realizar una reproducción fiel de los mismos sino centrarse en la reflexión que dejó por escrito en la parte central. Observa que en el vuelo de los insectos, cuando el par de alas delanteras se eleva (para descender después nuevamente), el par trasero desciende, garantizando un plano de apoyo en el aire. Está claro por tanto que este primer conjunto de dibujos y anotaciones hace referencia al vuelo natural.

Existe el folio un segundo conjunto de notas, esta vez referidas al vuelo mecánico. Es dibujo de la parte superior derecha representa un ala mecánica formadas por dos partes que Leonardo se encargó de señalar como A y B. Al batir las alas, la parte exterior B se mueve hacia arriba, mientras que la parte interior A desciende, sosteniendo la máquina en vuelo. En el margen izquierdo del folio Leonardo escribió: “*Para ver volar con 4 alas, ve a los arroyo y verás libélulas negras*”.

Sin duda la parte más original del diseño de Leonardo sea el mecanismo propulsor del ala mecánica. Un artilugio un poco complejo, en donde quizás Leonardo tuviera sus propias dudas a la hora de esbozarlo tal y como se puede apreciar en el dibujo de la parte superior derecha con sus tachaduras, desechando un diseño equivocado. En el diseño definitivo Leonardo nos presenta un doble tornillo sin fin que al ser accionado con una pequeña palanca, consigue el movimiento descrito del ala mecánica.

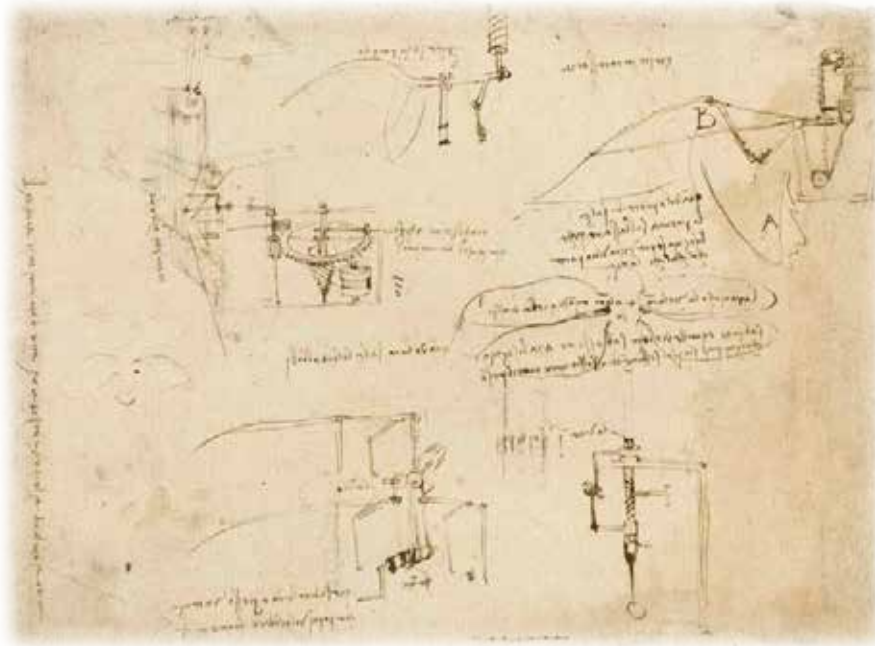


Figura 8.6: Estudio del mecanismo accionador de ala mecánica tomando como referencia una libélula.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 1051v

8.2.3.2. Experimento para probar si un ala mecánica con 200 libras de peso podía ser accionado por la fuerza del hombre (MsB_0088v).

En una primera fase, Leonardo concibe la máquina voladora como un desafío dinámico lanzado por el hombre a la naturaleza. Piensa que el aire, a diferencia del agua, si se puede comprimir. En el aire, comprimido a través del ala artificial de la máquina, el hombre podrá mantenerse en vuelo como si navegase sobre el agua. El problema a resolver es batir el ala a una velocidad suficiente para prevenir la fuga de aire del aire de alrededor. El proyecto en el folio 88 verso del Manuscrito B, pretende probar la capacidad del cuerpo humano y de un ala de cierta amplitud de levantar un tablón de peso de 200 libras (unos 68 kilogramos). La dimensión empírica de este estudio es expresada por Leonardo en un dibujo muy completo, con indicaciones sobre la máquina y su accionador.

El peso de 200 libras unido al ala y al asta mediante una junta debía ser levantado. Este peso representaba la suma de la carga de las estructuras empleadas en la construcción de la máquina voladora y el peso de la persona que la debía maniobrar. Si el impulso del hombre y la fuerza desarrollada por el ala artificial en el aire eran suficientes, el peso se elevaba del suelo como garantía de la correcta forma de las alas. Además, el operador debía conseguir también mantener en suspensión el peso con sucesivos y rápidos aleteos. La palanca que se debía accionar era presumiblemente de metal y lo bastante larga para mover con facilidad el ala artificial.

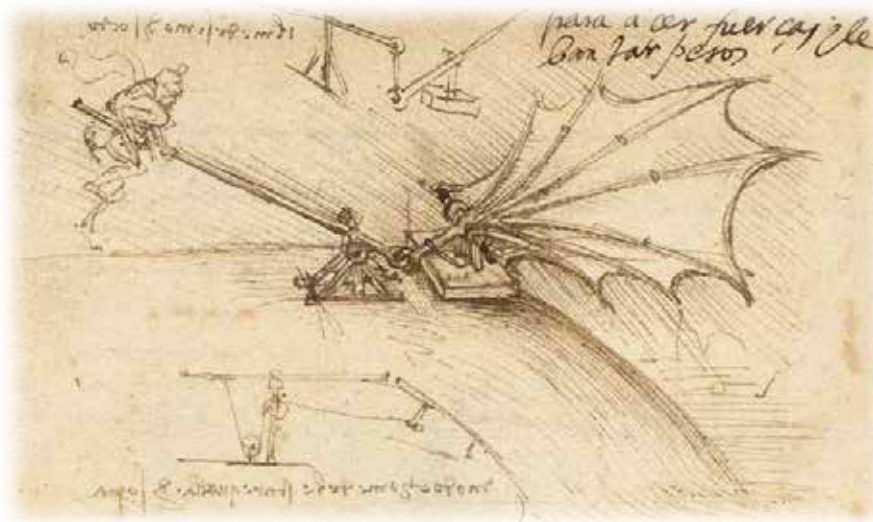


Figura 8.7: Experimento para probar si la fuerza humana era capaz de batir un ala mecánica con 200 libras de peso. Instituto de Francia (París), Manuscrito B de Francia, f. 0088v

8.2.3.3. Estructura de ala mecánica de grandes dimensiones (CA_0858r).

El folio 858 (recto) del Códice Atlántico muestra el diseño de un ala de grandes dimensiones, cuya estructura está detallada con enorme precisión. En la parte central Leonardo escribió la palabra “tela”, lo que parece evidenciar que el mecanismo iba a recubrirse con este material. Se aprecia como un cabrestante era el mecanismo encargado de mover el ala. La manivela del cabrestante al girarla, hacía que la cuerda se moviera con un movimiento alternativo, intentando de esta forma reproducir el batir de las alas. Algunos investigadores, tal y como se ha apuntado en la introducción del capítulo, interpretan este artilugio como una maquinaria escénica diseñada para simular el movimiento de las alas, y no tanto como un dispositivo mecánico real para volar.

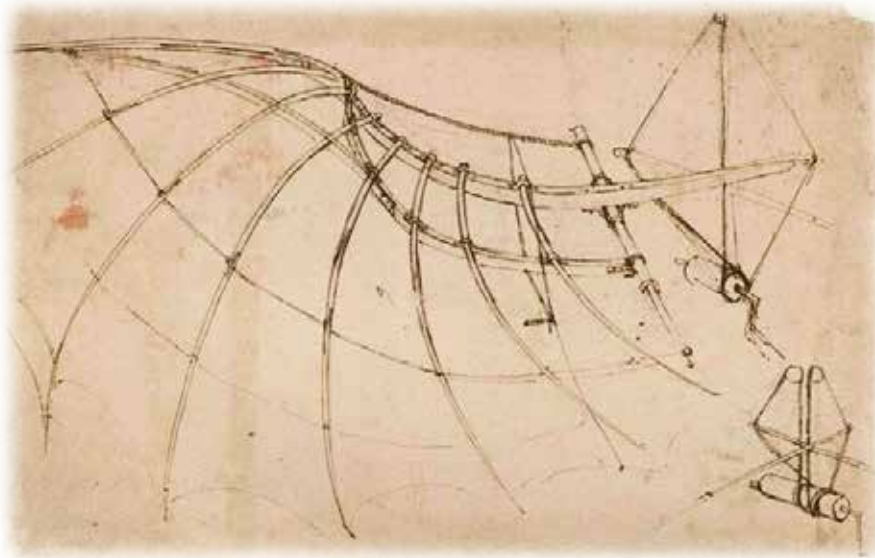


Figura 8.8: Ala mecánica.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0858r

8.2.3.4. Diseño de varias alas mecánicas (CA_0846v).

En el folio 846 (verso) del Códice Atlántico se pueden llegar a apreciar hasta tres dibujos diferentes de alas mecánicas, resaltando el central, dibujado con lápiz rojo. En uno de ellos, Leonardo anotó sus medidas en “braccia”, medida equivalente a unos 2 pies o aproximadamente 60 cm. Muy sorprendentes son los bocetos de la parte derecha, donde se ve con claridad a un hombre pilotando en posición vertical uno de estos artilugios, sujeto con unas correas que le cruzan el pecho y las piernas.

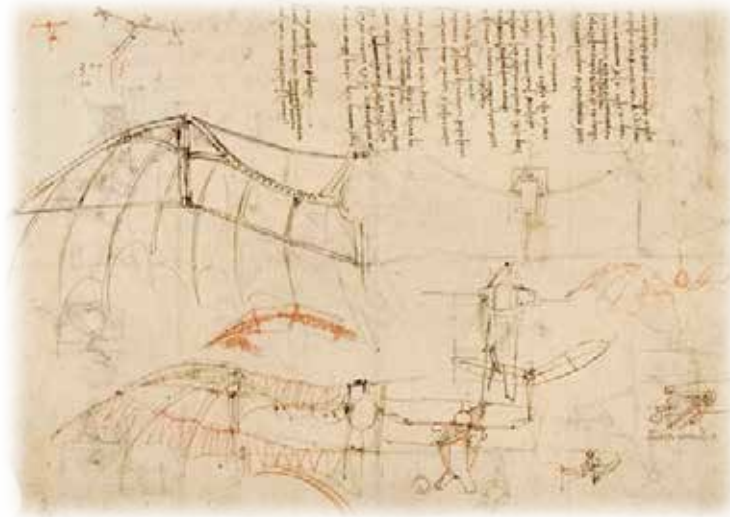


Figura 8.9: Estudio de varias alas mecánicas..
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0846v

8.2.3.5. Estudio de alas mecánicas (CA_0070br).

Del mismo período nos encontramos con un diseño de un ala mecánica, también a lápiz rojo, que Leonardo nos dejó en el folio 70br del Códice Atlántico. Se aprecia el entramado de tela cubriendo la estructura del ala. Como en el folio anterior también nos encontramos con anotaciones de medidas del ala. Y en su parte superior aparece escrita la palabra “cuero”, probablemente el material que Leonardo tenía pensado para las correas de sujeción.

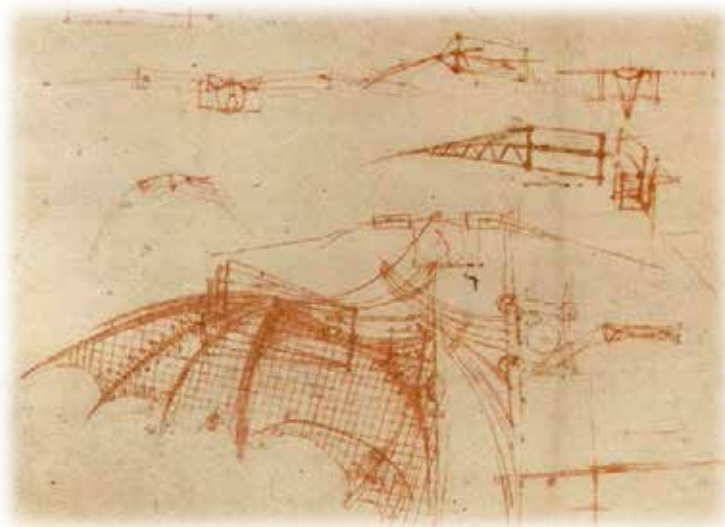


Figura 8.10: Estudio de alas mecánicas.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0070br

8.2.3.6. Estudio más preciso de un ala mecánica (CA_0844r).

Continuado con el estudio para la construcción de alas mecánicas, en el folio 844 (recto) del Códice Atlántico, Leonardo nos muestra un diseño mucho más preciso, intentado emular la anatomía de los pájaros. Precisamente un pequeño texto escrito en el margen superior derecho, de la mano de Leonardo, dice así: “*Disección de un pájaro*”. Efectivamente, el diseño central del ala mecánica entera está dibujada con enorme precisión y se parece bastante a la forma de una mano o de una garra. Sólo se aprecia el esqueleto o armazón, encargándose Leonardo de anotar que todo se recubriría con plumas: “*y harás el modelo utilizando plumas de ave para escribir*”. El resto del folio se acompaña con bocetos menores que sirven para completar y comprender mejor el diseño del mismo, como el sistema de resortes del margen izquierdo destinado para mover el dispositivo, o el diseño de una junta de unión en la parte derecha del mismo.

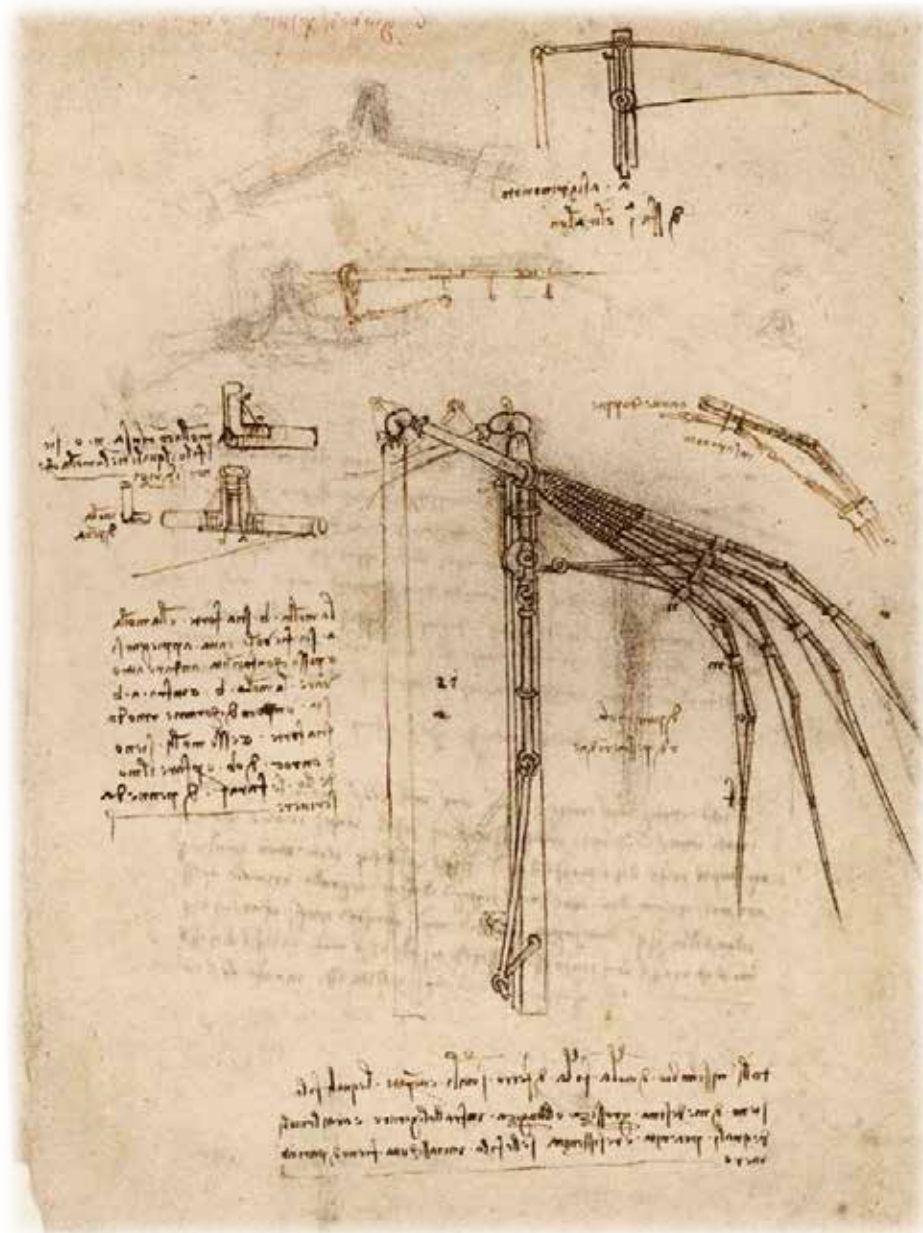


Figura 8.11: Estudio de ala mecánica.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0844r

8.2.4. Estudio de máquinas voladoras.

8.2.4.1. Estudio de máquinas aladas y paracaídas (CA_1058v).

En el folio 1058 (verso) del Códice Atlántico, Leonardo sigue profundizando en el estudio sobre el vuelo mecánico. En la parte superior del mismo se aprecian dos bocetos de una máquina alada, conducida por la acción de la fuerza muscular de brazos y piernas del piloto. Justo debajo se aprecia el dispositivo completo, pero sin el piloto, con los engranajes y la manivela.

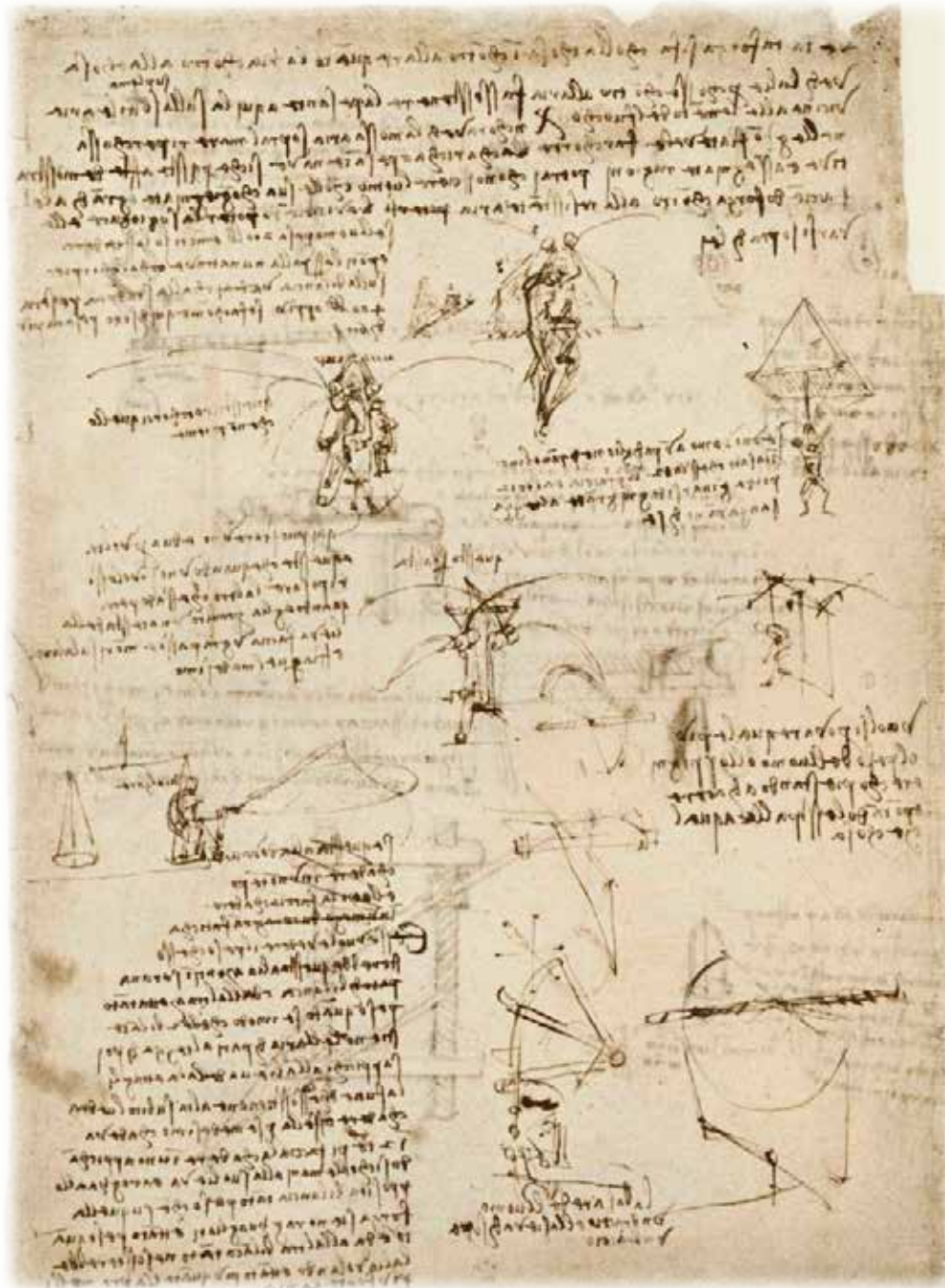


Figura 8.12: Dispositivos con alas mecánicas.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 1058v

En la parte derecha uno de los dibujos más célebres del Códice Atlántico, un hombre en paracaídas. Se observa la silueta de un hombre planeando colgado de una tela con forma de pirámide hueca. Se considera como la primera documentación gráfica de lo que siglos más tarde se denominó paracaídas. Leonardo escribe junto al diseño: “*pabellón de tela de lino*”, es decir, una tela que en función del peso del piloto, le permitiría lanzarse desde grandes alturas “*sin hacerse daño*”.

Debajo del paracaídas se ve un esbozo de trazado muy simple de la silueta de un hombre accionando la máquina voladora con los hombros, y en el margen izquierdo se aprecia un hombre con el aparato volador en una balanza, para comparar el peso del hombre y el de la máquina.

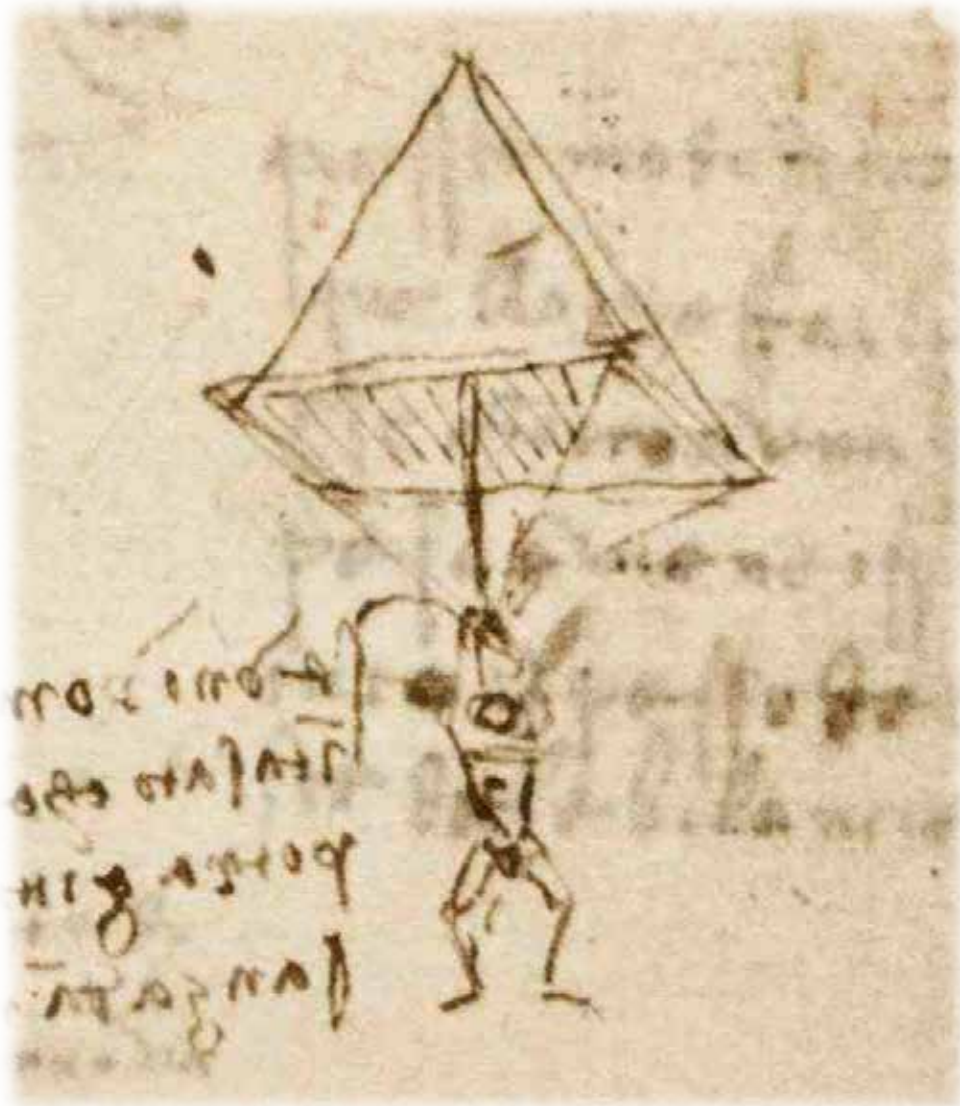


Figura 8.13: Hombre en paracaídas.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 1058v (detalle)

8.2.4.2. Tornillo aéreo (MsB_0083v).

En el folio 83 verso del Manuscrito B, aparece un estudio de una extraña máquina voladora denominada tornillo aéreo, dispositivo que, sometido a rotación, debería elevarse y volar. Pensando en el vuelo humano, Leonardo dedica gran atención tanto al potencial dinámico del cuerpo humano (que debería desarrollar la fuerza necesaria para el funcionamiento de la máquina voladora) como el otro aspecto del problema, esto es el aire, el elemento en que la máquina voladora debía funcionar. La idea de un tornillo aéreo capaz de volar nace en este último ámbito de estudios científicos. Es un paso importante: dejando a un lado la dimensión teórica y científica a la que pertenece el estudio, éste aparecerá, en la mejor de las hipótesis, sólo como un utópico delante de invenciones modernas.

Leonardo estudia el aire y, entre otras cosas, llega a la conclusión de que éste, a diferencia del agua, es comprimible si es prensado con suficiente energía. Uno de los estudios más espectaculares del Manuscrito B (folio 88 verso ya comentado) hace referencia a un experimento para verificar esta acción. El tornillo aéreo nace del mismo orden de ideas. Las rayas dibujadas alrededor de la máquina, como sucede en el experimento del ala del folio 88v, plasman la tangible, aunque invisible, presencia del aire. Si el aire se puede comprimir, tiene un espesor material; según esto, Leonardo considera posible que un dispositivo en forma de tornillo, al girar rápidamente, pueda elevarse y volar: éste se atornillará en el espesor del fluido del aire como un tornillo en otro material. En el folio no queda claro si el tornillo aéreo sería girado por hombres o por el rápido desenrollarse de un cable previamente enrollado (como el de una peonza).

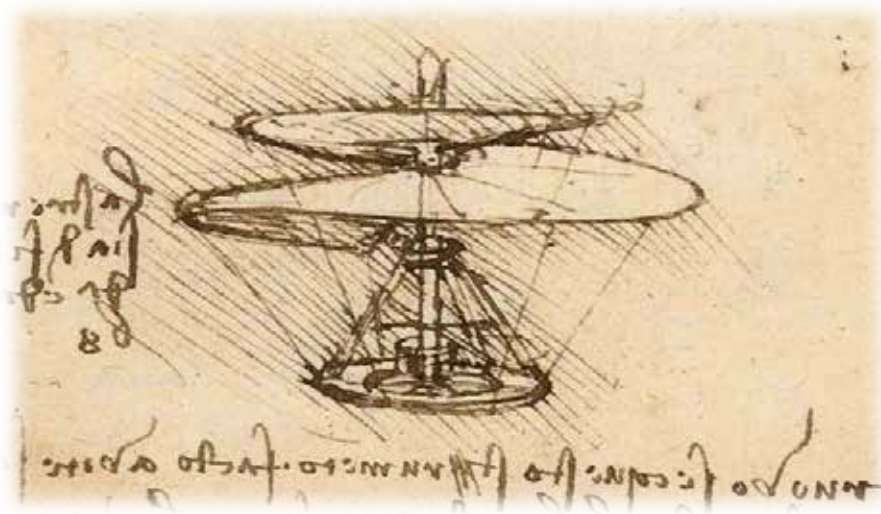


Figura 8.14: Tornillo aéreo

Instituto de Francia (París), Manuscrito B de Francia, f. 0083v (detalle)

El mejor comentario al dibujo de Leonardo es precisamente el texto del propio Leonardo: *“El extremo exterior del tornillo constará de una cuerda de hilo de hierro grueso, y desde el círculo al centro habrá 8 brazos (unos 5 metros), Pienso que, si este instrumento en forma de tornillo está adecuadamente construido, es decir, fabricado con tela fina cuyo poros se obturarán con almidón, y gira con rapidez, se hará hembra en el aire y se elevará hacia lo alto. A modo de ejemplo, si se impulsa al aire una regla ancha y fina con un movimiento enérgico, se observará que el brazo sigue la línea de corte de dicho eje. Se armará la mencionada tela con cañas largas y gruesas. Puede construirse un pequeño modelo en papel, cuyo eje sea de fina lámina de hierro, que, si se rota a la fuerza, hará dar vueltas al tornillo al liberarlo”.*

8.2.4.3. Ornitóptero (MsB_0080r).

Como ya hemos comentado en la introducción, el proyecto conocido como “ornitóptero” (máquina que reproduce el batir de las alas) que plasmó Leonardo en el folio 80 recto del Manuscrito B de Francia, tiene poco que ver con la zoología. Es cierto que sus alas deberían aletear en cruz, como las de algunos insectos; sin embargo, observando la forma de esta máquina (un mecanismo motor con piloto y alas, albergado en un casco de forma hemisférica) se ve que la zoología tiene poco que ver con este proyecto. La clave para comprenderlo reside en su funcionamiento. Leonardo ideó un complejo sistema mecánico para aprovechar al máximo los potenciales dinámicos del cuerpo del piloto, que deberá desarrollar la fuerza, no sólo con los brazos, sino también con los pies y la cabeza. No hay trazas de un sistema para dirigir esta máquina. Se trata de un piloto “ciego” cuya única misión es desarrollar fuerza para batir las alas a la velocidad suficiente para levantar el vuelo.

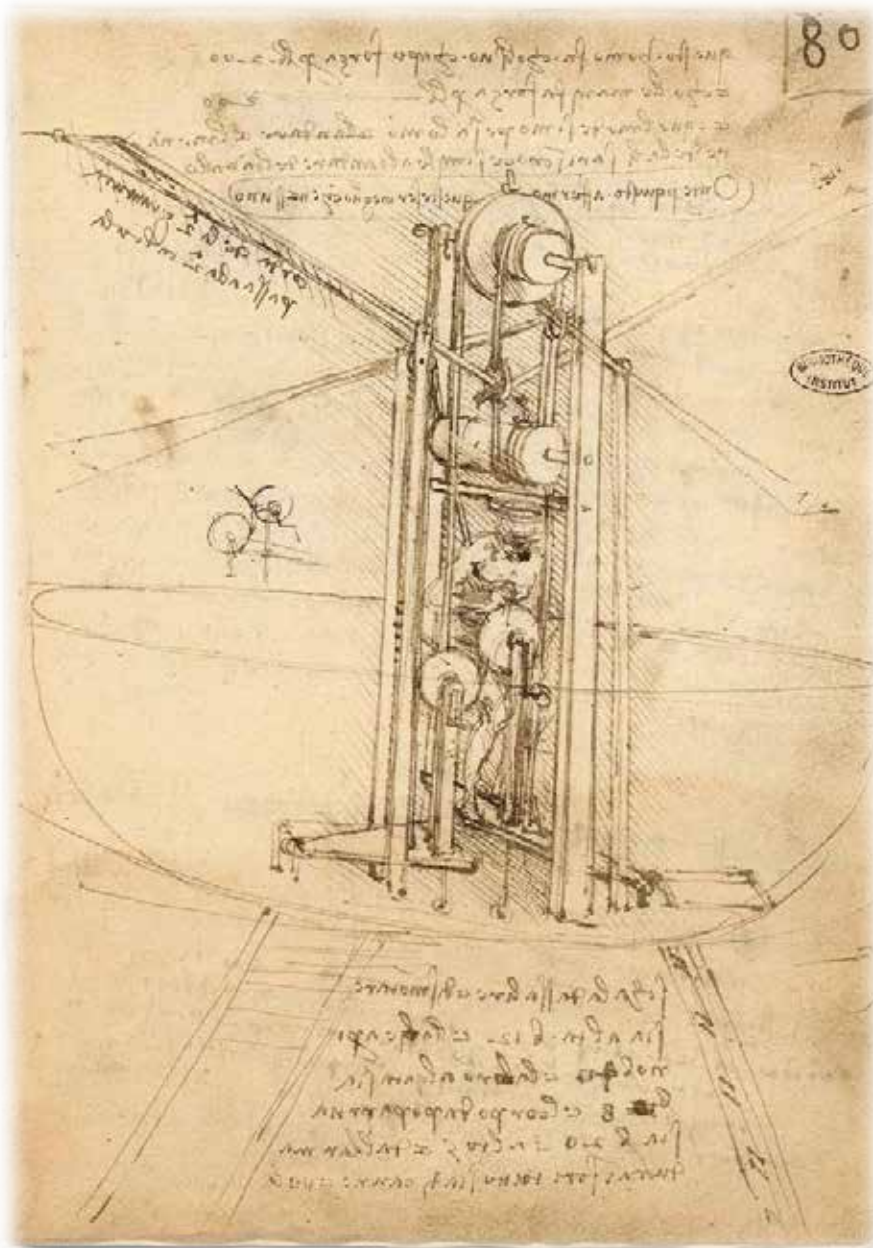


Figura 8.15: Ornitóptero

Instituto de Francia (París), Manuscrito B de Francia, f. 0080r

8.2.4.4. Máquina voladora (CA_0860r).

El folio 860 (recto) del Códice Atlántico está considerado como uno de los primeros dibujos de Leonardo donde plasmó la idea de crear una máquina voladora, su datación se considera entre 1478 y 1480.

En este caso, llama la atención la forma de la embarcación con una especie de mecanismo sencillo impulsada manualmente por la acción del piloto, intentando emular a un hombre que remara, pero que en este caso haría batir las alas mecánicas. Se puede observar en la parte derecha prácticamente una réplica de la idea central de la máquina voladora, y en la parte inferior en un primer plano se aprecia con más detalle el mecanismo necesario para la transmisión del movimiento.

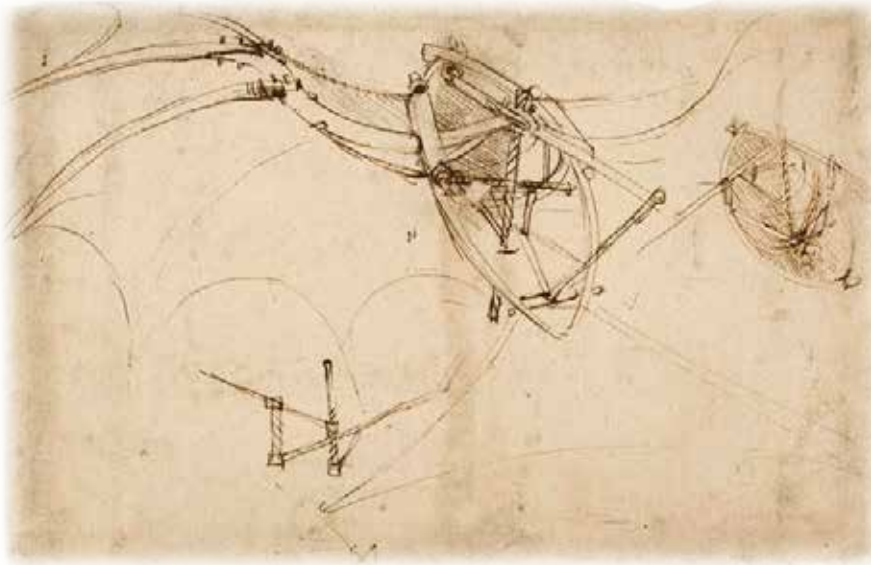


Figura 8.16: Máquina voladora.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0860r

8.2.4.5. Dispositivos de propulsión para máquina voladora (CA_0755r).

En el folio 755 (recto) del Códice Atlántico, Leonardo muestra no tanto una máquina voladora, como los mecanismos necesarios para batir las alas mecánicas. Para ello diseñó 4 dibujos donde se pueden apreciar con mayor o menor detalle el mecanismo idéntico que produce el movimiento. Se trata de un tornillo de rosca invertida accionada por medio de un manubrio, o por el peso del propio piloto, o bien mediante un cabrestante accionado por una manivela con una cuerda; para conseguir en todos los casos el movimiento alternativo de las alas. Se aprecia en el diseño de la parte inferior derecha del folio como un hombre está accionando el dispositivo. Junto al dibujo un texto donde Leonardo escribe claramente que el peso del piloto es la fuente de energía para hacer bajar el mecanismo.

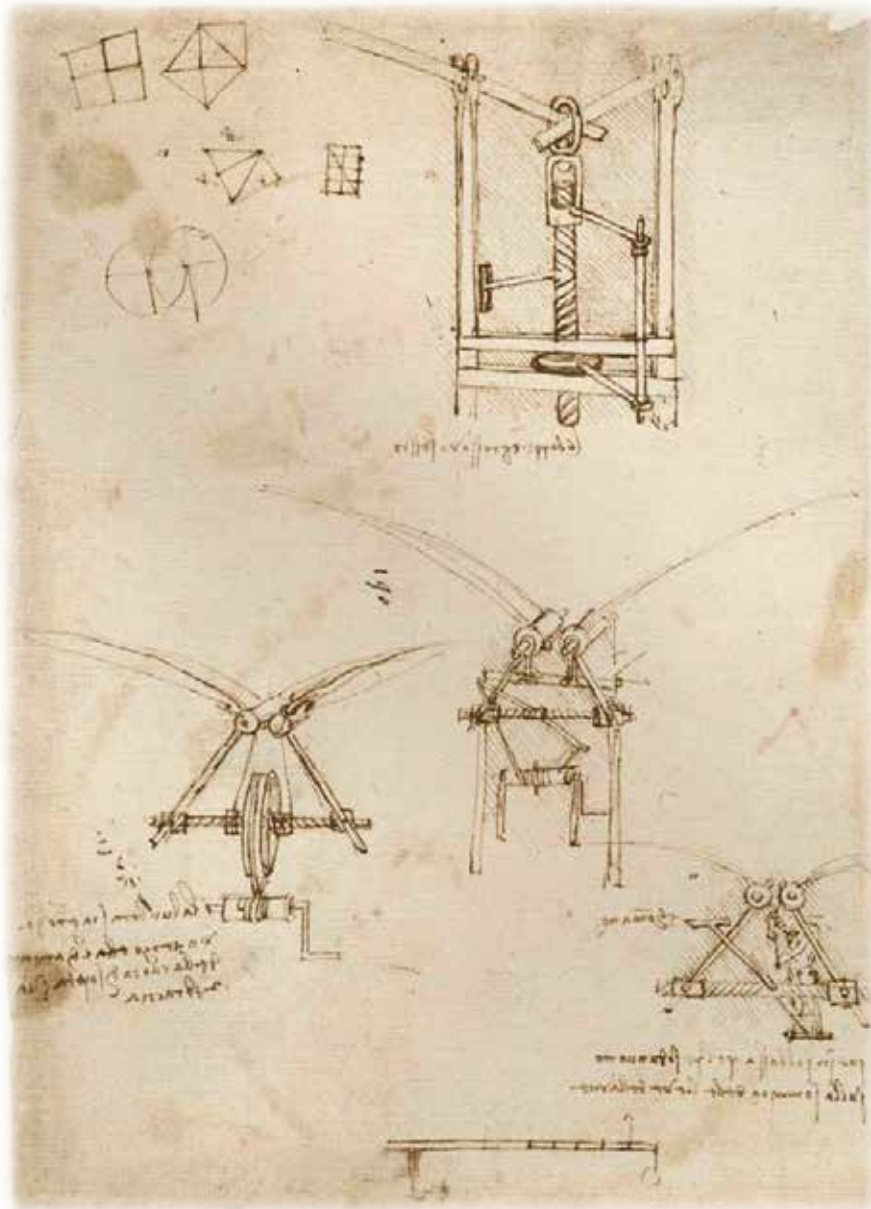


Figura 8.17: Dispositivos de propulsión para máquina voladora.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0755r

8.2.4.6. Estudio ergonómico de máquina voladora (CA_0843r).

En el folio 843 (recto) del Códice Atlántico, Leonardo hace un estudio ergonómico entre la máquina voladora y el piloto, concretamente el dispositivo encargado de transmitir la potencia debido a la fuerza impulsora de las piernas, para llegar a un dimensionamiento apropiado de la envergadura de las alas. Se aprecia en el margen inferior derecho del folio la figura de una pierna acabada de un hombre de pie, mientras que la otra pierna tan sólo está esbozada. No es de extrañar, porque tan solo Leonardo necesitaba las proporciones de una de las piernas para determinar las dimensiones óptimas del mecanismo y de las alas. Este problema es tratado en el texto de la parte superior del folio donde Leonardo a partir de una serie de complicados cálculos intenta resolver este problema.

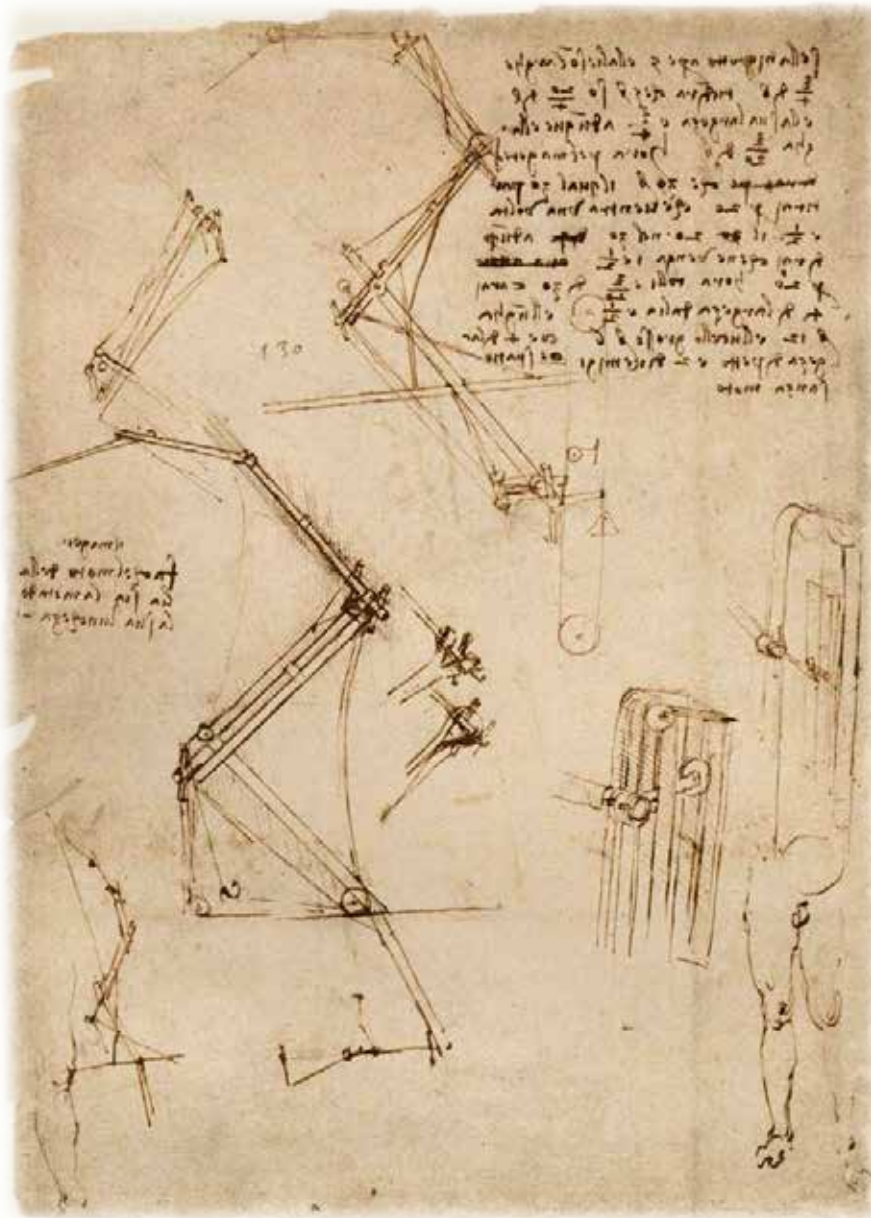


Figura 8.18: Estudio ergonómico de máquina voladora.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0843r

8.2.4.7. Máquina voladora (CA_0824v).

Uno de los más famosos diseños de Leonardo en cuanto a artefactos voladores se refiere nos lo encontramos en el folio 824 (verso) del Códice Atlántico. (Nos encontramos un diseño idéntico en el folio 74v del Manuscrito B). En la parte superior del folio se encuentra la máquina voladora en perspectiva, bastante bien acabada, mientras que en la parte inferior aparecen diferentes detalles de la misma. En el texto de la parte central Leonardo escribe expresamente que es “*un hombre el que acciona el instrumento*”. No hay ninguna duda, por tanto, en entender que la máquina voladora, para Leonardo, es un instrumento que tiene que ser pilotado por un hombre, quien por medio de la fuerza ejercida por sus brazos y piernas, conseguiría mover las alas de la máquina. Se aprecia en la máquina una especie de tabla donde tendría que ir tumbado el piloto, también aparece una especie de cinturón para sujetarlo. Y en el texto que hay en el interior de la máquina Leonardo especifica cual debería ser la posición del piloto, indicando donde tendría que ir el torax del piloto, aunque él lo llama “*corazón*”.

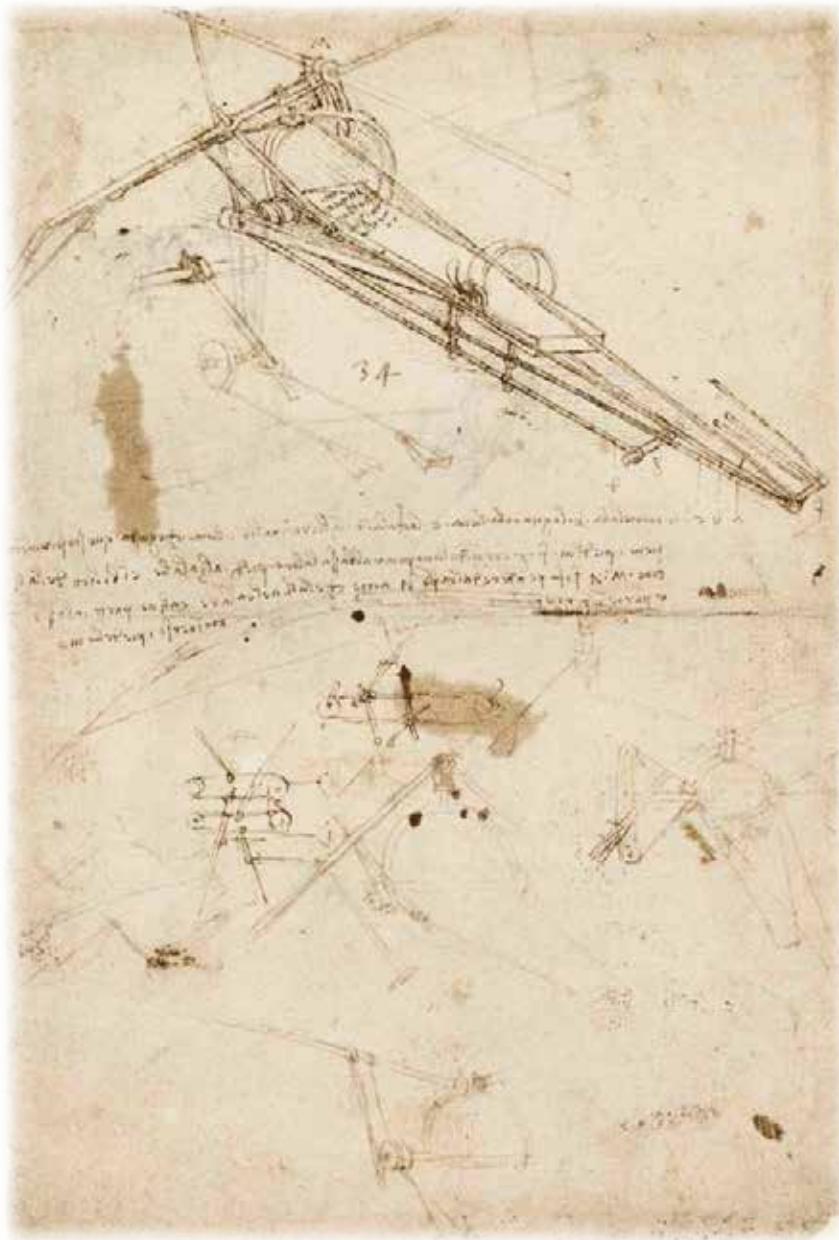


Figura 8.19: Máquina voladora.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0824v

8.2.4.8. Artefacto volador con piloto (CA_0873r).

En el folio 873 (recto) del Códice Atlántico, nos encontramos el diseño de otro artefacto volador accionado una vez más por la mano del hombre. En este caso, Leonardo nos muestra la máquina en diferentes posiciones. En la parte superior una vista frontal de la misma y un poco más abajo a la derecha una magnífica perspectiva en escorzo, donde muestra como el piloto interactúa con la máquina, de esta forma no sólo el diseño de la máquina adquiere mayor fuerza y dinamismo, sino que también se aprecian las proporciones del mecanismo al situar al piloto en la propia máquina. Por último nos encontramos en la parte inferior un dibujo de la máquina completa sin piloto, además de una ampliación del mecanismo de engrane y poleas necesarios para multiplicar la fuerza.

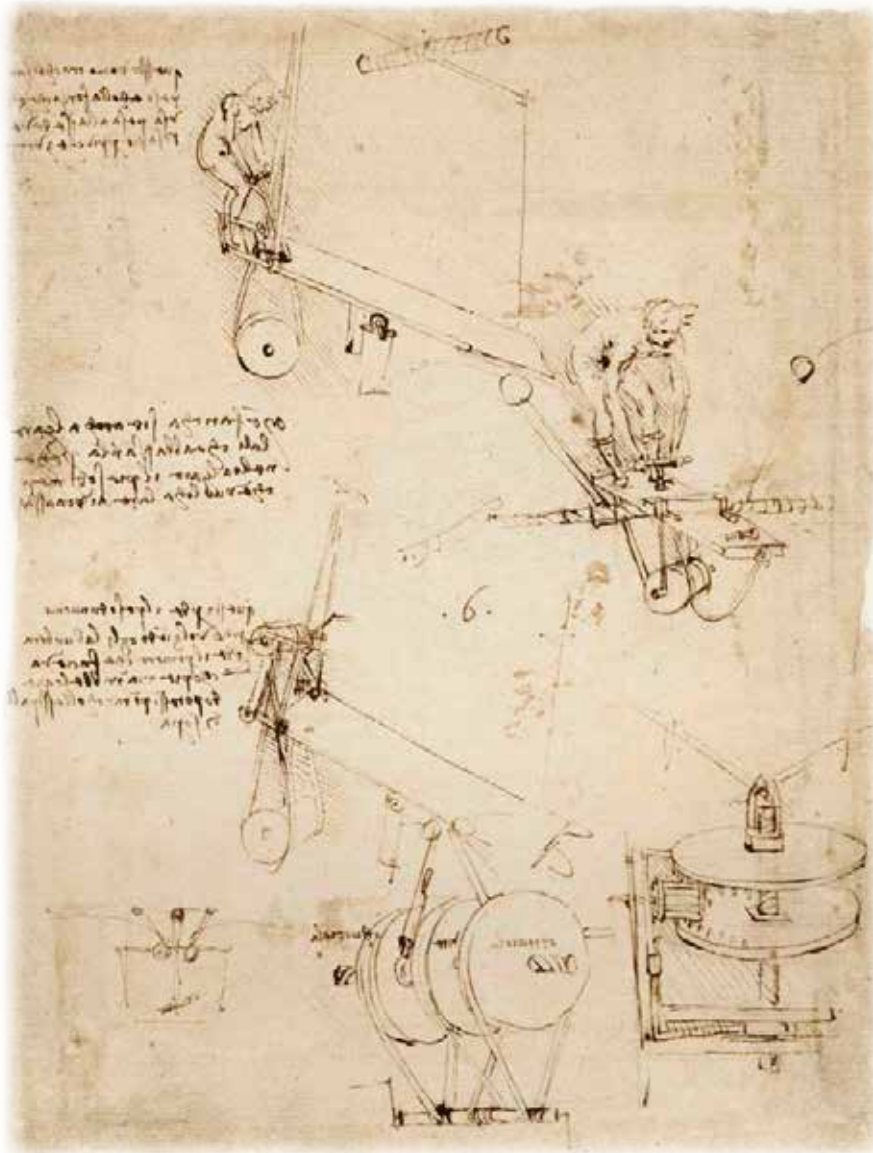


Figura 8.20: Artefacto volador con piloto.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0873r

8.2.4.9. Pilotos accionando mecanismo de propulsión para máquina voladora (CA_0897r).

Muchas veces Leonardo tan sólo se limitó a esbozar el dispositivo de propulsión de la máquina voladora, omitiendo del dibujo deliberadamente el diseño de las alas mecánicas. Tal es el caso que nos encontramos en el folio 897 (recto) del Códice Atlántico. En la parte central del mismo aparecen dos pilotos encargados de aplicar su fuerza a una gran rueda central que sería la encargada de accionar el dispositivo que hace batir las alas. Leonardo deja por escrito sus reflexiones sobre el mecanismo y manifiesta sus dudas sobre el peso excesivo que aportan los pilotos en el dispositivo de propulsión, siendo un claro obstáculo para el correcto funcionamiento de la máquina.

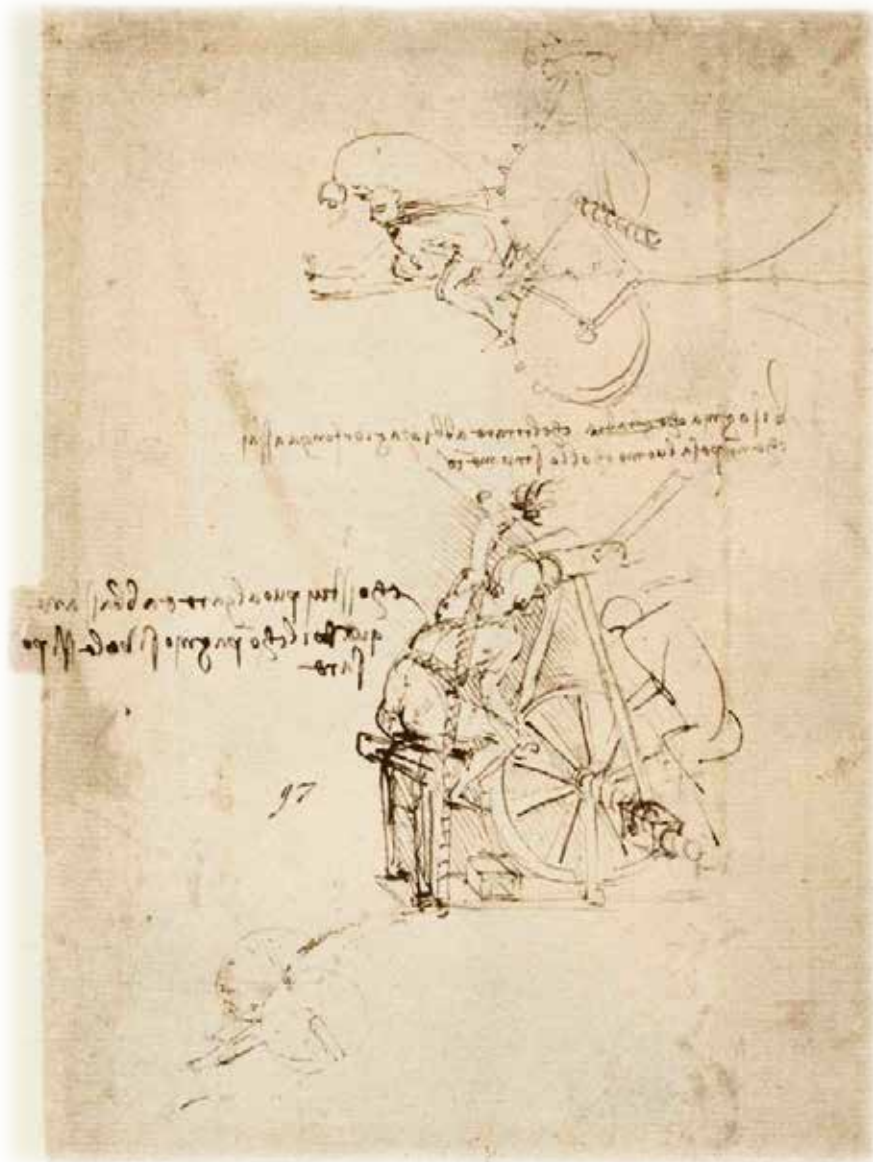


Figura 8.21: Pilotos accionando mecanismo de propulsión para máquina voladora.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 0897r

8.2.4.10. Máquina voladora y mapa de Europa (CA_1006v).

El folio 1006 (verso) del Códice Atlántico es famoso, no por sus dibujos de máquinas voladoras, que no tienen nada que ver con el nivel de detalle comentado en los folios anteriores. Si no más bien, por un pequeño boceto de una máquina voladora junto a unas escaleras en la parte superior izquierda y por el texto que le acompaña, una cita muy célebre donde Leonardo escribe que el dispositivo se construyó en su estudio de la *Corte Vecchia* (el actual *Palazzo Reale*), cerca de la torre del reloj de *San Gottardo in Corte*. Este mismo folio también es célebre por su mapa de Europa, donde aparecen indicaciones de diversas regiones geográficas, destacando sobremanera “Italia”, en mayúsculas y como no, con su habitual escritura invertida.

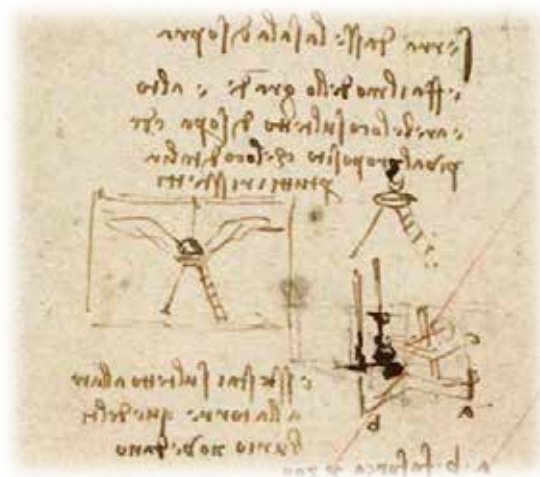
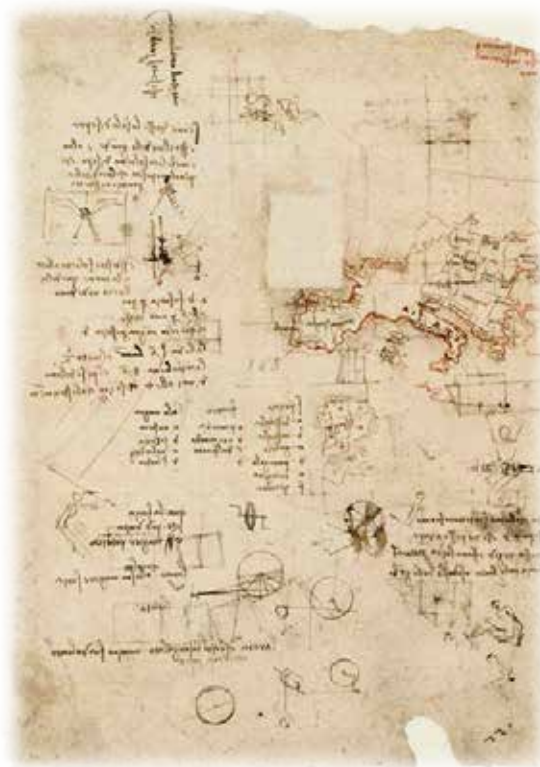


Figura 8.22: Folio 1006v y detalle ampliado de máquina voladora junto a unas escaleras.
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico, f. 1006v

8.2.4.10. Ala delta (CM1_0064r).

Si bien es cierto que en los manuscritos de la primera década milanesa, entre 1482 y 1490, prevaleció en Leonardo la realización de un ornitóptero, máquina que debía reproducir el batir de las alas de los pájaros (PEDRETTI). En torno a 1505, Leonardo advierte que la mejor solución consistiría en una máquina para planear que el piloto pudiera maniobrar, modificando su centro de gravedad con sencillos desplazamientos de la parte superior de su propio cuerpo.

Este es, por tanto, el principio del ala delta, al que Leonardo llega no sólo a través de un estudio sistemático del vuelo de los pájaros, sino también observando el comportamiento de las cometas, algunas de las cuales de grandes dimensiones, eran capaces de levantar a un hombre.

Esta teoría aparece explicada en el folio 64 recto del Códice de Madrid I, en el que un dispositivo de este tipo presenta forma esférica para velejar secundado por el viento, a lo largo de la pendiente de un monte, mientras que el hombre permanecerá siempre de pie, en una jaula esférica en suspensión cardánica en el centro del dispositivo.

Otro dispositivo que aparece representado en la misma página muestra ya todas las características del ala delta. En Inglaterra se llevó a cabo una primera reconstrucción de él en 1993, con la que se realizaron intentos de vuelo.



Figura 8.23: Ala delta.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice de Madrid I, f. 0064r

Capítulo 9

El automóvil de Leonardo Códice Atlántico, f. 812 recto.

*Quien de verdad sabe de qué habla,
no encuentra razones para levantar la voz
(Leonardo da Vinci)*

9.1. Antecedentes.

Constituye este trabajo una investigación enmarcada en la línea prioritaria de la reconstrucción de un proyecto industrial, con un marcado carácter docente.

La Arqueología Industrial nació a mediados del siglo pasado, concretamente se acepta que su origen estuvo en la publicación del artículo de Michael Rix de la Universidad de Birmingham, Inglaterra, para referirse al estudio de los sitios, los métodos y la maquinaria utilizada por la industria, por lo que se puede decir que esta nueva materia tiene por objetivo la investigación científica del pasado industrial, del territorio, los sitios, edificios y artefactos, pero también a la comprensión del desarrollo tecnológico y la evolución de la sociedad industrial.

Nacida como tal disciplina en el Reino Unido, entre la defensa industrial, la investigación y las ciencias sociales, teniendo por objeto abordar la explicación de la industria en su contexto social.

La Arqueología Industrial no ha dejado nunca de ser discutida tanto en su contenido como en su ubicación dentro de la historia industrial, mientras avanza y se consolida como un enfoque que parte de la recomposición de la cultura material para reconstruir y definir su objeto, el trabajo industrial, transformador de la naturaleza y de los hombres, productor de bienes y servicios.

El término Arqueología Industrial es compatible con el concepto de Patrimonio Industrial, entendido éste en su vertiente material; en este caso, entenderíamos la disciplina como el estudio de intentar leer en los restos de las estructuras y maquinarias antiguas, así como la contextualización de los protagonistas de los desarrollos industriales.

El objeto de estudio de este capítulo de la Tesis es la máquina “automóvil” ideada por el genial y universal artista-científico-técnico-inventor Leonardo da Vinci que proyectó dicha máquina entre 1478 y 1480 dejándola inmortalizada para la posteridad y que actualmente se puede consultar en el folio 812r del famoso Códice Atlántico en la biblioteca Ambrosiana de Milán.

En el transcurso del último siglo, las extraordinarias máquinas de Leonardo da Vinci han sido objeto de una atención creciente, que en ocasiones ha alcanzado matices casi obsesivos. En los últimos años se ha intensificado la producción de libros, catálogos y opúsculos que prometen desvelar los sensacionales adelantos del genio da Vinci.

Este contexto, intenso pero en general de muy poca calidad, que marca la vigorosa recuperación de una “leonardomanía” avivada por el afortunado viaje fantástico al imaginario de Leonardo de Dan Brown. La aportación que pretendemos presentar con este capítulo de la Tesis se distingue claramente por una serie de razones.

En primer lugar, por la operación de traducción de los resultados de los proyectos técnicos de Leonardo al lenguaje visual de extraordinaria eficacia de los progresos en 3D. Si bien de esta operación de traducción deriva, inevitablemente, la transfiguración del documento original, ésta aparece ampliamente legitimada por el objetivo de hacer inteligible incluso a cualquiera que se interese en la materia el significado de los complejos análisis tecnológicos desarrollados por Leonardo. Por tanto, aunque se deberá hablar de transfiguración, hay que subrayar que la “conversión” del dibujo original a su nueva configuración se ha de considerar como el desarrollo y la potenciación de las intenciones y metodologías comunicativas perseguidas por Leonardo.

En segundo lugar proporcionar una representación precisa y absolutamente clara de la estructura y el funcionamiento de mecanismos extremadamente complejos, recurriendo a una serie de recursos gráficos (vistas en planta y en alzado, vistas en transparencia, vistas de los componentes, múltiples puntos de vistas, detalles de los componentes, simulación animada del funcionamiento paso a paso, empleo del claroscuro para subrayar las superficies de contacto, etc.).

Merece la pena subrayar que las representaciones que Leonardo hizo de sus máquinas constituyen una contribución revolucionaria sobre todo porque se configuran como representaciones “casi dinámicas”, anticipos extraordinarios de los métodos del dibujo de animación y, sobre todo, de las imágenes cinemáticas del 3D. La transposición de los dibujos originales de Leonardo en el contexto de las técnicas de representación de los nuevos equipos multimedia lleva, por tanto, a hacer realidad las aspiraciones mismas de Leonardo, que fue el primero en expresar la necesidad de un nuevo concepto de la representación tecnológica, entendida como diseño de un marco cognitivo integrado, capaz de evidenciar al mismo tiempo el aspecto exterior de la máquina, los principios mecánicos que gobiernan su funcionamiento y la estructuración analítica de sus órganos. En esta concepción nueva del dibujo se identifica uno de los anticipos más pioneros, concretos y plausibles de muchas invenciones sorprendentes que han sido atribuidas a Leonardo: él fue el primero en concebir el diseño de máquinas como un refinado instrumento de análisis y de investigación, incluso antes que de visualización, para finalidades puramente demostrativas. En este capítulo de la Tesis pretendemos ayudar a comprender que uno de los rasgos esenciales de la contribución fundamental que Leonardo hizo al desarrollo de la cultura de las máquinas modernas consiste en la madura elaboración del lenguaje específico de las técnicas: lenguaje exquisitamente visual, que él se esforzó en articular según una gramática y una sintaxis rigurosas.

9.2. Objetivos.

El objetivo principal de este capítulo es el estudio de la máquina “automóvil” de Leonardo (hoja 812r del Código Atlántico).

Pretendemos recrear mediante infografía 3D, una reconstrucción virtual de la máquina, de modo que mediante técnicas de reconstrucción y animación 3D hemos desarrollado un proyecto de visualización del funcionamiento completo de la máquina en cada una de sus fases. Dicho proyecto consta de una fase previa de investigación y acopio de documentación técnica y gráfica, para la correcta interpretación de dicha máquina. La fuente fundamental para la realización del capítulo ha sido la página web en italiano de “*L’automobile*” di Leonardo da Vinci (*Museo galileo. Istituto e Museo di Storia della Scienza*). Y para la realización del modelo digital además del propio manuscrito original nos hemos guiado por los trabajos de Taddei y Zanon. (TADDEI y ZANON, 2000).

El capítulo se ha desgranado en los siguientes apartados:

Génesis y evolución de la investigación del “automóvil de Leonardo” a lo largo de la historia

Presentación de la documentación gráfica.

Desarrollo y visualización 3D de todo el proceso de funcionamiento de la máquina.

Para la realización de los trabajos de representación 3D de la maquinaria y la visualización de su funcionamiento se utilizarán los siguientes recursos:

Software:

Autodesk AutoCAD – modelado y planos

Autodesk 3D Studio MAX – modelado y renderizado

Adobe Premiere – Edición de Vídeo

Adobe Photoshop – retoque de texturas, fotografías

CorelDRAW – maquetación y elaboración de gráficos

9.3. Génesis y evolución de la investigación del “automóvil de Leonardo” a lo largo de la historia.

9.3.1. La tradición historiográfica.

La fortuna de encontrarnos con el folio 812r (296va) del Código Atlántico, refleja de una manera ejemplar la evolución de la actitud positiva que se llevan realizando sobre los estudios de los manuscritos de Leonardo.

Desde la primera percepción del valor de este documento (Girolamo Calvi ya señaló la importancia del mismo en 1905), hasta la realización de este estudio del automóvil de Leonardo en el capítulo de la tesis que nos ocupa, sido objeto de refutados estudios por los

representantes más prestigiosos y eminentes de los manuscritos de Leonardo de los siglos XX y XXI.

El resultado de estos análisis y comentarios sobre los manuscritos de Leonardo han alimentado nuestra curiosidad sobre indagar en los proyectos y mecanismos aparentemente imposibles de este genial inventor-artista. Gracias a esta fuente inagotable de información nos embarcamos a la caza de ideas que en su día fueron precursoras. Dicha búsqueda se ha materializado con nuestra pequeña aportación con la reconstrucción virtual en 3D del diseño del famoso automóvil de Leonardo ampliamente descrito en numerosos estudios, revistas, libros, museos y páginas web.

El objeto descrito en el folio 812r del *Códice Atlántico* es el conocido "automóvil" o carro autopulsado de Leonardo. Dicho objeto había corrido la misma suerte que tantas otras páginas de Leonardo, donde, de vez en cuando, investigando dichos manuscritos se han descubierto verdaderas genialidades de da Vinci con increíbles invenciones para su época: la máquina voladora, el helicóptero, el submarino, la máquina de vapor, la cisterna, etc.

El esfuerzo para explicar y mostrar el funcionamiento del 'automóvil' de Leonardo (que Calvi en 1936, con un espíritu de extrema simplicidad, bautizara como "La FIAT de Leonardo") se ha llevado a través de más de cien años de historiografía Leonardina. Se han producido interpretaciones extremadamente complejas, sobre la base de estudios ingeniosos con la penosa paradoja de describir un "automóvil" que presentaba una gran variedad de innovaciones para la época, pero al mismo tiempo no se entendía cómo podía funcionar. Paralelamente a las diferentes interpretaciones que iban surgiendo sobre el posible funcionamiento del "automóvil" se desarrollaron –como ocurre a menudo con sus "invenciones"– una intensa actividad en la reconstrucción de modelos que reflejaran fielmente el diseño del "automóvil" de Leonardo. Estudios y planos en la construcción del ingeniero Canestrini Giovanni (en el que se puede apreciar en el diseño de Leonardo también la invención del precursor del diferencial), surgen después del primer modelo exhibido en Milán en 1939. La exposición titulada "*Mostra di Leonardo da Vinci e delle invenzioni italiane*" es decir "Muestra sobre Leonardo da Vinci y de las invenciones italianas" expresa claramente una motivación chovinista en intentar rescatar al genio científico italiano que tradicionalmente había sido usurpado por los extranjeros. Una motivación alimentada a partir de muchas iniciativas que se llevaron a cabo en la Italia fascista de la época. No es de extrañar que esta frustración sobre el "universal" inventor Leonardo se convirtiera en un icono emblemático.

9.3.2. El error de interpretación.

La vasta literatura sobre el "automóvil" de Leonardo, que se recogen en forma de una exhaustiva biblioteca digital en diferentes sitios web, así como reconstrucciones de diferentes modelos, coinciden por unanimidad en reconocer el error de interpretación del modelo del "automóvil" hasta ahora compartido. Había sido aceptado por todos los intérpretes y analistas, hasta hace poco, la idea de que los resortes de ballesta observables en los bocetos del folio 812r del *Códice Atlántico*, hacían la función del motor. Y diversos autores han teorizado en su diseño con una gran variedad de ingeniosas explicaciones para tratar de explicar cómo la potencia podía ser transmitida a las ruedas del automóvil, ya que los dibujos de Leonardo no muestran ningún vínculo entre el supuesto resorte motriz de ballesta con las ruedas del vehículo.

9.3.3. La nueva interpretación.

Hace apenas unos años Carlo Pedretti tuvo una feliz intuición, fue el primero en comprender que el resorte motor de ballesta no hacía la función de fuerza motriz, y que la función en la regulación del movimiento y por lo tanto la acción motora la ejercía un par de muelles en espiral alojados en dos tambores de madera bajo el automóvil. Mark Rosheim ha desarrollado un análisis detallado para explicar la compleja articulación del dispositivo Vinciano.

Tras este análisis, ahora resulta evidente que el 'auto' de Leonardo iba a ser propulsado por motores de muelles en espiral bajo el vagón, y que adentrándonos un poco más en entender el diseño, los muelles de retorno de las ballestas son un complejo sistema para la regulación de la liberación de la energía y a su vez para la regulación de la circulación y que el vehículo está equipado con un sistema de gobierno que le permite programar la ruta, a través de un sofisticado dispositivo de excéntricas con forma de pétalos.

Así que ahora tenemos la plena confirmación de que el 'auto' de Leonardo - como Pedretti había intuido - es un sofisticado dispositivo diseñado para producir efectos especiales en algunos festivales cortesanos, constituyendo el soporte móvil de alguna que otra escenografía (Rosheim considera que se trata de un coche gobernado como un autómata programable de forma autónoma). Y, sobre todo, se hace necesario jubilar los modelos más antiguos de los automóviles que continúa exhibiéndose en los museos Leonardinos. Estos siguen siendo interesantes, como prueba de una larga trayectoria de estudios Leonardinos así como de las operaciones llevadas a cabo para "museificar" su genio junto con las expectativas que alimentaba.

9.3.4. Los modelos digitales y de funcionamiento.

El trabajo que presentamos en este capítulo de la Tesis es gracias sobre todo a la intuición que tuvo Carlo Pedretti y que Mark Rosheim transformó en una nueva interpretación orgánica mecánica, viendo la luz un primer modelo digital 3D ampliamente difundido en libros del propio autor y en páginas web. Una nueva fase de investigación, en la que se comprometieron Mario Taddei y Edoardo Zanon y gracias a sus modelos tridimensionales hemos podido presentar nuestro propio modelo digital. La naturaleza del proyecto consiste sobre todo en aclarar el significado y la función de los diferentes órganos que gobiernan la máquina. Basándose en estos resultados, es posible mostrar con programas de Diseño Asistido por Ordenador y animación como es el 3dstudio Max, cada una de las partes componentes del automóvil y explorar interactivamente su estructura y funcionamiento. Por lo tanto, es posible poner a prueba prácticamente el funcionamiento eficaz y preciso de los dibujos técnicos que se han utilizado para construir modelos que finalmente son los verdaderos proyectos de Leonardo.

La mayoría de las fuentes consultadas son sobre todo en italiano y alguna que otra en inglés. De ahí la decisión de publicar, como capítulo de nuestra Tesis, una memoria enteramente y por primera vez en español donde se recopilan todas las materias (fuentes primarias y de interpretación) que permiten seguir el camino que condujo al reciente descubrimiento sobre el funcionamiento real del automóvil de Leonardo o carro autopropulsado. Además de mostrar un modelo digital 3D analizando cada uno de sus componentes.

9.3.5. Fuentes.

Además de las hojas 812r (296va) y 17v (4va) del *Códice Atlántico* que contienen los elementos más explícitos del diseño del “automóvil” de Leonardo. Este apartado estará acompañado por numerosos manuscritos de Leonardo donde diferentes estudiosos han puesto de manifiesto una mejor comprensión de la génesis y del funcionamiento de los diferentes dispositivos mecánicos que componen el automóvil autopropulsado.

9.3.5.1. Folio 812 recto (296va) del Código Atlántico: “El automóvil de Leonardo”.

La hoja datada alrededor de 1478 (Pedretti 1978) representa el documento fundamental para diseñar y comprender el “automóvil” de Leonardo. Se presentan dos vistas del dispositivo. En el diseño de la perspectiva axonométrica de la parte superior tan sólo se esboza el “automóvil” delineado por su cara lateral izquierda. Se evidencia claramente una tercera rueda actuando como dirección y timón operados manualmente.

El diseño en la parte inferior, que es el dispositivo visto desde arriba, muestra en detalle los diferentes mecanismos, le falta el volante, sustituido por un complejo dispositivo mecánico. Los bocetos que rodean la imagen que aparece a continuación analizan en detalle el mecanismo de la dirección del eje con tirantes en asta de ballesta y engranaje de cremallera, así como alguno de los engranajes del carro.

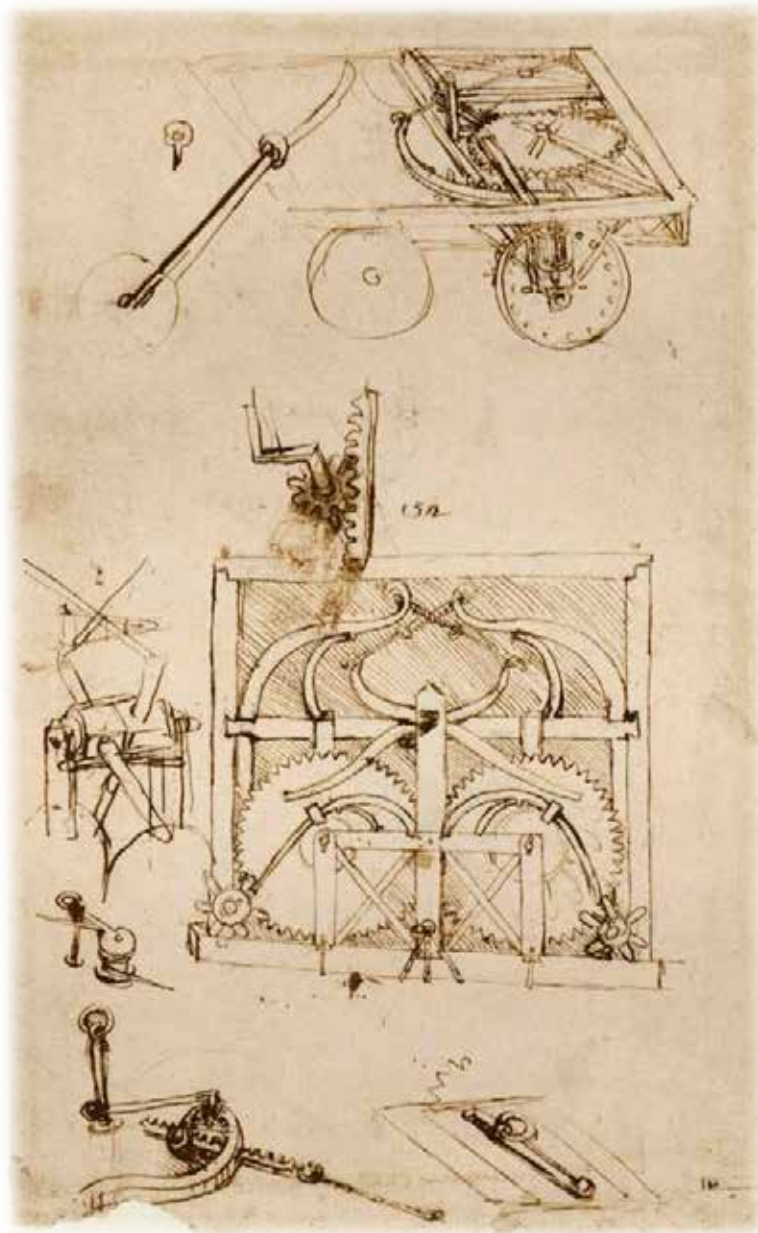


Figura 9.1: El automóvil de Leonardo.

Biblioteca Ambrosiana (Milán), Código Atlántico, f. 0812r (296va)

9.3.5.2. Folio 17 verso (4va) del Códice Atlántico.

El folio, asignado por Pedretti (1978) para los años 1478-80, presenta un dibujo de Leonardo tradicionalmente tomado en consideración por los estudiosos que se han ocupado de analizar el "automóvil". El diseño en cuestión, en la esquina superior derecha del documento, presenta un par de ruedas conectadas por un eje en el lado derecho y se observa como una rueda dentada horizontal engrana haciendo girar la rueda. Leonardo anota que la rueda horizontal va a hacer "girar las ruedas del carro". Este diseño, claramente incompleto, fue interpretado por Semenza como un dispositivo de dirección (sin embargo no era capaz de explicar su funcionamiento). La hipótesis más creíble presentada por Carlo Pedretti es reconocer un podómetro del tipo descrito por Vitruvio y por León Battista Alberti.

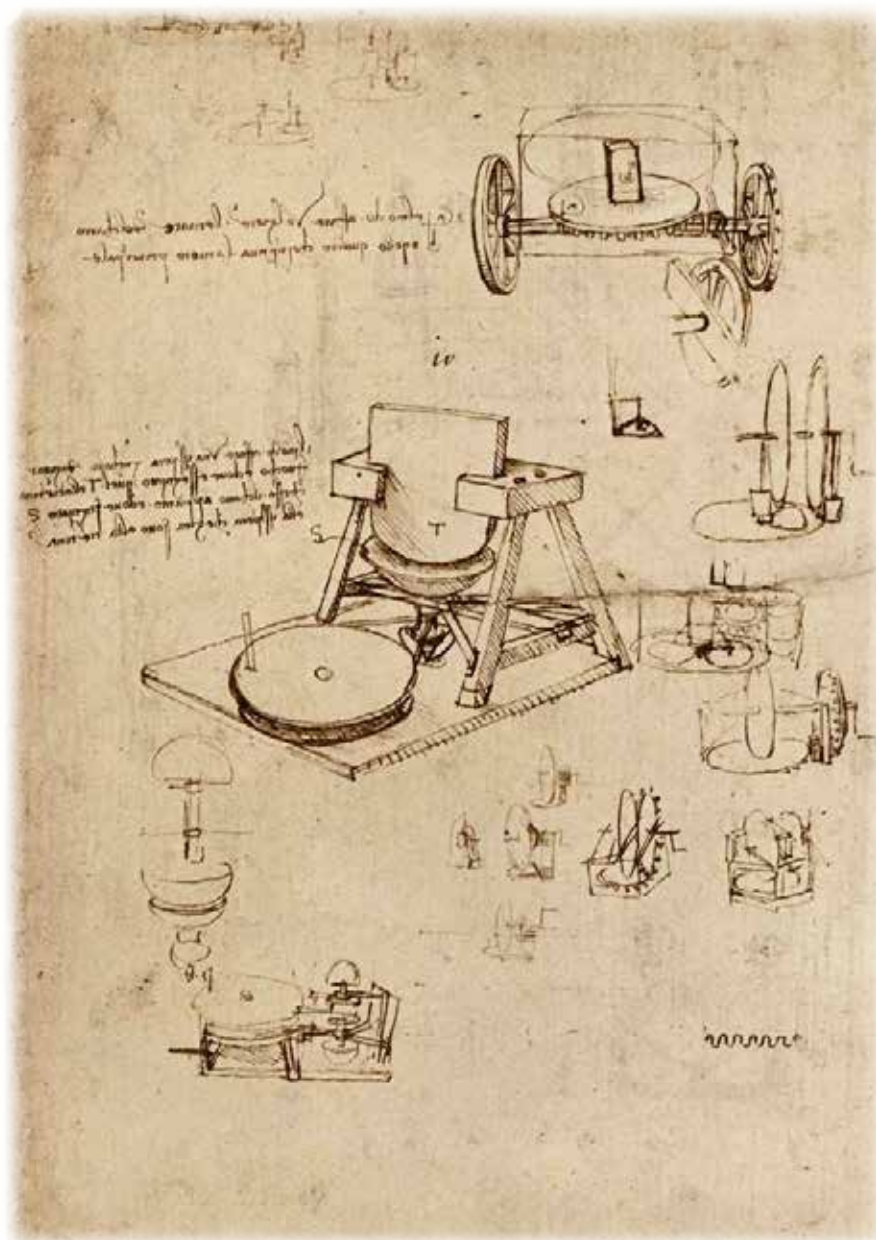


Figura 9.2: Folio 17va (4va).
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico

9.3.5.3. Folio 114 recto (40rb) del Código Atlántico.

Se trata de un folio datado por Pedretti (1978) en 1480-82, que incluía un dibujo (en la parte superior) casi desaparecido, donde Marinoni (1981) creyó reconocer un carro autopropulsado con cinco ruedas. Según Marinoni, el carro se puede descomponer en dos secciones: la parte trasera con un engranaje tipo jaula, fuerza motriz por ballesta y, quizás, un mecanismo de escape y una parte delantera con un asiento para el piloto y la dirección.

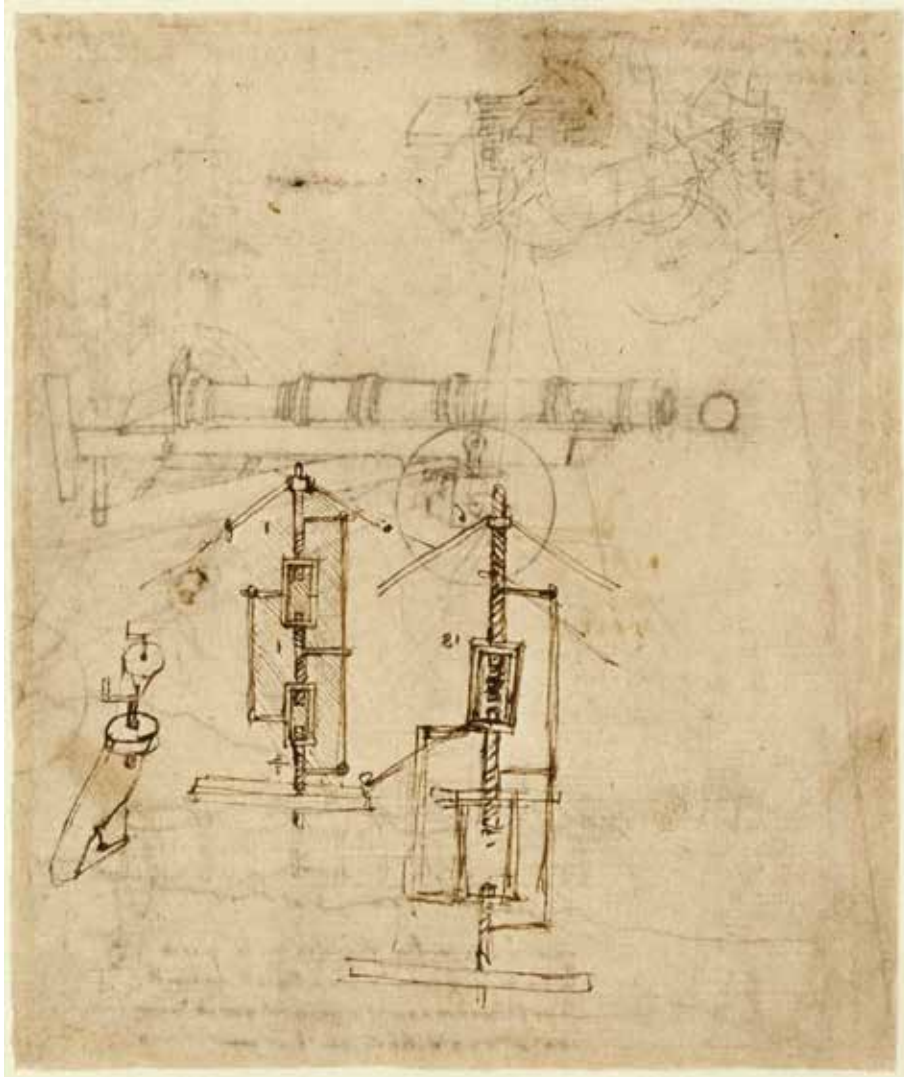


Figura 9.3: Folio 114r (40rb).
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Código Atlántico

9.3.5.4. Folio 868 recto (316ra) del Códice Atlántico.

El folio datado por Pedretti (1978) hacia el año 1487, presenta tres bocetos de carros: dos de ellos son arrastrados por caballos, mientras que el tercero con engranaje y manivela, parece concebido para ser propulsado por tracción humana. Marinoni (1981) hace referencia de éste último diseño en su estudio sobre el carro autopropulsado de Leonardo.

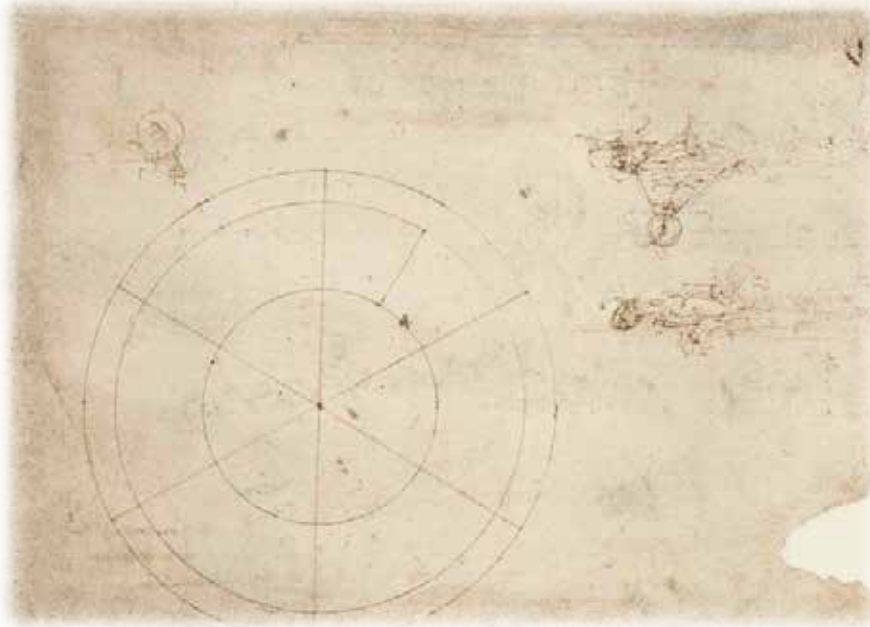


Figura 9.4: Folio 868r (316ra).
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico

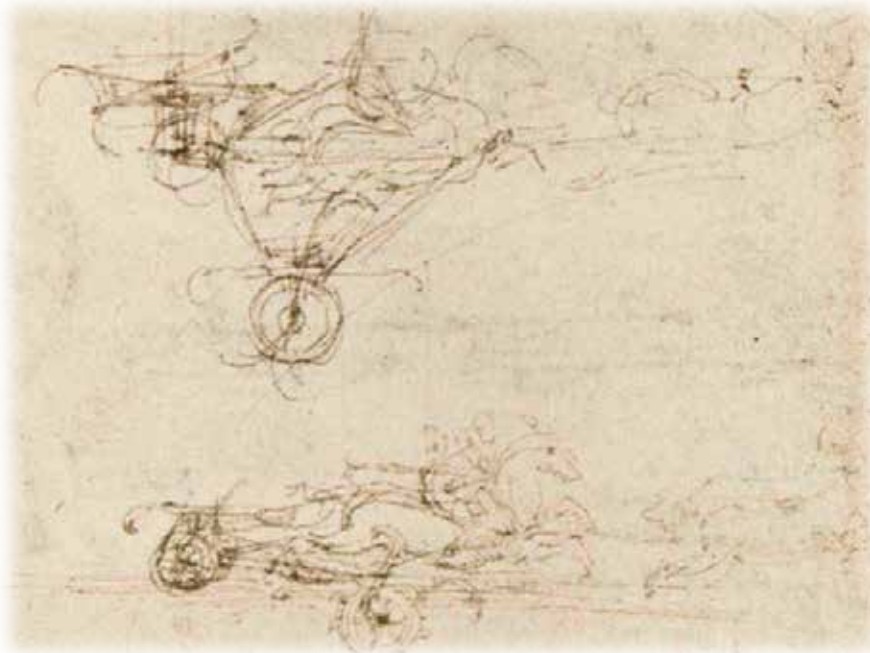


Figura 9.5: Detalle ampliado (sup-der). Folio 868r (316ra).
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Códice Atlántico

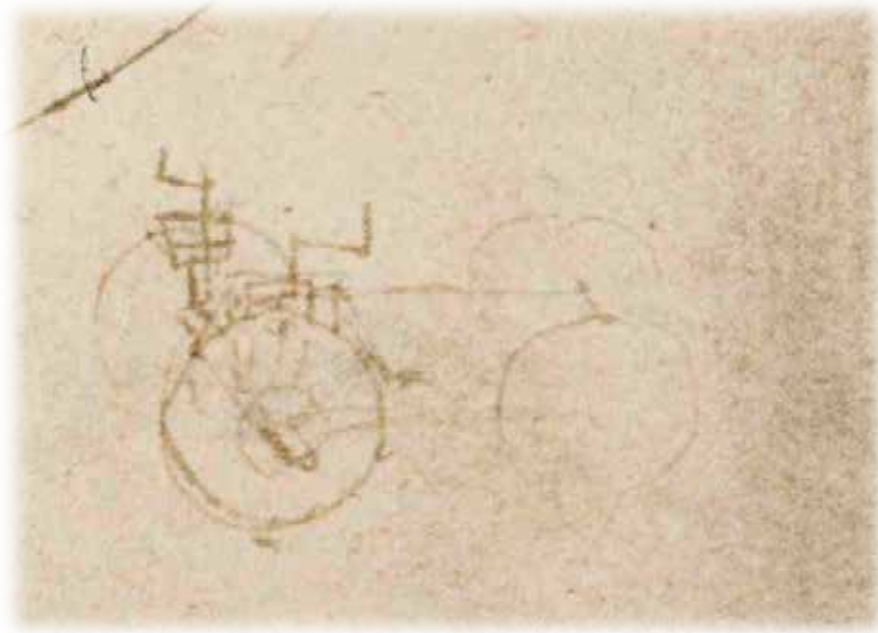


Figura 9.6: Detalle ampliado (sup-izq.). Folio 868r (316ra).
Biblioteca Ambrosiana (Milán), *Códice Atlántico*

9.3.5.5. Folio 878 recto (320ra) del *Códice Atlántico*.

En este folio fechado por Carlo Pedretti (1978) en 1478, Mark Rosheim (2001) cree identificar alguno de los bocetos preparatorios de los tensores que Leonardo utilizó posteriormente en su diseño del carro autopropulsado descrito en el folio CA 812r (296va).

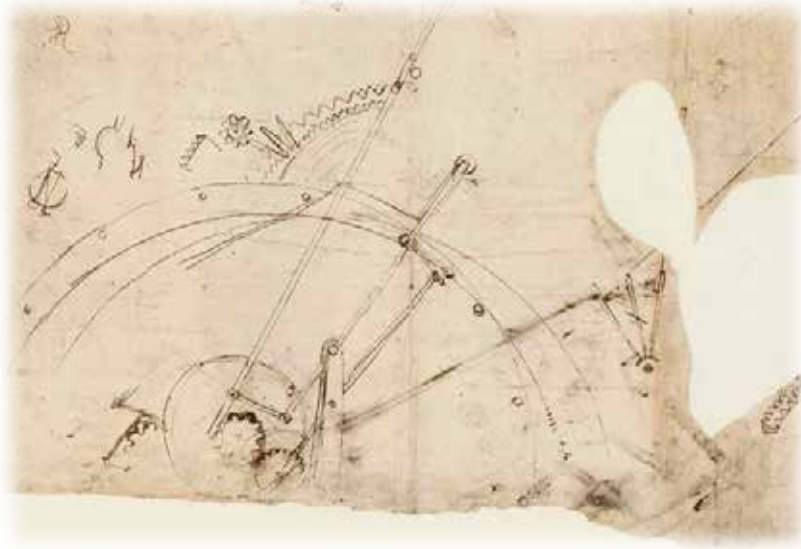


Figura 9.7: Folio 878r (320ra).
Biblioteca Ambrosiana (Milán), *Códice Atlántico*

9.3.5.6. Folio 878 verso (320va) del *Códice Atlántico*.

Como en folio anterior, éste también está fechado por Carlo Pedretti (1978) en 1478, e igualmente Mark Rosheim (2001) cree identificar alguno de los bocetos preparatorios de los tensores que Leonardo utilizó posteriormente en su diseño del carro autopropulsado descrito en el folio CA 812r (296va).

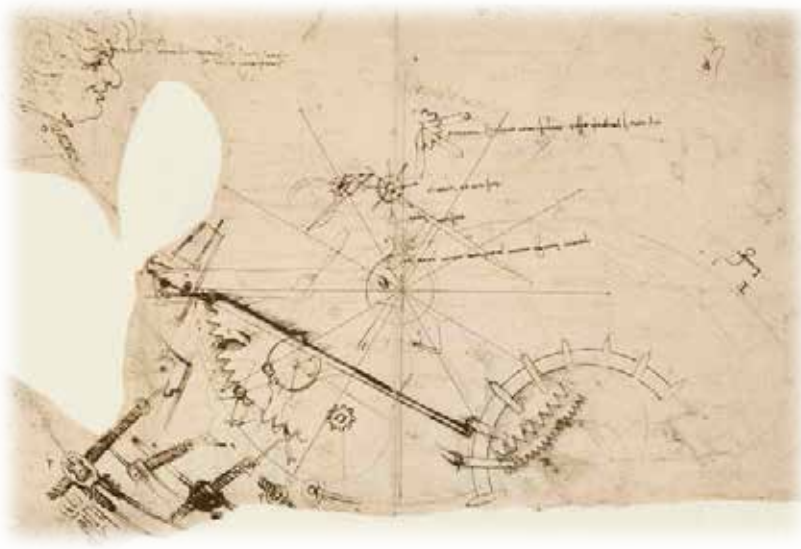


Figura 9.8: Folio 878v (320va).
Biblioteca Ambrosiana (Milán), *Códice Atlántico*

9.3.5.7. Folio 926 recto (339ra) del Código Atlántico.

El diseño, asignado por Carlo Pedretti (1978) hacia el año 1478, presenta los estudios para un complejo mecanismo de relojería, probablemente para un planetario, puesto que se puede observar como Leonardo anota los nombres de algunos cuerpos celestes (Venus, la Luna, Mercurio, etc). Mark Rosheim (2001) se ha referido al boceto de este engranaje ya que, en su opinión se observan soluciones técnicas similares a las adoptadas por Leonardo para su “autómata programable”.

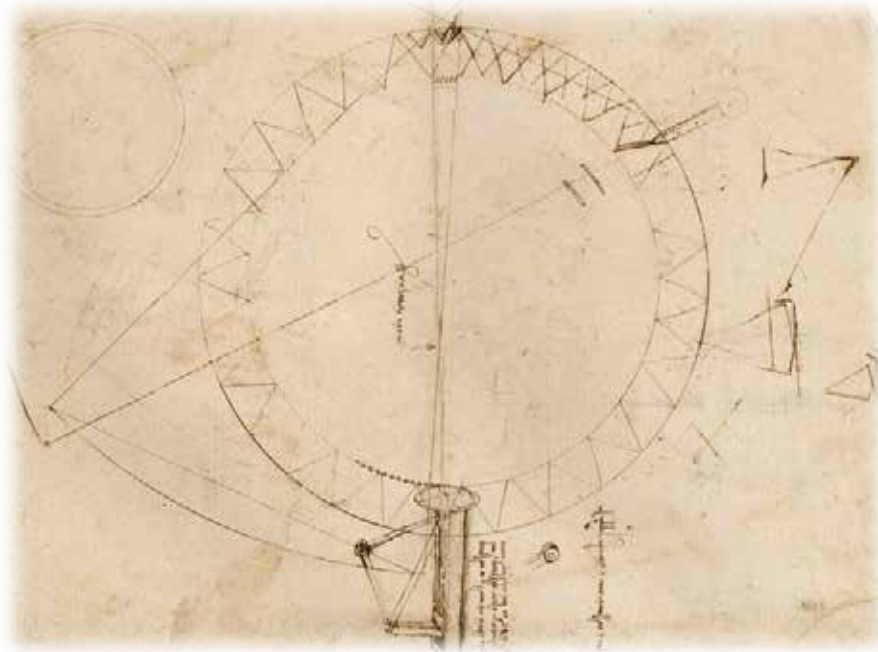


Figura 9.9: Folio 926r (339ra).
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Código Atlántico

9.3.5.8. Folio 956 recto (347rb) del *Códice Atlántico*.

Como en el folio anterior este diseño, asignado por Carlo Pedretti (1978) hacia el año 1478-80, presenta los estudios para un complejo mecanismo de relojería, probablemente para un planetario, puesto que se puede observar como Leonardo anota los nombres de algunos cuerpos celestes (Venus, la Luna, Mercurio, etc.). Igualmente, Mark Rosheim (2001) se ha referido al boceto de este engranaje ya que, en su opinión se observan soluciones técnicas similares a las adoptadas por Leonardo para su “autómata programable”.

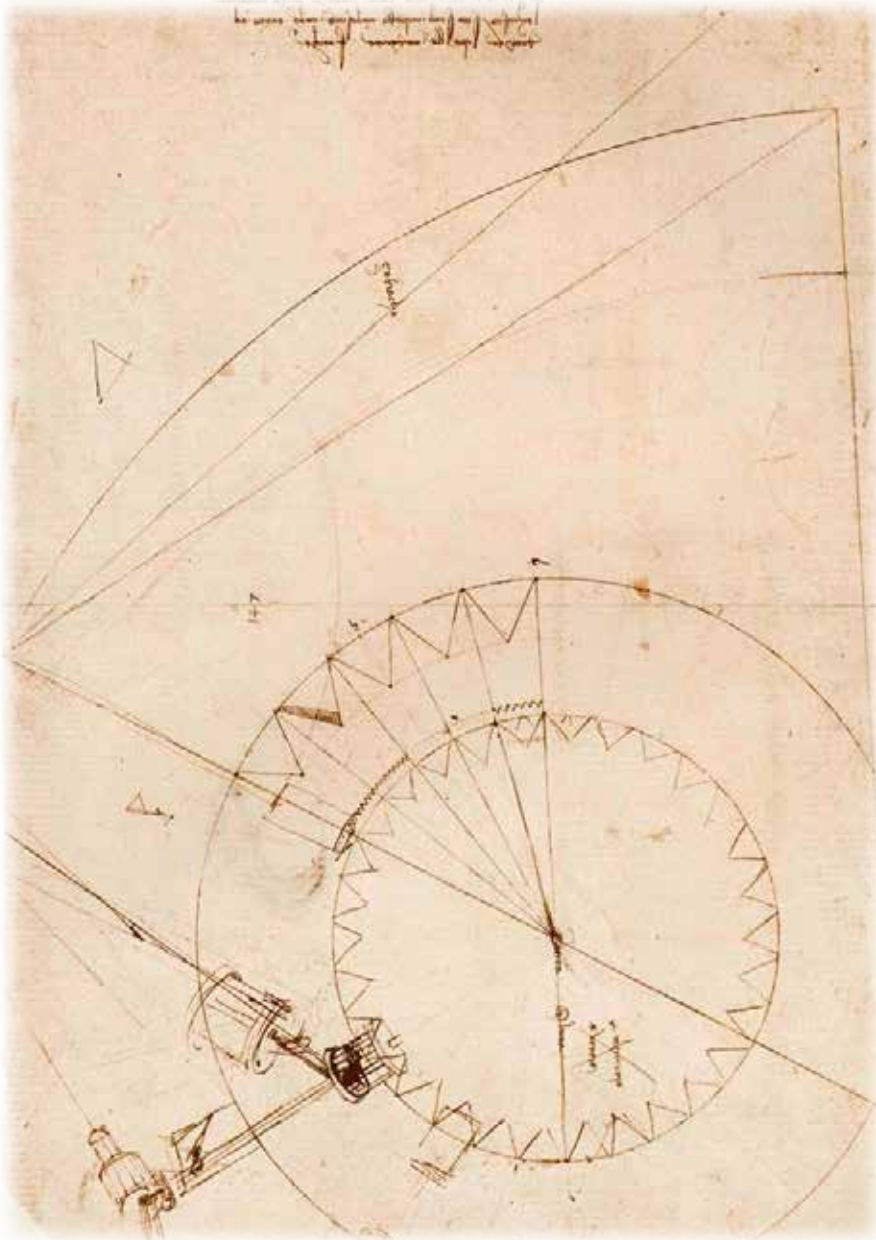


Figura 9.10: Folio 956r (347rb).
Biblioteca Ambrosiana (Milán), *Códice Atlántico*

9.3.5.9. Folio 956 verso (347vb) del Código Atlántico.

El folio es fechado por Carlo Pedretti (1978) sobre los años 1478-80 y en él se observan bocetos que Mark Rosheim (2001) ha relacionado con el proyecto del “autómata programable” de Leonardo, haciendo especial hincapié en la similitud y coincidencias, muy particularmente, con los dispositivos bocetados en el folio 447 Er del Gabinete de Dibujos y Grabados de los Uffizi, donde se observa una excéntrica sinusoidal con múltiples acanaladuras.

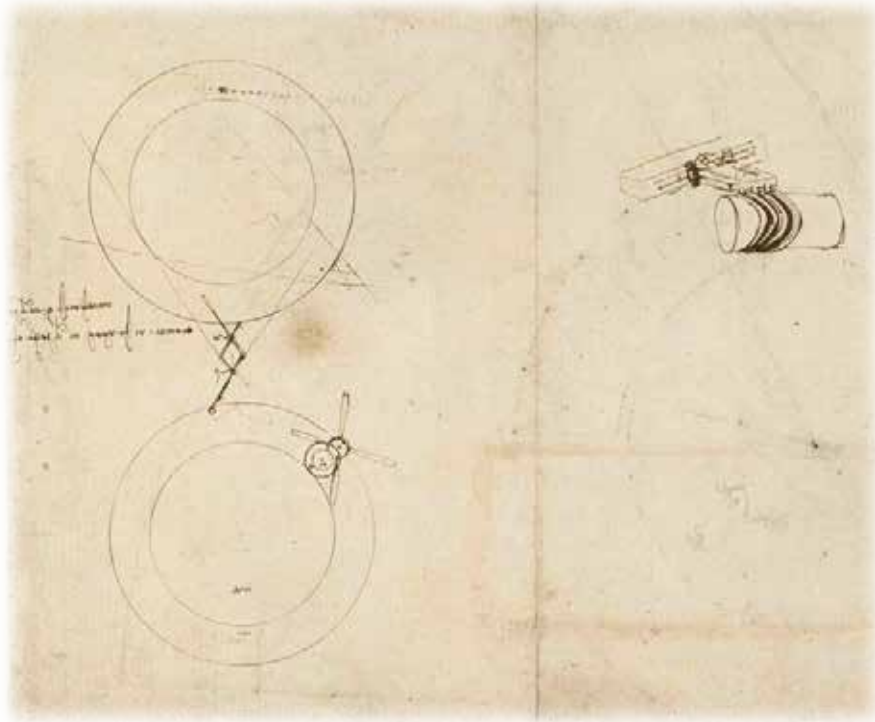


Figura 9.11: Folio 956v (347vb).
Biblioteca Ambrosiana (Milán), Código Atlántico

9.3.5.10. GDS Galería de los Uffizi, 4085Ar.

El documento presenta una serie de copias manuscritas del siglo XV de dibujos originales de Leonardo en proceso de desaparición (Pedretti 1975 y Dalli Regoli 1985). Según Mark Rosheim (2001) se puede identificar en la parte superior un boceto con una solución técnica de gran parecido con el diseño mostrado en el folio CA_0812r (296va). En el mecanismo visto en planta se aprecian dos grandes ruedas dentadas con muelles tensados por ballesta. Según Rosheim se trata del “*equilibrio que mantiene el tensor conectado a la ballesta, creando un sistema de escape que regula la velocidad del engranaje* “. En esencia el documento evidencia una vez más el uso de los resortes con ballesta y demuestra su utilización no como “motores” sino como un mecanismo para regular el movimiento producido por otras fuentes.

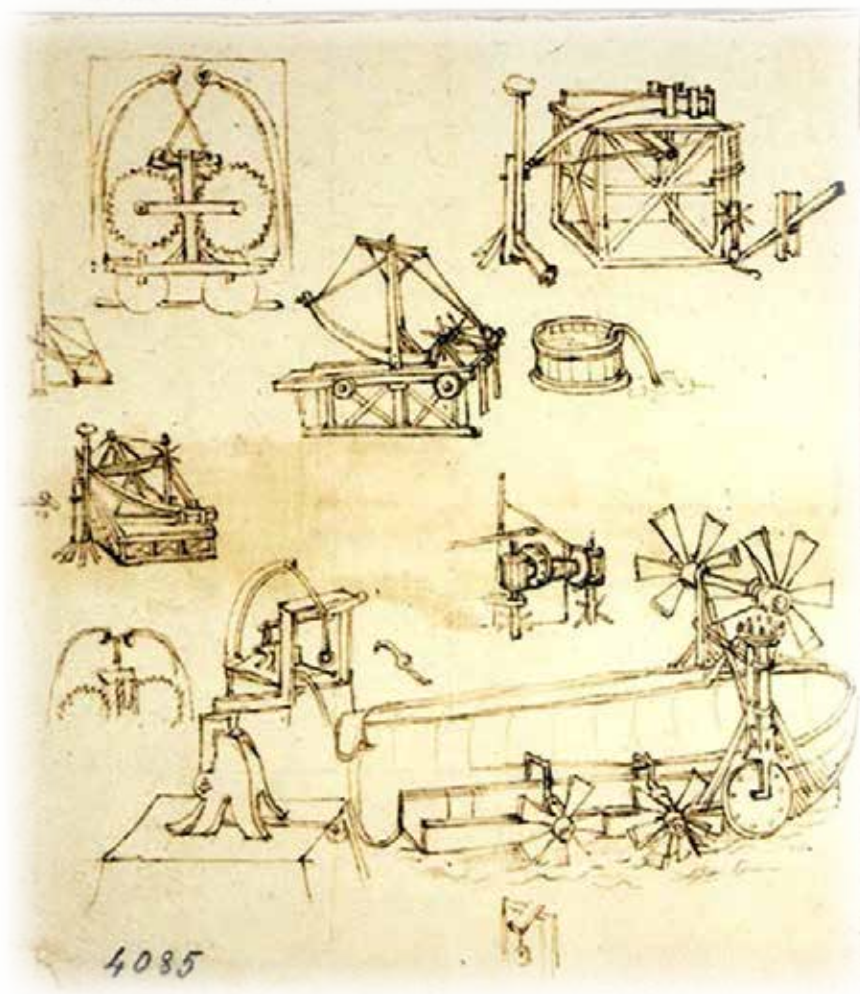


Figura 9.12: Folio 4085 Ar.
Galería de los Uffizi (Florenca), GDR.

9.3.5.11. GDS Galería de los Uffizi, 446 Er.

El diseño asignable al año 1478 (Pedretti y Dalli Regoli, 1985, p. 55-56) muestra cerca de la rotura del lado derecho, según Rosheim (2001) dos detalles de diseño relacionados con el carro autopropulsado de Leonardo: por una parte un tensor en paralelogramo (más a la derecha) y un croquis entre la interacción de los dientes de la rueda angular del carro autopropulsado y el engranaje sobre el tambor que proporciona la fuerza motriz.



Figura 9.13: Folio 446 Er.
Galería de los Uffizi (Florencia), GDR.

9.3.5.12. GDS Galería de los Uffizi, 446 Ev.

El diseño asignable al año 1479 (Pedretti y Dalli Regoli, 1985, p. 55-56) fue citado por Rosheim (2001) en relación con el proyecto de carro autopropulsado de Leonardo, en particular por las excéntricas y múltiples acanaladuras que vienen delineadas.



Figura 9.14: Folio 446 Ev.
Galería de los Uffizi (Florenca), GDR.

9.3.5.13. GDS Galería de los Uffizi, 447 Ev.

El folio datado en 1480 (Pedretti y Dalli Regoli, 1985, p. 58-59) fue examinado por Rosheim (2001) por su interés directo en el proyecto vinciano relacionados muy “*decisivamente con los estudios iniciales del autómatas programable*”.



Figura 9.15: Folio 447 Ev.
Galería de los Uffizi (Florencia), GDR.

9.3.5.14. El Códice de Madrid I, f. 0v.

La hoja, fechada en 1495 presenta un diseño de excéntrica sinusoidal. Se propuso por Rosheim (2001) como uno de los documentos emblemáticos de las soluciones más sofisticadas ideadas por Leonardo, mediante la excéntrica para la regulación del movimiento, un problema que adquiere suma importancia en el proyecto del carro autopropulsado.

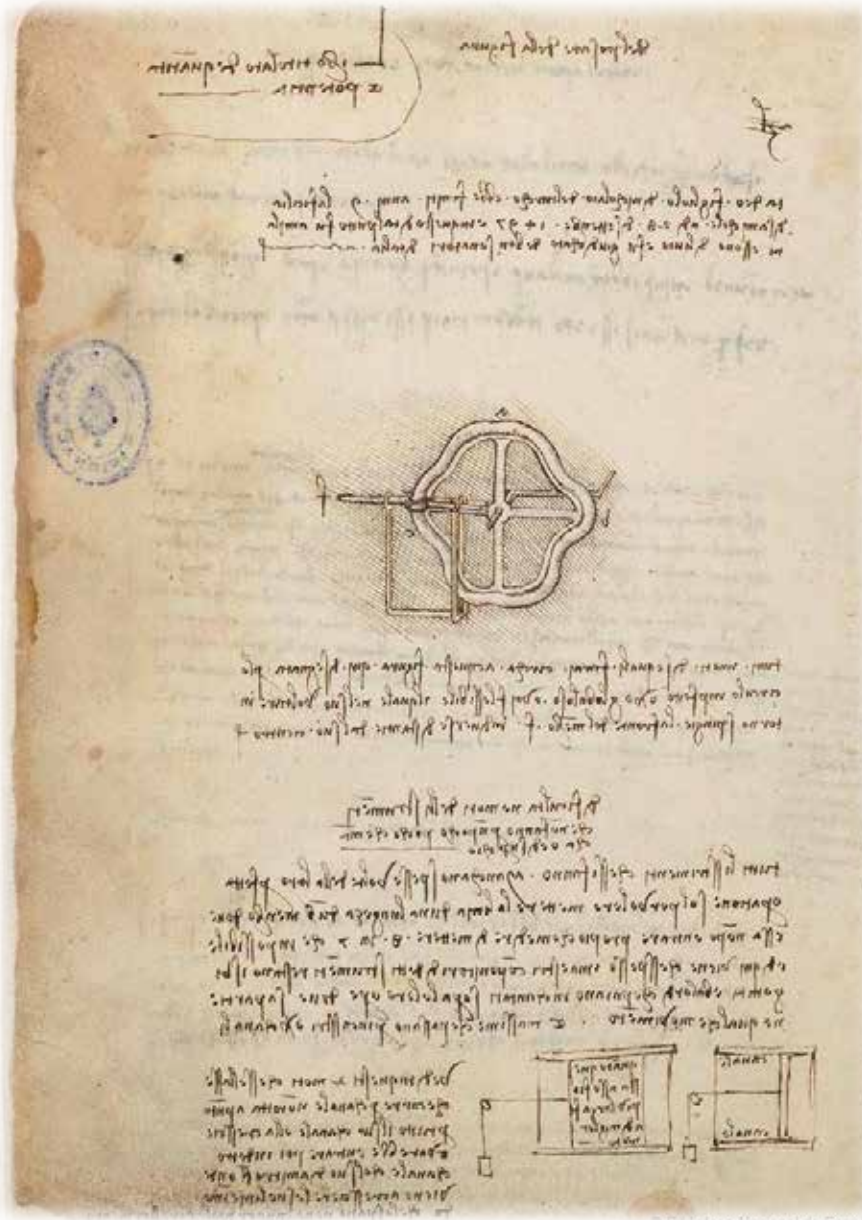


Figura 9.16: Folio 0v.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice Madrid I

9.3.5.15. El Código de Madrid I, f. 4r.

La hoja, fechada en 1495 presenta el diseño de un motor de muelle en espiral contenido en el interior de un tambor cilíndrico y conectado a un sistema de escape. El motor por encima del muelle tiene como misión casi seguro accionar un reloj. Según Rosheim (2001) este dispositivo tiene fuertes similitudes con los resortes en espiral (por su relación con la regularización del sistema de descarga de la fuerza motriz) que se utilizaron para abastecer de energía al carro autopropulsado de Leonardo.

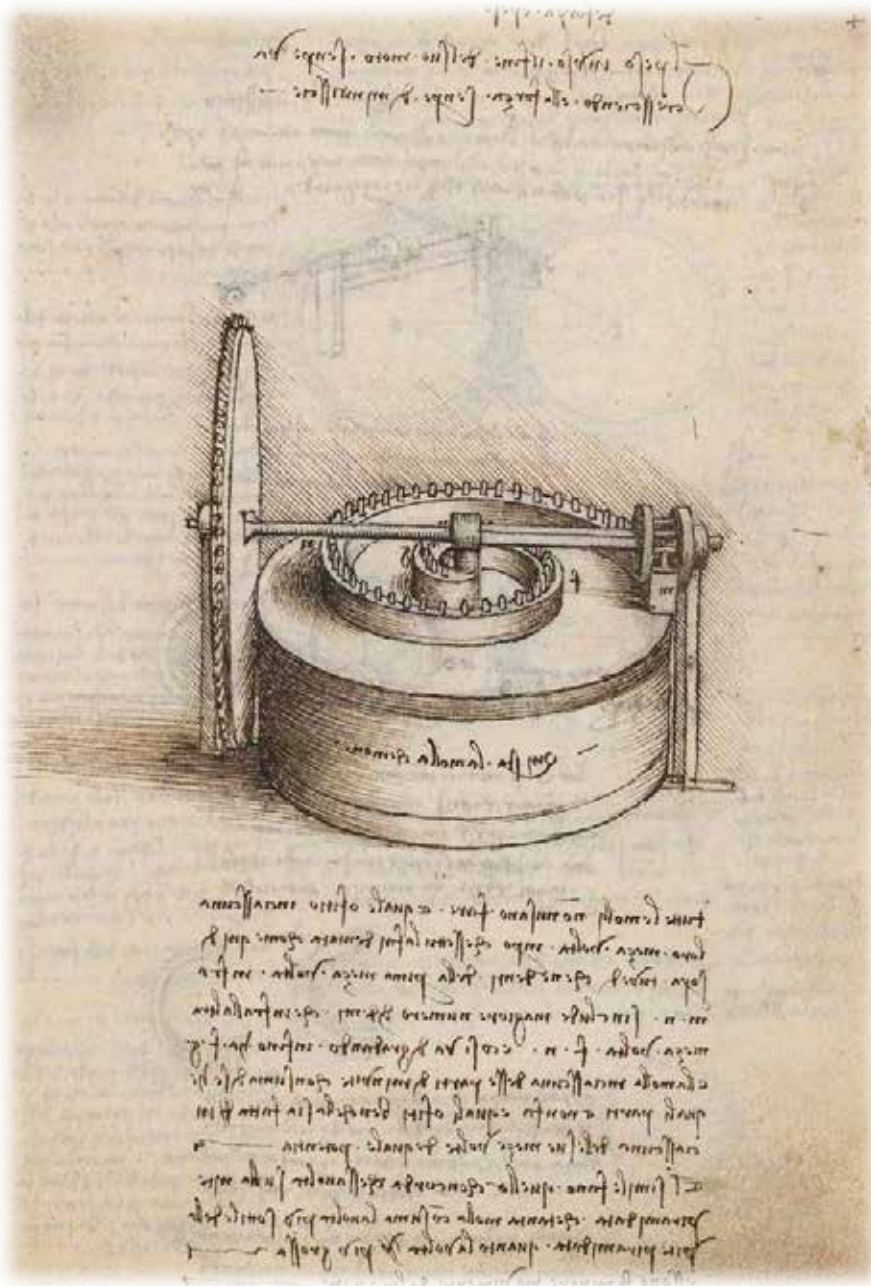


Figura 9.17: Folio 4r.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Código Madrid I

9.3.5.16. El Códice de Madrid I, f. 16r.

La hoja datada en 1495, muestra el diseño de un motor con resorte en espiral contenido en un tambor. El eje impulsado por el resorte motor está conectado con una rueda cónica tipo engranaje de jaula para compensar la reducción del empuje del resorte motor durante el proceso de descarga. El objetivo es casi seguro que el resorte motor accionara un reloj. Sin embargo, según Rosheim (2001), este dispositivo tiene fuertes similitudes con los resortes en espiral (por su relación con la regularización del sistema de descarga de la fuerza motriz) que se utilizaron para abastecer de energía al carro autopropulsado de Leonardo.

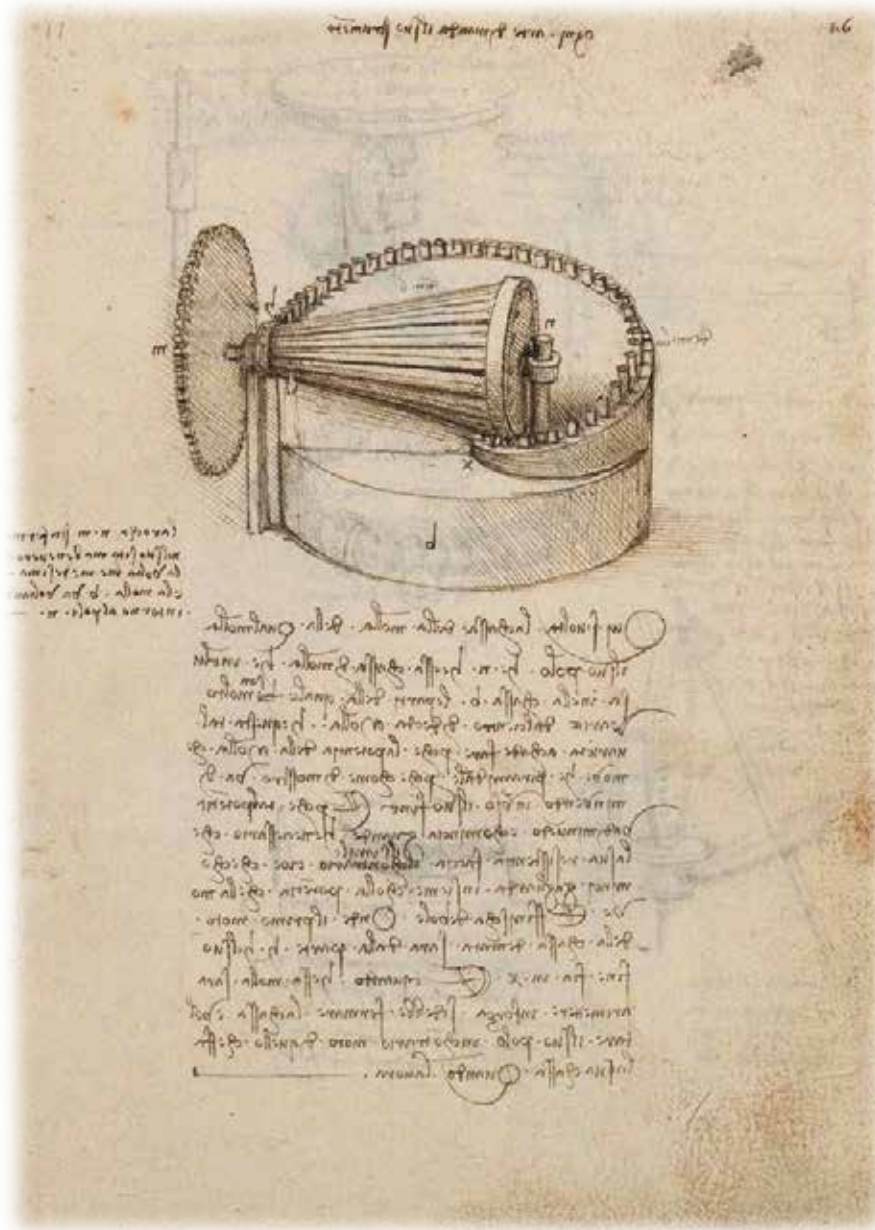


Figura 9.18: Folio 16r.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice Madrid I

9.3.5.17. El Código de Madrid I, f. 24r.

La hoja fechada en 1495, contiene varios diseños de excéntricas aplicando movimientos epicicloidales. Se propuso por Rosheim (2001) como uno de los documentos emblemáticos de las soluciones más sofisticadas ideadas por Leonardo, mediante la excéntrica para la regulación del movimiento, un problema que adquiere suma importancia en el proyecto del carro autopropulsado.

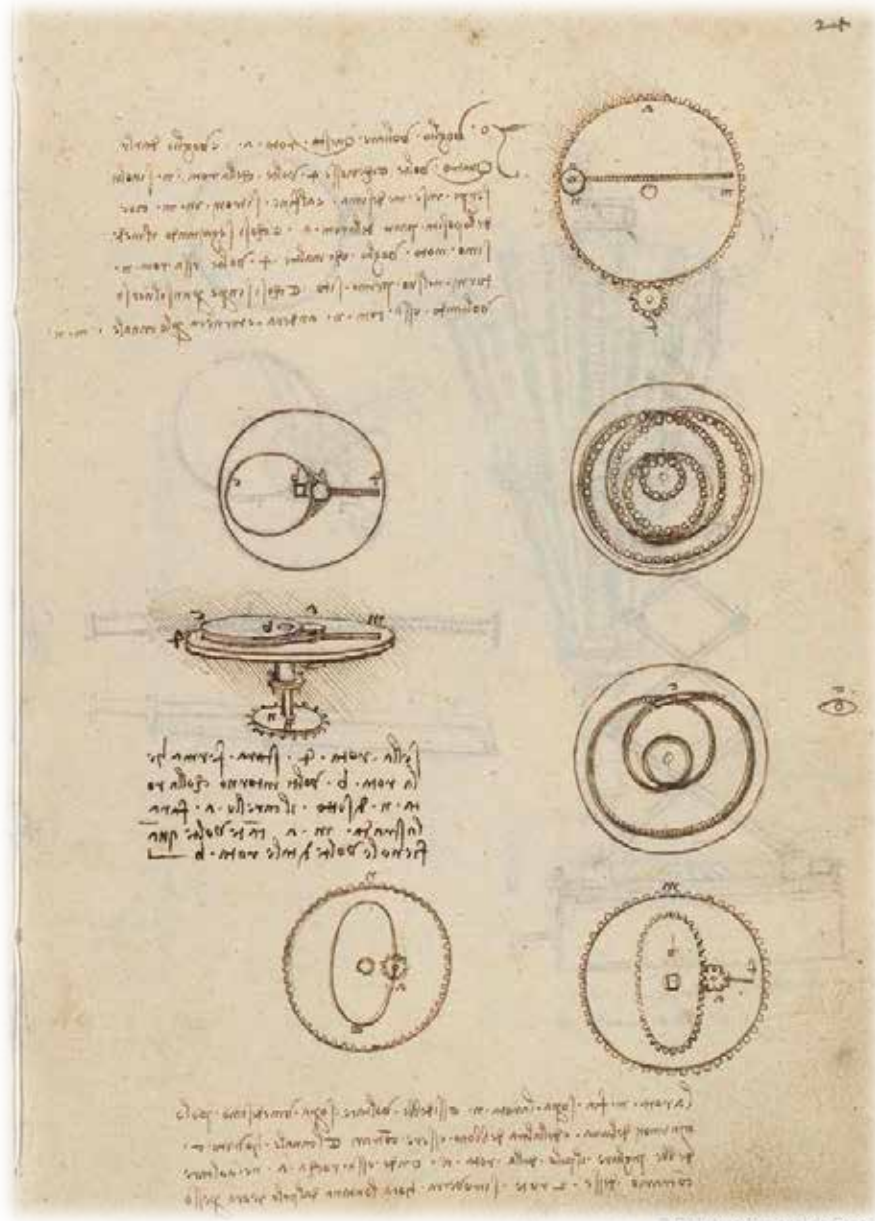


Figura 9.19: Folio 24r.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Código Madrid I

9.3.5.18. El Códice de Madrid I, f. 45r.

La hoja fechada en 1495 presenta el diseño de un resorte motor en espiral contenido en el interior de un tambor unido a un engranaje tipo jaula de sección cónica que engrana con un engranaje helicoidal para compensar la disminución del empuje del resorte motor cuando se va descargando. El dispositivo superior del resorte motor está diseñado seguramente para accionar un reloj. Rosheim (2001) recalcó que este diseño girado 45 grados podría ser utilizado como el motor automático que él consideró en el carro autopropulsado de Leonardo.

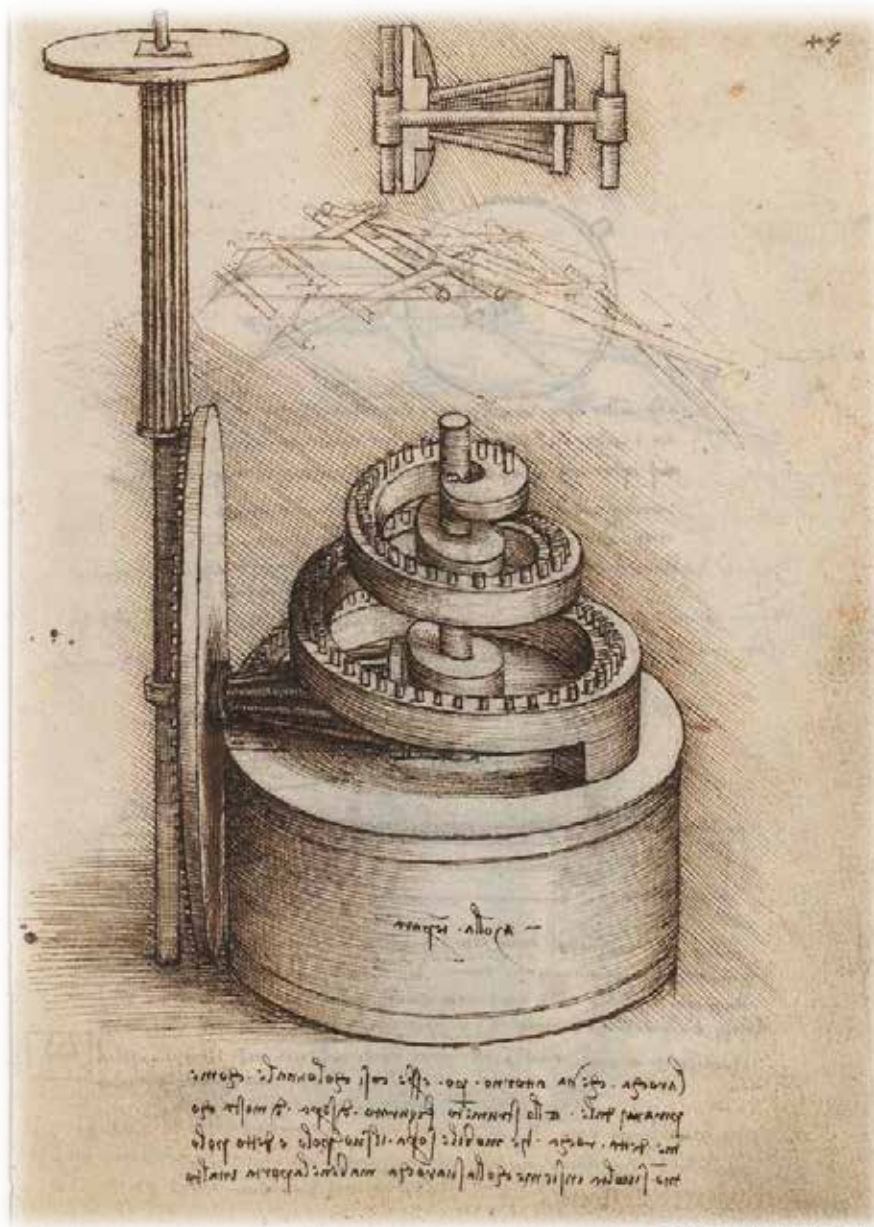


Figura 9.20: Folio 45r.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice Madrid I

9.3.5.19. El Códice de Madrid I, f. 85r.

La famosa hoja fechada en 1495, contiene una especie de catálogo de los diferentes tipos de resortes, entre los que se puede apreciar tres resortes del tipo en espiral que contenidos en tambores cerrados podían proporcionar la energía al carro autopropulsado de Leonardo. Se aprecia también una llave en forma de T. Según Rosheim (2001) no es posible que una llave similar se utilizara para cargar el carro autopropulsado de Leonardo.



Figura 9.21: Folio 85r.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice Madrid I

9.3.5.20. El Códice de Madrid I, f.117r.

El pequeño soporte metálico en la parte inferior del folio 812r (296va) del Códice Atlántico está interpretado por Mario Taddei y Edoardo Zanon (2004) como un “freno de mano” que Leonardo interpone entre las dos ruedas dentadas horizontales para bloquear el movimiento del carro autopulsado y de esta forma el resorte motor permanece estático. Mediante una cuerda un operador remotamente escondido puede tirar de la cuerda que sujeta el freno provocando que el carro sorprendentemente se ponga en movimiento él sólo sin aparentemente ayuda de nadie. El dispositivo en cuestión es muy similar a los diseñados en el Códice de Madrid (folios 97r, 116v y el presente 117r) como sistema de bloqueo de seguridad para que la rueda dentada no deje caer el peso.

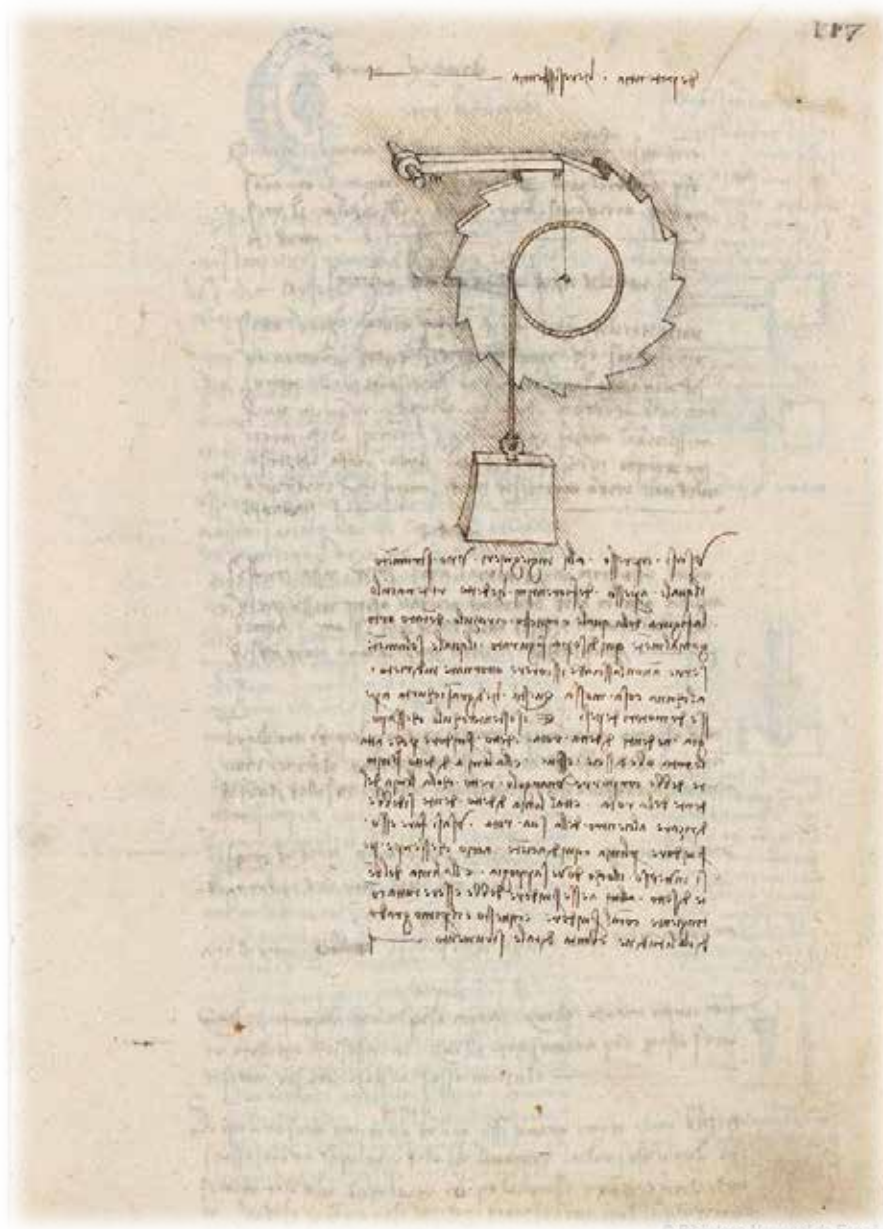


Figura 9.22: Folio 117r.

Biblioteca Nacional de España (Madrid), Códice Madrid I

9.3.6. Interpretaciones.

En este apartado se presentan cronológicamente las numerosas interpretaciones que diferentes autores han realizado históricamente sobre el “automóvil” de Leonardo.

9.3.6.1. Guido Semenza (1928).

A raíz de la sugerencia formulada en 1905 por Girolamo Calvi, que había destacado el interés de las hojas 812r (296va) y 17v (4va) del Código Atlántico, el Ing. Guido Semenza fue el primer autor en proponer que los dibujos en cuestión pasaran a denominarse como el “automóvil” de Leonardo, en su ensayo (“L’automobile di Leonardo”), publicado en “Archeion” en 1928.

Semenza sostenía que el diseño tratado en el CA f. 812r junto con los bocetos del f. 17v se prestaba a una doble interpretación: por un lado “un carro arrastrado transmitía un movimiento rotativo a unos engranajes (como en el caso de un contador de millas o un dispositivo para estirar los muelles)”, y por otro lado “un automóvil conducido por resortes” con ballestas, como los que se puede observar en la parte superior del diseño del folio CA 812r. Con mucha precaución y manteniendo siempre el beneficio de la duda, Semenza se decantó por la segunda hipótesis del “automóvil” (a pesar de que pudiera recorrer tan sólo algunos pocos metros), en el que reconoce el prototipo de un dispositivo particularmente refinado, el moderno diferencial, que ha permitido que las dos ruedas del carro tomen la curva con velocidades diferentes, evitando de esta forma el deslizamiento. Por tanto se le puede atribuir a Leonardo la anticipación en unos cuantos siglos del diferencial ideado por Pacquer en 1838.

Semenza reconoció que el diseño del f. 812r carecía de una conexión vital entre los resortes motrices de la ballesta y las dos ruedas dentadas horizontales, con el fin de garantizar la tracción a las ruedas del automóvil. Por último, prevé que las dos “misteriosas” ruedas angulares hubieran sido planificadas por Leonardo como un sistema de escape que sirviera para controlar las ruedas y cuyo fin hubiera sido el de moderar la velocidad de destensado de los resortes.



Figura 9.23: Interpretación del “automóvil” de Leonardo por Guido Semenza.

ARCHION, Archivio di storia della scienza (Roma), Vol. IX, Nº 1 Marzo de 1928. Fuente: (DOCUMENTOS WEB)

9.3.6.2. Gerolamo Calvi (1936).

En su “Vita di Leonardo” (“Vida de Leonardo”) de 1936, Gerolamo Calvi presentó la reproducción de la hoja 812r (296va) del *Códice Atlántico* con la siguiente leyenda “El FIAT de Leonardo (estudio de un carro automotor), CA, folio 296 va (TAV XIX)”.

Del “carro automotor” Calvi no habla explícitamente en el texto, pero sí aclara que en la reproducción del texto del *Códice Atlántico* que dio el título de “El FIAT de Leonardo” fue sugerido por un importante artículo del Ingeniero Guido Semenza.

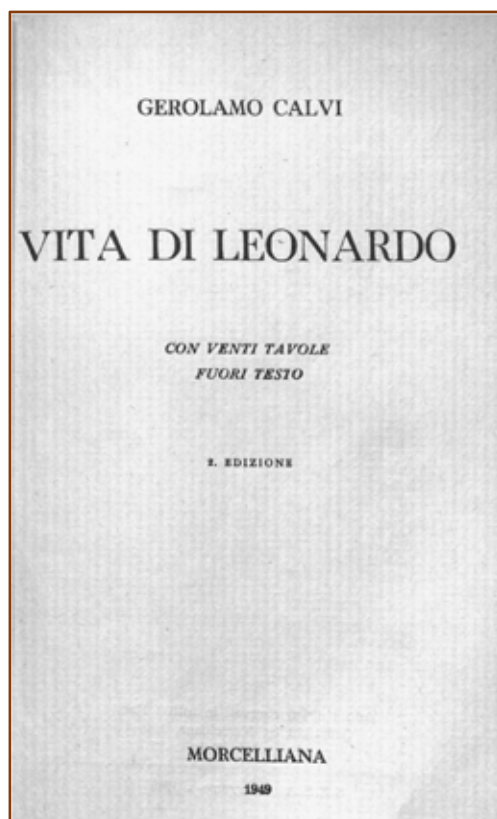


Figura 9.24: “Vita di Leonardo”.

Publicado en 1936 por Gerolamo Calvi. Fuente: (DOCUMENTOS WEB)

9.3.6.3. Arturo Uccelli (1936).

Refiriéndose a los resultados de los estudios de Semenza, Arturo Uccelli interviene por primera vez sobre el tema del “automóvil” de Leonardo con una breve artículo publicado en “La Lettura” en marzo de 1936 “L’automobile a molla e Leonardo da Vinci” (“El automóvil a muelles de Leonardo da Vinci”). La inspiración para el artículo fue sugerido por un artículo publicado el 5 de enero de 1936 en el “Corriere della Sera” por el Profesor Filippo Tajani (firmado con el seudónimo de Metron), el cual remitió el proyecto a los japoneses para reproducir a gran escala el automóvil a muelles.

Uccelli aprovechó la oportunidad para reivindicar la prioridad de las ideas Vincianas en las tentativas de los japoneses. El artículo de Uccelli se imprime ese mismo año en Francia por “Lu” titulado “L’automobile à ressort de Leonard de Vinci” y al año siguiente Jean Teck la publicó en la edición de abril de la “Revue Scientifique”. Posteriormente a la publicación del artículo de Uccelli en “La Lettura”, recibe varias cartas del Ingeniero Mario Bonavia, Director adjunto de la Escuela Politécnica de Zurich, donde después de estudios minuciosos Bonavia pone de manifiesto que el automóvil de muelles es una “loca esperanza” y que “hay que relegar el problema de los automóviles de muelles al mundo de los juguetes”.

En un posterior ensayo sobre el “automóvil” de Leonardo (1939), Uccelli tomó ejemplo de la reciente publicación en la que Jotti de Balfroon Polesine había avanzado una interpretación del diseño vinciano del f. 812r (296va) del Código Atlántico diferente de la de Semenza. La atención de Uccelli se concentró en el funcionamiento que Semenza atribuía a las misteriosas pequeñas ruedas angulares y en la parte inferior del vehículo esbozado por Leonardo en su f. 812r del CA.

Partiendo de la base principal de la idea de Semenza que se trataba de un sistema de escape, y teniendo presente a Jotti, Uccelli propone una nueva interpretación de su funcionamiento. Prevé, en primer lugar que, en virtud de los invisibles peldaños de la rueda, que una corona coaxial engranara con las dos grandes ruedas dentadas. Lo que explica el mecanismo de rotación angular de las ruedas (impulsada por las ruedas dentadas centrales, que a cada vuelta operan los resortes motores de ballesta). Como resultado de la rotación de la rueda, las clavijas actúan sobre el muelle, tirando de él. Cuando cada una de las clavijas sale del muelle secundario, ese escape, tiende a enderezar. En consecuencia, la excéntrica golpea contra el extremo de la palanca. Este último llega a los resortes principales a través de la cuerda que conecta con ellos. De esta manera, según Uccelli, las ruedas angulares son la clave para que la energía de los resortes principales se transmita, ya que de otro modo se perdería. De esta forma llegó a la conclusión de que, “la transmisión de la energía de los resortes principales a las ruedas del carro va a ser moderada, y que se aprovecha el retorno de los resortes secundarios a los resortes principales”.

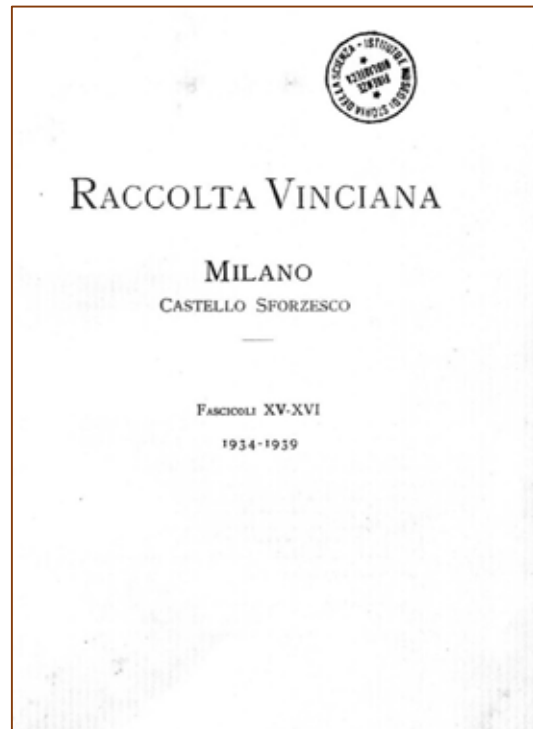


Figura 9.25: Publicaciones de Uccelli
En “*La Lettura*” (1936) y en “*Raccolta Vinciana*”(1934-1939). Fuente: (DOCUMENTOS WEB)

9.3.6.4. Jotti da Badia Polesine (1938).

En un raro opúsculo titulado “*Leonardo e l’automobile*” (“Leonardo y el automóvil”) publicado en 1938 (con 120 ejemplares numerados, a partir de la agrupación de los fascículos que van del número 6 al 11 de la revista “L’auto” de 1937, reeditado con un prefacio del profesor Ingeniero Roberto Marcolongo, 1939) destinado, como él cuenta, a los automovilistas. Jotti ha reconsiderado el diseño del “automóvil” de Leonardo partiendo de las

interpretaciones dadas por Semenza que si bien acepta la tesis interpretativa central (la que trata precisamente sobre la propuesta de un “automóvil”) contribuye con importantes correcciones y aportaciones. Jotti trató de reconstruir la conexión entre los resortes motrices a ballesta y las ruedas dentadas que es necesario para garantizar la tracción en las ruedas del automóvil, cuyo vínculo falta en los bocetos de Leonardo tal y como recalca Semenza.

Según Jotti el contacto con las ballestas motrices se garantizaba por las cuerdas que existen alrededor de la rueda coaxial que Leonardo croquiza en medio de las dos grandes ruedas dentadas. Una vez cargado el dispositivo, se garantizaba la rotación de las ruedas dentadas y como consecuencia se proporcionaba la tracción necesaria a las ruedas del carro. Según Jotti, al igual que interpretó Semenza, las dos ruedas angulares que Leonardo dibujó en la parte inferior de la hoja 812r (296va) debe ser considerada como “reguladoras” o como “escape” para moderar la velocidad de destensado de los resortes de ballesta y por tanto de esta manera poder ajustar la velocidad del vehículo.

En la segunda parte de su estudio, Jotti examina algunos estudios sobre la evolución de los vehículos automotor, citando los proyectos de Hautzsch (1649) y Vaucanson (1748). Indagó también en algún que otro estudio donde Leonardo, trabajó sobre cuestiones relacionadas con la industria del automóvil, pero ya sin estar relacionadas con el proyecto presentado en la hoja 812r del CA, como por ejemplo cadenas de transmisión, cojinetes de rodillos para reducir la fricción de rodadura, cuentakilómetros, etc.

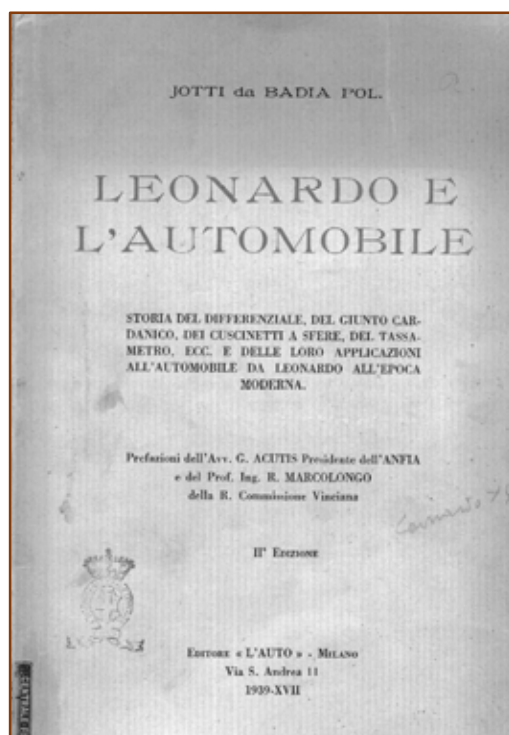


Figura 9.26: Publicación de Jotti.

Artículo titulado “Leonardo e l’automobile” en 1938. Fuente: (DOCUMENTOS WEB)

9.3.6.5. Giovanni Canestrini (1939).

La contribución más exhaustiva y analítica sobre el “automóvil” de Leonardo (que viene a analizar todas su múltiples facetas: las ruedas, la fricción, los sistemas de guía, etc.) es sin duda la que publicó G. Canestrini en 1939 (“Leonardo costruttore di macchine e di veicoli”). El anterior trabajo fue publicado como un capítulo del volumen titulado “L’automobile. Il contributo italiano all’avvento dell’autoveicolo” (“El automóvil. La contribución italiana a la llegada del automóvil”).

Estas publicaciones han sido los resultados de las investigaciones realizadas por Canestrini con motivo de la preparación de una amplia sección dedicada a Leonardo en la “Muestra de Leonardo da Vinci y de las invenciones italianas” llevada a cabo en el Palazzo dell’Arte en Milan en 1939 (mayo-octubre). Como reza en el título de la Guía Oficial de la exposición “Bajo el Alto Patronato del Rey de Italia y el que fue Presidente General Mariscal Badoglio, fue promovido desde el Ayuntamiento y la Federación de los Fascistas de combate de Milán, en la obediencia y bajo el mando de “llevar la cultura al pueblo”, el Duce dio a los representantes de las Instituciones culturales de Lombardía a 31 de octubre de 1936....”

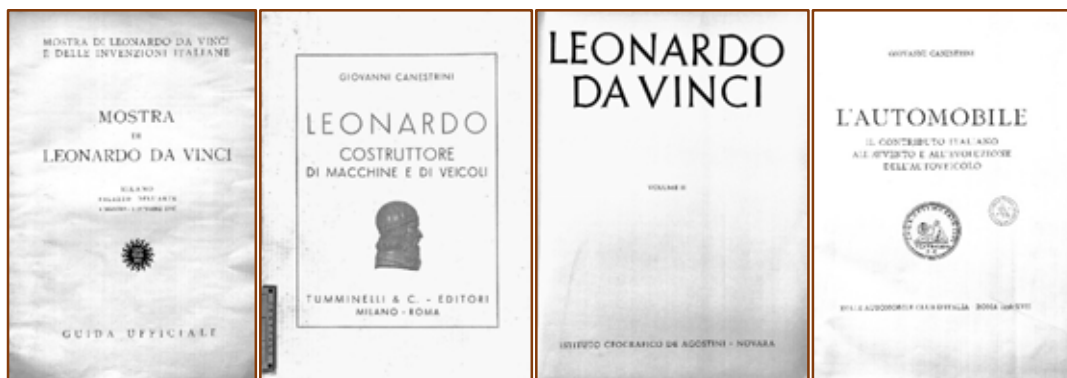


Figura 9.27: Canestrini.

Diferentes publicaciones en 1939. Fuente: (DOCUMENTOS WEB)

Junto con Roberto Marcolongo, John Strobino y Arturo Uccelli, Giovanni Canestrini actuó como Comisario para el Salón de Artes Mecánicas. En la descripción de los contenidos de la sala que aparece en la Guía Oficial (p. 22-24) vemos un gran número de modelos de trabajo, reconstruidos a partir de dibujos de Leonardo. El número 22 de la guía (p. 24) se describe como “Modelo reconstruido de carro automotor con sistema de propulsión por resortes, transmisión independiente a las ruedas motrices y dispositivo diferencial”. En el diseño y posterior construcción del modelo tridimensional del “auto” de Leonardo se comprometió personalmente el mismo Canestrini. El modelo, lamentablemente fue destruido durante un viaje del mismo para una exposición que se iba a celebrar en Tokio en 1940. Se conservan sin embargo dos fotografías (publicadas en el citado trabajo de Canestrini, págs. 125 y 130) y otros planos de construcción (págs. 115 y 127).

En su estudio, Canestrini menciona en repetidas ocasiones y tiene en consideración todos los aspectos relacionados con cualquier investigación que Leonardo tocara sobre el “automóvil”. Canestrini analizó en primer lugar la hoja 17v (4va) del CA la cual produjo un primer diseño constructivo (p. 108), haciendo hincapié en que se trata de “un veraz esquema de transmisión para un vehículo mecánico automotor”. Canestrini está convencido de que este estudio fue desarrollado en el proyecto esbozado en el folio 812r (296 va) del CA, proyecto que Leonardo dejó incompleto. De este documento se analizó en primer lugar (págs. 113-118) las imágenes de la parte superior y se concluyó que representaba un estudio sobre la transmisión del movimiento de las ruedas horizontales dentadas (impulsadas por resortes de ballesta) a las ruedas del carro. Posteriormente, Canestrini estudió la imagen inferior a la cual le daba mayor importancia. Se recomfortó al descifrar la solución en la reducción de la transmisión (de la rueda dentada horizontal al engranaje tipo jaula vertical que engrana con las ruedas del carro) que Leonardo había adoptado, que atribuyen (como lo había hecho Semenza) al descubrimiento del “diferencial”, dato que el vehículo muestra con una transmisión independiente a los dos engranajes tipo jaula, resolviendo el problema de que dos ruedas de un carro puedan moverse describiendo una curva sin deslizamiento (p. 121). Canestrini entonces se centró en el sistema de resortes de ballesta, que iba a proporcionar la fuerza motriz para el vehículo. Repitiendo las observaciones ya formuladas por Semenza, Canestrini mostró su convencimiento de que el sistema de resortes de ballesta tenía la función motriz y confirmó

que el diseño carecía de conexión entre los resortes y las ruedas dentadas horizontales; tampoco llegaba a explicarse la función de las clavijas salientes de las ruedas angulares. Partiendo de las dificultades en la interpretación, Canestrini llegó a la conclusión de que el proyecto presentado por Leonardo tenía dificultades insuperables y llegados a este punto lo abandonó.

A pesar de estas evaluaciones negativas, Canestrini dice que el proyecto de da Vinci sugería tres grandes innovaciones: el principio del diferencial, por primera vez se ha diseñado un vehículo con la idea de acumular, a través de un sistema de resortes, la energía necesaria para el movimiento y, por último la transmisión independiente de las dos ruedas de carro (p. 128). Sólo para llevar a cabo todas estas ideas de vanguardia decidió construir un modelo real, a pesar de estar convencido de que no funcionaría. Canestrini publicó todas su sugerencias sobre el “automóvil” de Leonardo en un ensayo de 1939 titulado “Le machine di Leonardo” en Leonardo da Vinci (págs.. 500 y 502).

9.3.6.6. Mario Loria (1969).

En un breve estudio (“Ruota trascinata e ruota motrice: l’automobile di Leonardo”) publicado en las Actas del Simposio Internacional de la Historia de la Ciencia celebrado en Vinci en 1969 y dedicada a Leonardo por el 450 aniversario de su muerte, Mario Loria afrontó la cuestión del “automóvil” de Leonardo dando un punto de vista completamente distinto a todo lo relacionado en estudios anteriores y objetivamente ajeno al animado debate sobre los proyectos vincianos. Excluyó que Leonardo nunca fuera consciente del problema, ya que Loria hizo hincapié en la necesidad de una relación equilibrada entre el par motor y el vehículo si éste no era arrastrado y sí autopropulsado como se mantiene en el proyecto de Leonardo. Loria llegó a la conclusión de que la toma de conciencia de la importancia fundamental de esta relación surgió como base empírica en una época muy posterior a la que le tocó vivir a Leonardo y su carro automotor “no pudo ejercer ninguna influencia sobre el desarrollo de la propulsión mecánica de vehículos a motor” (p. 103).

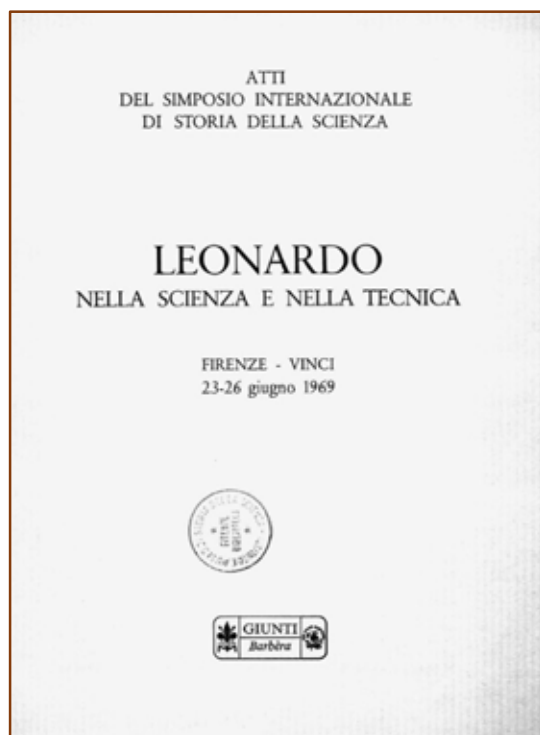


Figura 9.28: Publicación de Mario Loria.

Actas del Simposio Internacional de la Historia de la Ciencia. Vinci, Florencia (1969).

Fuente: (DOCUMENTOS WEB)

9.3.6.7. Carlo Pedretti (1975 y 1996).

Las dos principales publicaciones en las que Pedretti se ha ocupado de la hoja 812r (296va) del *Códice Atlántico*, interpretándolo como un estudio de un carro automotor y confirmando una datación entorno a 1478, son las XV Lecturas Vincianas del 15 de abril de 1975 (“Eccetera: perché la minestra si fredda”) (p. 13 nota a pie de página 9) y esta “chistosa” incorporación en el Apéndice del ensayo de Mark E. Rosheim de 1996 (“Leonardo’s lost robot” págs. 109-110, nota a pie de página 6). Entre estos dos extremos se publican sus anotaciones sobre el “automóvil” en “Leonardo architetto” (Milán, 1978, con numerosas ediciones en varios idiomas), p.320, fig. 504, el catálogo de los manuscritos del *Códice Atlántico* después de su restauración (“The Codex Atlanticus of Leonardo da Vinci” de 1978, en particular vol.2, p. 125-126); la crónica “Leonardo’s Robot” (págs. 273-274); y el volumen “Leonardo. Le machine” de 1999 (p. 81).

En 1975, la publicación del diseño del carro autopropulsado y una mención junto a la publicación de una hoja inédita (Florencia, Uffizi, GDS, 4085A) con copias del primer 500 aniversario de la tecnología de los estudios de Leonardo en el período de su juventud.

Pedretti interpreta que el diseño del “automóvil” de Leonardo dibujado en la hoja 812r del *Códice Atlántico* es un carro impulsado por resortes con la intención de hacer desplazamientos cortos, como de un lugar a otro en una plaza. Sobre la cuestión de la fuerza motriz del vehículo ya Pedretti dejaba entrever su parecer en las numerosas discusiones con Mark Rosheim y éste último publicó en “Leonardo’s lost robot” que Carlo Pedretti le había sugerido que la fuerza motriz era generada por unos resortes en espiral alojados en tambores de madera y que era transmitida a través de un eje a unas ruedas dentadas horizontales dando la clave para comprender la actual interpretación correcta del funcionamiento del carro.



Figura 9.29: Publicaciones en las que interviene Carlo Pedretti.. (1975 - 1996) Fuente: (DOCUMENTOS WEB)

9.3.6.8. Enrico Gigli (1979).

En el estudio de Marialisa Angiolillo “Leonardo. Feste e teatri” de 1979 se inserta (cuadro 6) un análisis técnico del Ingeniero Enrico Gigli que analiza con la ayuda de una serie de diagramas técnicos, el funcionamiento del “automóvil” de Leonardo (CA 812r, 296 va). Gigli confirma en primer lugar, aunque con algunas aclaraciones técnicas, la hipótesis de Semenza / Canestrini que en el folio 812r del CA se representa un carro con transmisión independiente para las dos ruedas, pero que el principal objetivo del mecanismo es servir de diferencial. Afirma que el diferencial es esencial cuando el motor es único para evitar así los deslizamientos en las curvas. El objetivo perseguido por Leonardo y Gigli fue ver como se realiza la transferencia de energía del movimiento del carro de un motor a otro “esta es la

segunda dificultad encontrada en el camino”. Por este motivo Gigli postula que el vehículo ha sido diseñado no sólo para rutas curvas sino también para terrenos más accidentados. También señala un posible sistema de enlace con cuerda (que falta en el diseño de Leonardo) entre los resortes motores de ballesta y las ruedas horizontales. Por último realiza una hipótesis acerca de cómo se podían conectar originalmente los diferentes sistemas de engranaje en la parte superior del carro, de nuevo utilizando un gráfico. La carga de los dos muelles principales producen un avance manteniendo el resto de los resortes en tensión. La liberación paulatina de la energía del resorte en espiral del tambor va transmitiendo la potencia a las ruedas. Gigli pesó que el carro se carga y se descarga por el avance del carro cargando los resortes motores y llegó a la conclusión de que el diseño de Leonardo es la solución a un problema energético donde la recuperación de la energía potencial se basa en la propiedad de unos pesos colocados en una posición ligeramente inclinada.

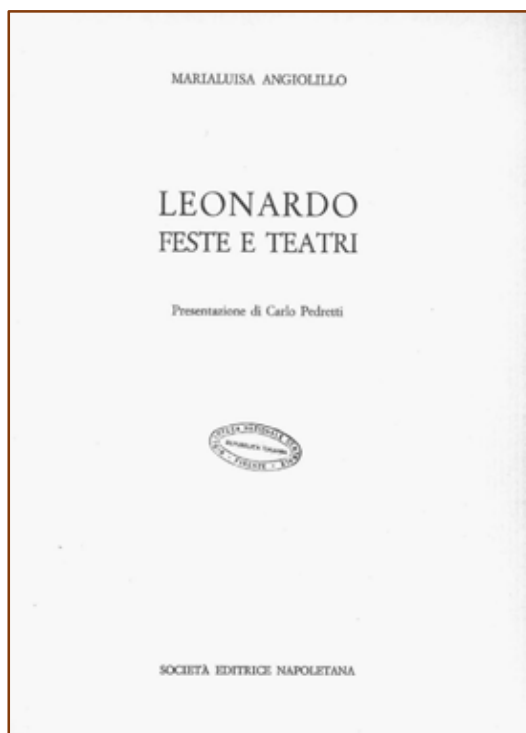


Figura 9.30: Publicación de Enrico Gigli.
(1979) Fuente: (DOCUMENTOS WEB)

9.3.6.9. Augusto Marinoni (1981).

En el ensayo publicado en un lujoso volumen-portfolio de gran formato “Leonardo da Vinci: l'automobile e la bicicletta”, Augusto Marinoni, que es criticado por ser demasiado audaz en las integraciones y reconstrucciones de Canestrini, marcó un poco las distancias con Carlo Pedretti. Según Marinoni el uso de la tracción por resortes motor es una novedad introducida por Leonardo comparable con los proyectos que le precedieron en donde la fuerza motriz es proporcionada por el hombre. En la segunda parte de su ensayo Marinoni subraya la atención de un dibujo hasta ahora desatendido (CA, f. 114r, 40rb) del cual surgió según él, unos pocos años más tarde el AC 812r (296va). En el f. 114r del CA se ve débilmente esbozado un carro con cinco ruedas en una de las cuales se aplica un dispositivo que no es claramente reconocible (¿un engranaje tipo jaula?), se reconocen claramente dos manivelas, con lo que la fuerza motriz generada por la fuerza muscular del hombre hace que el carro se mueva. Marinoni considera reconocible: la rueda dentada de engranaje tipo jaula con los dientes de otra rueda, dos grandes muelles de ballesta diseñados para proporcionar la fuerza motriz, un cilindro saliente de la rueda derecha para arrollar las cuerdas para ajustar la tensión de forma

suave (un sistema de escape) y un asiento en el que está sentado un piloto que comanda la dirección.

Basándose en todos estos factores, Marinoni llegó a la conclusión de que el diseño de todos los elementos identificativos del “automóvil” de Leonardo (f. 812r del CA), de Semenza y Canestrini deben ser considerados como un proyecto de desarrollo aunque incompleto pero abierto a futuras modificaciones. En la parte final de su ensayo, Marinoni criticó la interpretación diferente del CA 114r proporcionada por Pedretti en “Leonardo architetto” (p. 319) en virtud de lo cual sería un dispositivo móvil para levantar objetos de peso considerable como unas campanas. Marinoni se reafirma en su tesis central de su propia interpretación del “automóvil” de Leonardo en su introducción “Laboratorio su Leonardo” de 1983 (págs. 30-31), y en su ensayo “Leonardo’s impossible machines” de 1987.

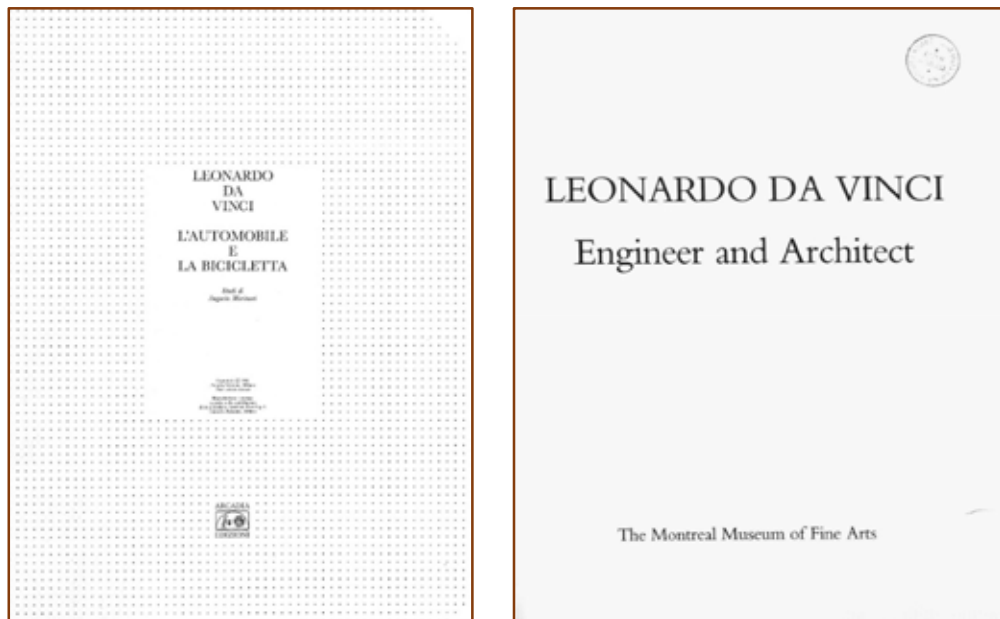


Figura 9.31: Publicaciones de Augusto Marinoni.
(1983 - 1987) Fuente: (DOCUMENTOS WEB)

9.3.6.10. Mark E. Rosheim (2001).

De la lectura vinciana del 15 de abril de 2000 (“L’automa programmabile di Leonardo”) publicada en 2001, Mark Rosheim ha presentado una detallada reconstrucción, radicalmente diferente de las tradicionales dispositivos que rigen el funcionamiento del “automóvil” de Leonardo. Una resumida anticipación de su nueva interpretación se puede leer en el Apéndice de Rosheim “Leonardo’s automobile” de su ensayo “Leonardo’s robot” de 1996 (pág.. 109-110). Para Rosheim, el dibujo del CA f. 812r (296va) es un proyecto de un autómatas programable destinado a ser utilizado como carro autopropulsado en ocasiones especiales con público. Rosheim señala que una de estas ocasiones especiales tuvo que ocurrir en 1515 (es decir 35 años después del diseño del “automóvil” de Leonardo) cuando Leonardo ideó según lo referido por Lomazzo, un León mecánico en movimiento para conmemorar la llegada del Rey francés Francisco I.

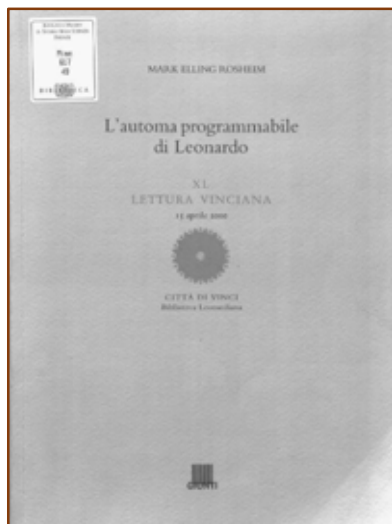


Figura 9.32: Publicación de Mark E. Rosheim.
(2001) Fuente: (DOCUMENTOS WEB)

9.3.6.11. Mario Taddei y Edoardo Zanon (2004).

Taddei y Zanon han sido los primeros autores en crear un primer modelo digital en 3D dinámico e interactivo del automóvil autopropulsado, un modelo que ha sido probado en prácticamente todos los detalles de toda la operación. Los dos autores también han simulado las diferentes posibilidades de programación de transporte a través de pintorescas "pruebas de carretera".

Han ofrecido interpretaciones convincentes de todos los dispositivos esbozados por Leonardo. En particular, cabe destacar la interpretación proporcionada por ellos en el dibujo en el margen inferior de f. 812r, en el que se ha identificado por primera vez un dispositivo de freno de mano controlable por medio de la cuerda, desde una posición remota. El freno consiste en una varilla de madera o de metal unido a un anillo a lo largo de la cual puede deslizarse. Después de que se han cargado los resortes de accionamiento, la varilla se sujeta entre los dientes de acoplamiento de las dos ruedas horizontales, evitando de este modo que el automóvil pueda comenzar a moverse. Para empezar, simplemente se tira de la cuerda conectada al eje.



Figura 9.33: Publicación de Taddei y Zanon.
Las máquinas de Leonardo. Ed. Giunti (2004)

9.4. Anatomía de CA 812r (296va).

9.4.1. Introducción.

La hoja CA 812r de da Vinci tiene numerosas unidades figurativas que se destacan en la imagen que aparece a continuación. Se ha estructurado de tal forma que en cada una de ellas se intenta explicar su naturaleza y función.

A VISTA AXONOMÉTRICA DEL AUTOMÓVIL (proyecto preliminar).

B VISTA EN PLANTA DEL AUTOMÓVIL (proyecto más detallado).

- 1 Engranaje de cremallera.
- 2 Variante del engranaje de cremallera. Mecanismo auxiliar.
- 3 Freno a distancia.
- 4 Eje de rotación de los brazos curvos.
- 5 Pétalo de la rueda de excéntricas que controla la dirección.
- 6 Tensores auxiliares.
- 7 Boceto del eje de rotación.

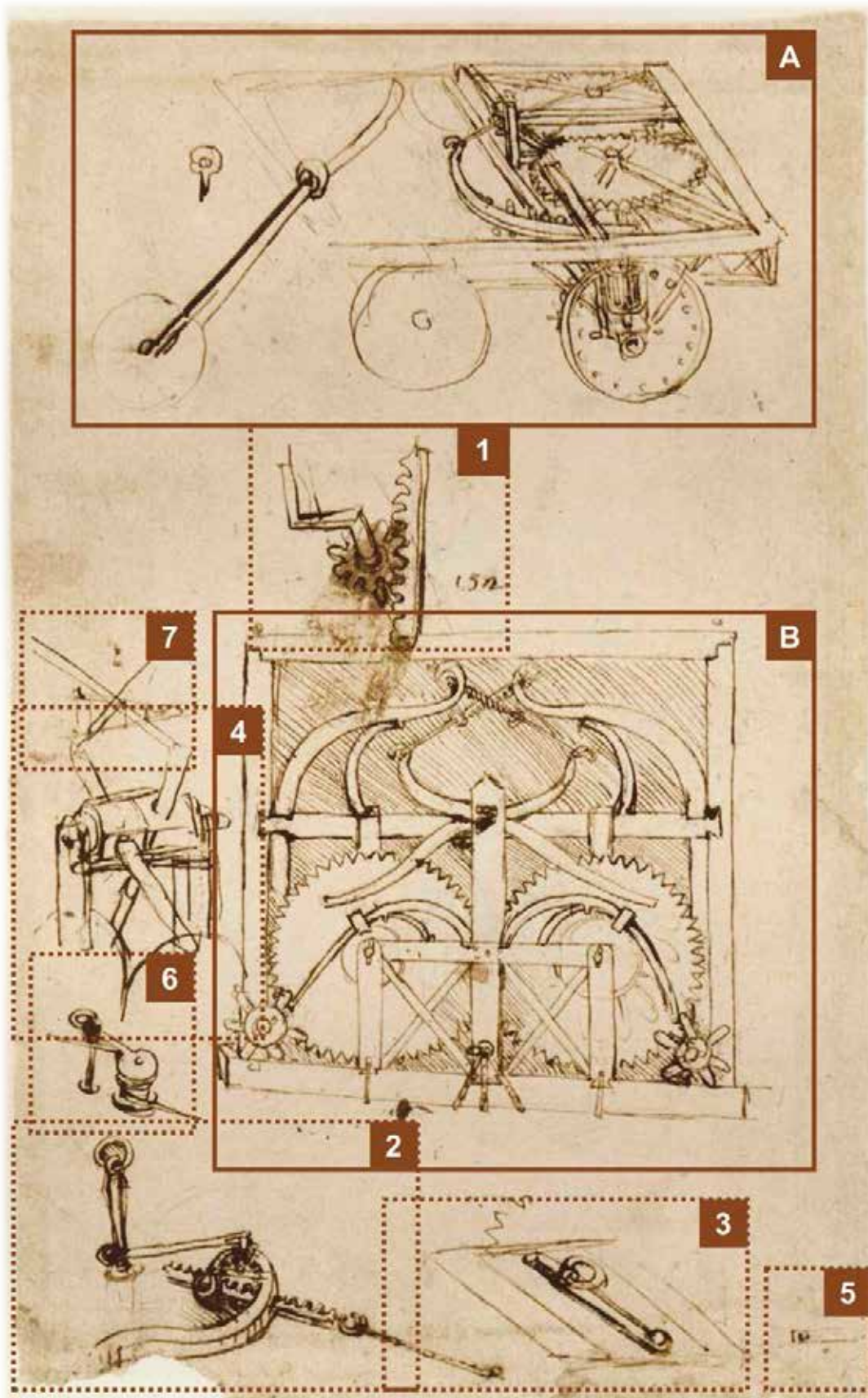


Figura 9.34: Análisis diferenciado por partes del folio.
Biblioteca Ambrosiana (Milán). Códice Atlántico. f. 812 r

9.4.2. Recuadro A: Vista axonométrica del automóvil.

En el recuadro A se puede observar la primera idea proyectual del carro autopropulsado “automóvil”. Este carácter preliminar del proyecto queda patente por las variadas descripciones incompletas de los mecanismos que aparecen sólo en el lado izquierdo. En su primer diseño parece que Leonardo pensara en un carro con 5 ruedas, una de las cuales estaría accionada o controlada manualmente. *Canestrini* en su interpretación integró detalles de la perspectiva del recuadro A con algunas particularidades del recuadro B.

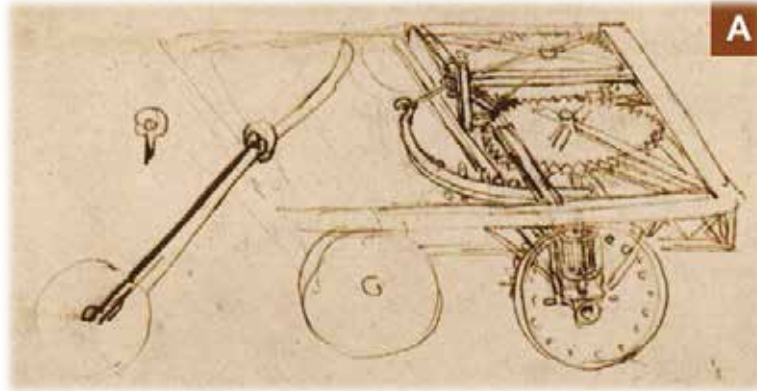


Figura 9.35: Recuadro A. Vista en perspectiva del automóvil de Leonardo.
Biblioteca Ambrosiana (Milán). *Código Atlántico*. f. 812 r (detalle)

9.4.3. Recuadro B: Vista en planta del automóvil.

El hecho de que el diseño del recuadro B deba considerarse una evolución del diseño del recuadro A se justifica observando la precisión de contorno y el sombreado. Además, el recuadro B ocupa la posición central del documento y se representa en vista desde arriba (vista de planta), para mostrar juntos la complejidad de los mecanismos que conforman el escape y la dirección.

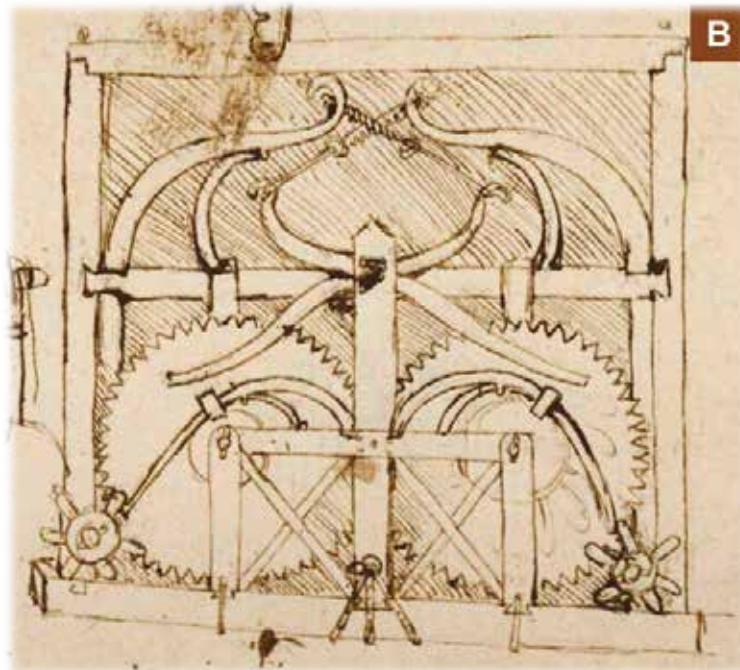


Figura 9.36: Recuadro B. Vista en planta del automóvil de Leonardo.
Biblioteca Ambrosiana (Milán). *Código Atlántico*. f. 812 r (detalle)



Figura 9.37: El modelo digital superpuesto sobre el diseño en planta de recuadro B coincide plenamente.
Fuente: web L'Automobile

9.4.4. Recuadro 1: Engranaje de cremallera.

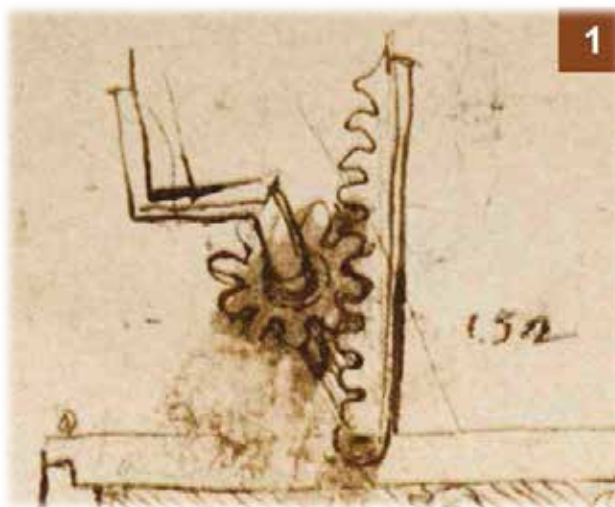


Figura 9.38: Recuadro 1. Boceto de engranaje de cremallera.
Biblioteca Ambrosiana (Milán). *Códice Atlántico*. f. 812 r (detalle).

El pequeño boceto que se encuentra entre los recuadros A y B presenta una de las soluciones adoptadas por Leonardo para el sistema auxiliar aplicado al resorte de retorno que se encuentra en el extremo superior de la ballesta del automóvil en la parte derecha del diseño del recuadro B. Se trata una solución alternativa a la adoptada en el diseño del recuadro B. Puesto que este mecanismo invade parte del chasis del automóvil que se puede apreciar en el diseño del recuadro B, es evidente por tanto que se hizo después.



Figura 9.39: El modelo digital superpuesto.
El diseño del recuadro 1 coincide perfectamente con él. Fuente: web L'Automobile

9.4.5. Recuadro 2: Variante del engranaje de cremallera. Mecanismo auxiliar.

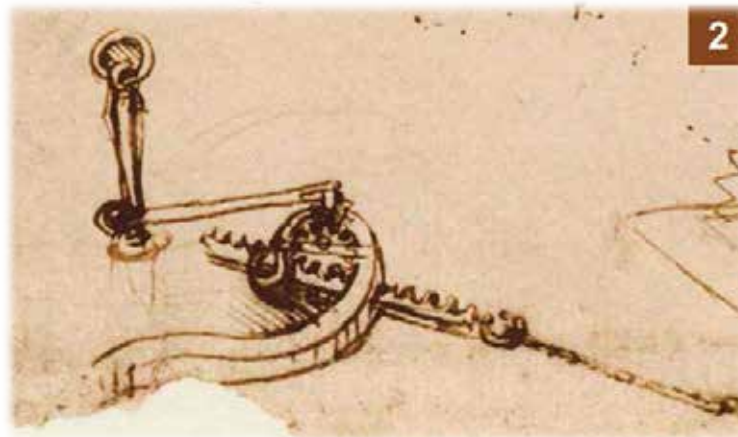


Figura 9.40: Recuadro 2. Mecanismo auxiliar.
Biblioteca Ambrosiana (Milán). *Códice Atlántico*. f. 812 r (detalle).

Leonardo propone una nueva solución a la ilustrada en el recuadro 1, añadiendo una pequeña caja que contiene el mecanismo y que se conecta por un lado a la ballesta y por otro lado al brazo curvo derecho del automóvil. El sistema de enganche del mecanismo auxiliar debería aplicarse en el brazo derecho pero en sentido contrario. Es por ello que se pueda intercambiar el diseño por otro que sea totalmente simétrico.

Una hipótesis que podría barajarse en la mente de Leonardo es que dicho mecanismo auxiliar pudiera representar el estudio de un freno programable. Si se excluye la parte superior izquierda de la imagen, el sistema podría utilizarse para mantener la tensión en el brazo curvo derecho, de esta forma se dificulta la rotación del pétalo de la rueda de excéntricas que hay montada sobre la rueda horizontal. Cuanto más apretado más se impide la rotación de la rueda horizontal hasta tal punto que la fuerza motriz transmitida por los muelle-motores no pueda superar el obstáculo, haciendo que el automóvil se detenga.

Se ha comprobado sobre prototipos reales que dicho mecanismo no puede funcionar como un programador de la detención. El automóvil se detiene de inmediato, o procede a vibrar durante unos pocos metros.



Figura 9.41: El modelo digital superpuesto. El diseño del recuadro 2 coincide perfectamente con él.

9.4.6. Recuadro 3: Freno.

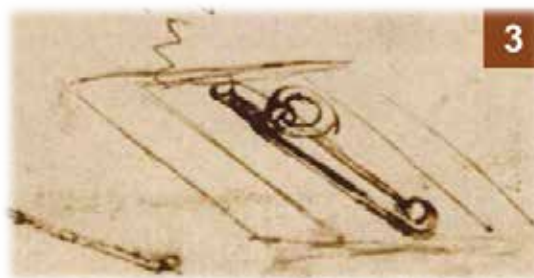


Figura 9.42: Recuadro 3. Freno. Biblioteca Ambrosiana (Milán). Códice Atlántico. f. 812 r (detalle).

Una vez que los dos muelles motores comienzan a liberar su energía, es necesario un mecanismo para detener el automóvil, de lo contrario se pondría en marcha automáticamente. Al colocar un bloque de madera justo en la posición central donde engranan los dientes de las dos ruedas horizontales se impide el giro de las mismas producido por la transmisión de la potencia generada en los dos tambores por los muelles motores en espiral. Se puede confirmar en el diseño de Leonardo en el recuadro 3, un bloque de madera con una anilla para tirar de él con una cuerda.

Este accesorio tan importante, que hasta ahora nadie había descifrado su función, no está presente en el diseño del recuadro B, que debería ser visible con claridad. Leonardo, por lo tanto, lo ideó en una fecha posterior. Probablemente, el mecanismo estaba ubicado en el listón central del travesaño de madera que se observa en la parte superior y central del chasis. Una vez cargado los muelles-motores el freno ubicado entre las dos ruedas horizontales impide su rotación. La anilla sirve, casi con toda seguridad, para conectarse a un cable. De esta manera el automóvil se puede controlar a distancia a partir de un operador que realizando un pequeño tirón a la cuerda desbloquea las ruedas horizontales y de esta forma permite el movimiento del automóvil. En algunos festivales cortesanos, este mecanismo tendría la finalidad de hacer que el automóvil empezara de repente a moverse "por arte de magia", sin ningún tipo de acción aparente.

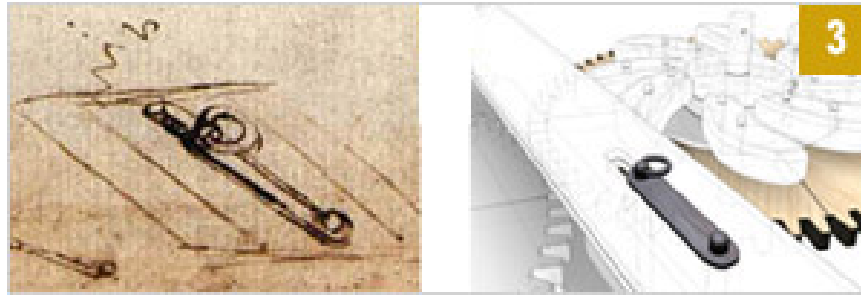


Figura 9.43: El modelo virtual ofrece una interpretación al boceto diseñado por Leonardo. No se observan los dientes de la rueda horizontal pero sí el anillo de ataque de la cuerda y soporte al bloque de madera.



Figura 9.44: El soporte con el freno implementado.
Fuente: web L'Automobile



Figura 9.45: La cuerda fijada a la anilla del soporte sirve para desbloquear el freno e iniciar el movimiento del automóvil. Fuente: web L'Automobile

9.4.7. Recuadro 4: Eje de rotación de los brazos curvos.



Figura 9.46: Recuadro 4. Eje de rotación y brazos curvos.
Biblioteca Ambrosiana (Milán). Códice Atlántico. f. 812 r (detalle)

En el dibujo de del recuadro nº 4 Leonardo ha profundizado el problema del eje central de rotación de los dos brazos curvos que se pueden observar en la parte superior del automóvil en el diseño en planta del recuadro B. Se sugiere aquí la hipótesis de realizar una sección transversal sustituyendo un simple eje por otro más complejo de forma hexagonal. El problema al que se enfrenta aquí Leonardo es hacer movimientos independientes de los dos brazos curvos que se cruzan. En el modelo digital (ver el gráfico inferior) la solución adoptada es la más fácil que ya se deja entrever en el diseño del recuadro B: el brazo derecho que controla la dirección está sujeto solidariamente con el eje central que controla la rueda de dirección mientras que el otro brazo tiene un agujero con holgura por donde pasa el eje central de dirección y por tanto puede girar con libertad.

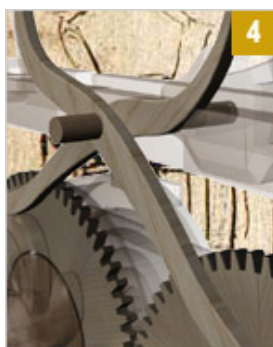


Figura 9.47: El modelo digital se superpone perfectamente con el diseño del recuadro B. Fuente: web L'Automobile

9.4.8. Recuadro 5: Pétalo de la rueda de levas que controla la dirección.



Figura 9.48: Recuadro 5. Pétalo de la rueda de levas.
Biblioteca Ambrosiana (Milán). Códice Atlántico. f. 812 r (detalle)

En el recuadro nº 5 parece entreverse lo que parece el perfil de una leva en forma de pétalo. En el lado izquierdo del dibujo se aprecia el agujero para fijar el apriete con el eje de la rueda de levas para fijarlo sobre la rueda horizontal. Leonardo había previsto sólo un eje porque el pétalo está conectado en el centro de la rueda. En el modelo virtual se ha tenido en cuenta un segundo eje para conseguir una mayor estabilidad.

El pequeño diseño también podría ser una de los 6 dientes de las ruedas angulares representadas en el diseño del recuadro B.

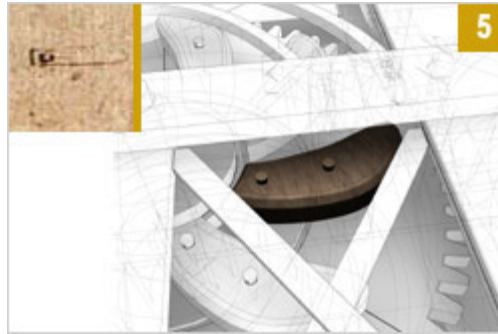


Figura 9.49: En el recuadro 5 se observó sólo un eje de fijación de las levas. En el modelo virtual aparece fijo con dos ejes para conferirle mayor estabilidad. Fuente: web L'Automobile

9.4.9. Recuadro 6: Tensor auxiliar.



Figura 9.50: Recuadro 6. Tensor auxiliar.
Biblioteca Ambrosiana (Milán). *Códice Atlántico*. f. 812 r (detalle)

El boceto representa probablemente el tensor que está ubicado en la terminación de uno de los resortes de retorno de las dos ballestas, para ayudar a aumentar la resistencia a la presión ejercida por los pétalos de la rueda sobre los brazos curvos, ubicados éstos últimos en las ruedas de las excéntricas sobre una de las ruedas dentadas horizontales.

El dispositivo podría corregir la "relajación" de la tensión producida en los muelles de retorno de las ballestas como consecuencia de un uso prolongado, el restablecimiento de la fuerza original se consigue precisamente gracias a un tensor auxiliar.

9.4.10. Recuadro 7: Boceto del eje.



Figura 9.51: Recuadro 7. Boceto del eje de rotación.
Biblioteca Ambrosiana (Milán). *Códice Atlántico*. f. 812 r (detalle)

Este pequeño boceto probablemente representa de una forma esquemática el eje de rotación descrito con mayor detalle en el recuadro nº 4. La cifra "X" se interpreta como la intersección de los dos brazos curvos visto desde arriba, mientras que el brazo horizontal se representa el agujero pasante por donde atraviesa el eje de rotación.

9.5 Modelo digital 3D.

9.5.1. Introducción.

Una vez analizado pormenorizadamente todos los componentes que intervienen en el gobierno del “automóvil” del Leonardo, estamos capacitados para empezar a diseñar un modelo virtual tridimensional que refleje lo más fielmente posible su estructura y su funcionamiento.

Para ello hemos usado programas de Diseño Asistido por Ordenador como pueden ser el AutoCAD y el 3dstudioMAX . Sobre todo éste último para conseguir un mayor realismo del modelo virtual consiguiendo sorprendentes puntos de vistas con una gran calidad. El objetivo final es que el modelo sea lo más explícito posible y que no haya dudas sobre su comportamiento.

9.5.2. Vistas.

9.5.2.1. Vistas principales.

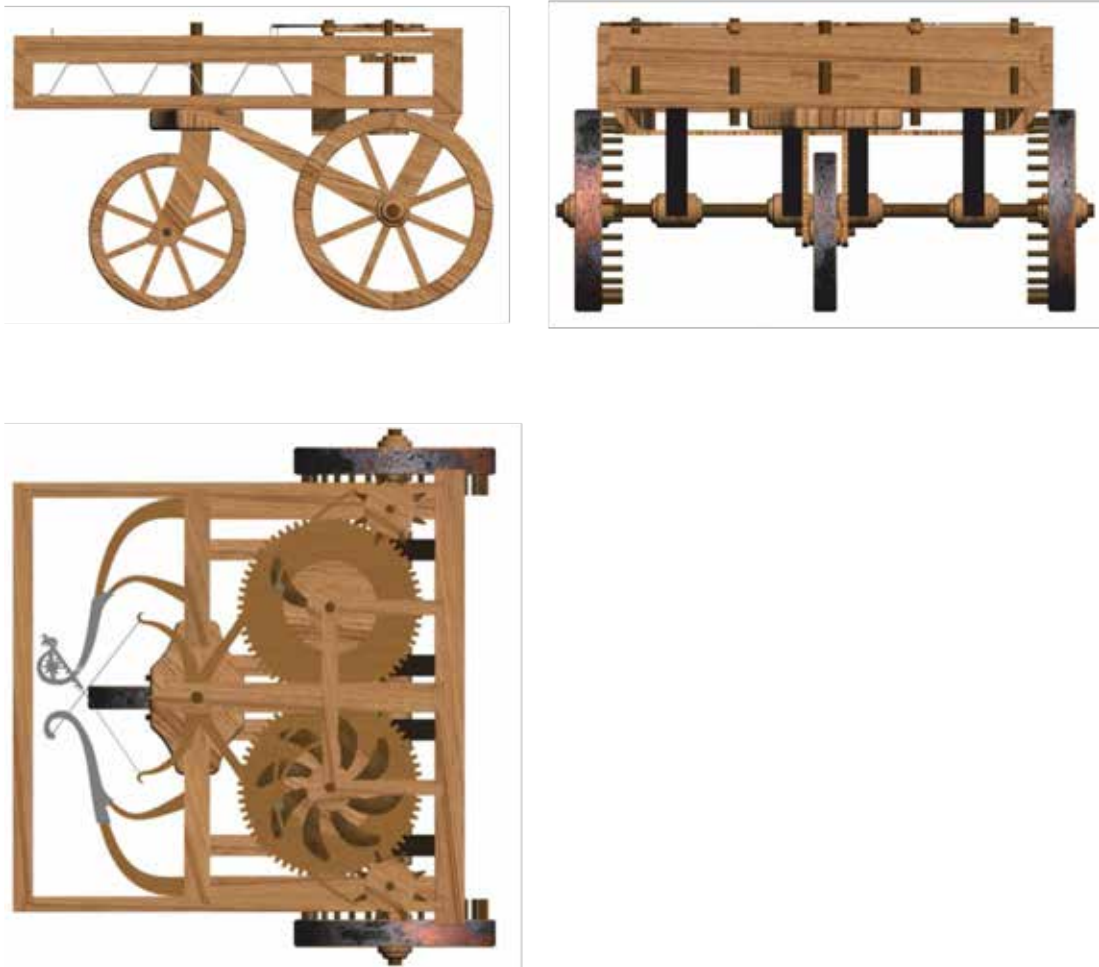


Figura 9.52: Vistas principales del automóvil.

Imagen de síntesis. Image generada por ordenador (3dsmax2015). Fuente: elaboración propia.

9.5.2.2. En perspectiva.

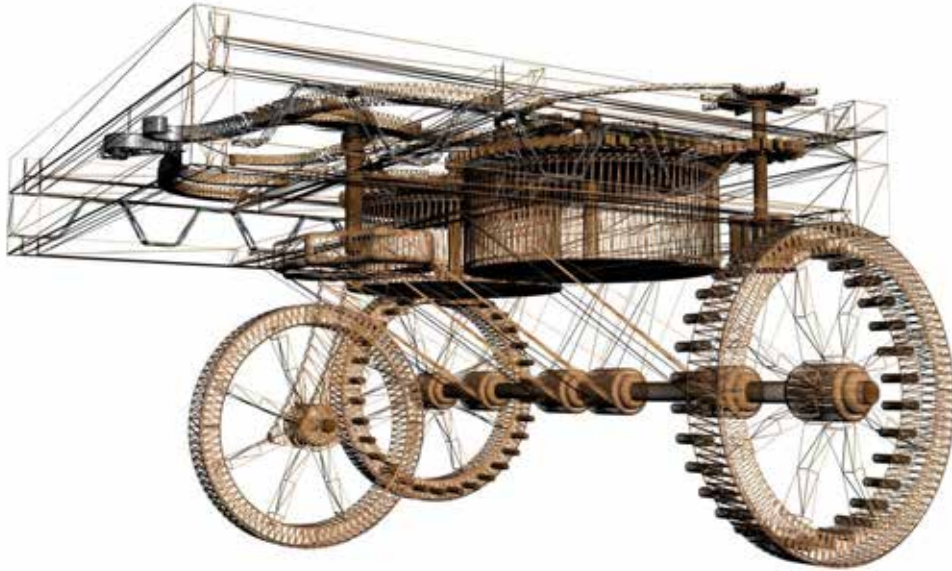


Figura 9.53: Vista en perspectiva del automóvil. Modelo alámbrico.
Imagen de síntesis. Imagen generada por ordenador (3dsmax2015). Fuente: elaboración propia.

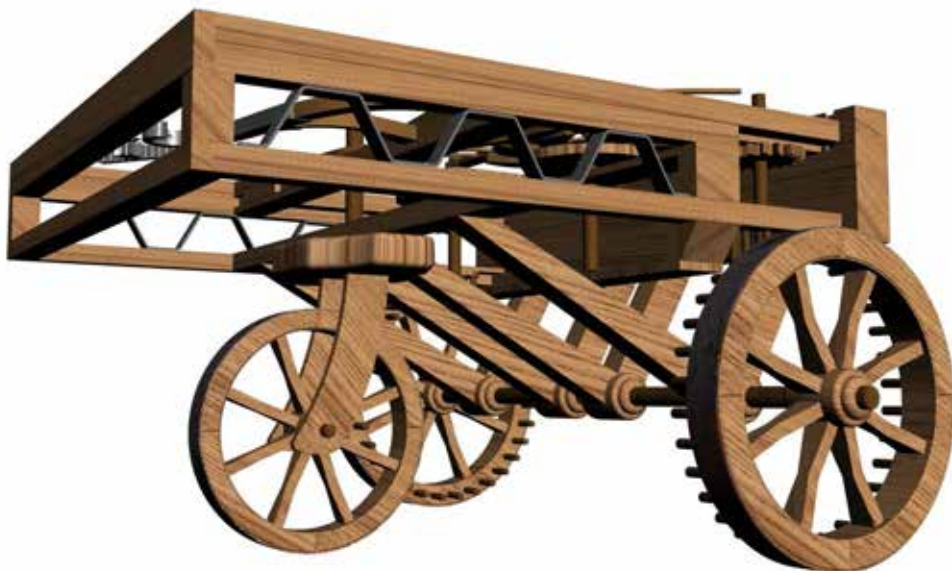


Figura 9.54: Vista en perspectiva del automóvil. Modelo realista..
Imagen de síntesis. Imagen generada por ordenador (3dsmax2015). Fuente: elaboración propia.

9.5.2.3. Vista explosionada.

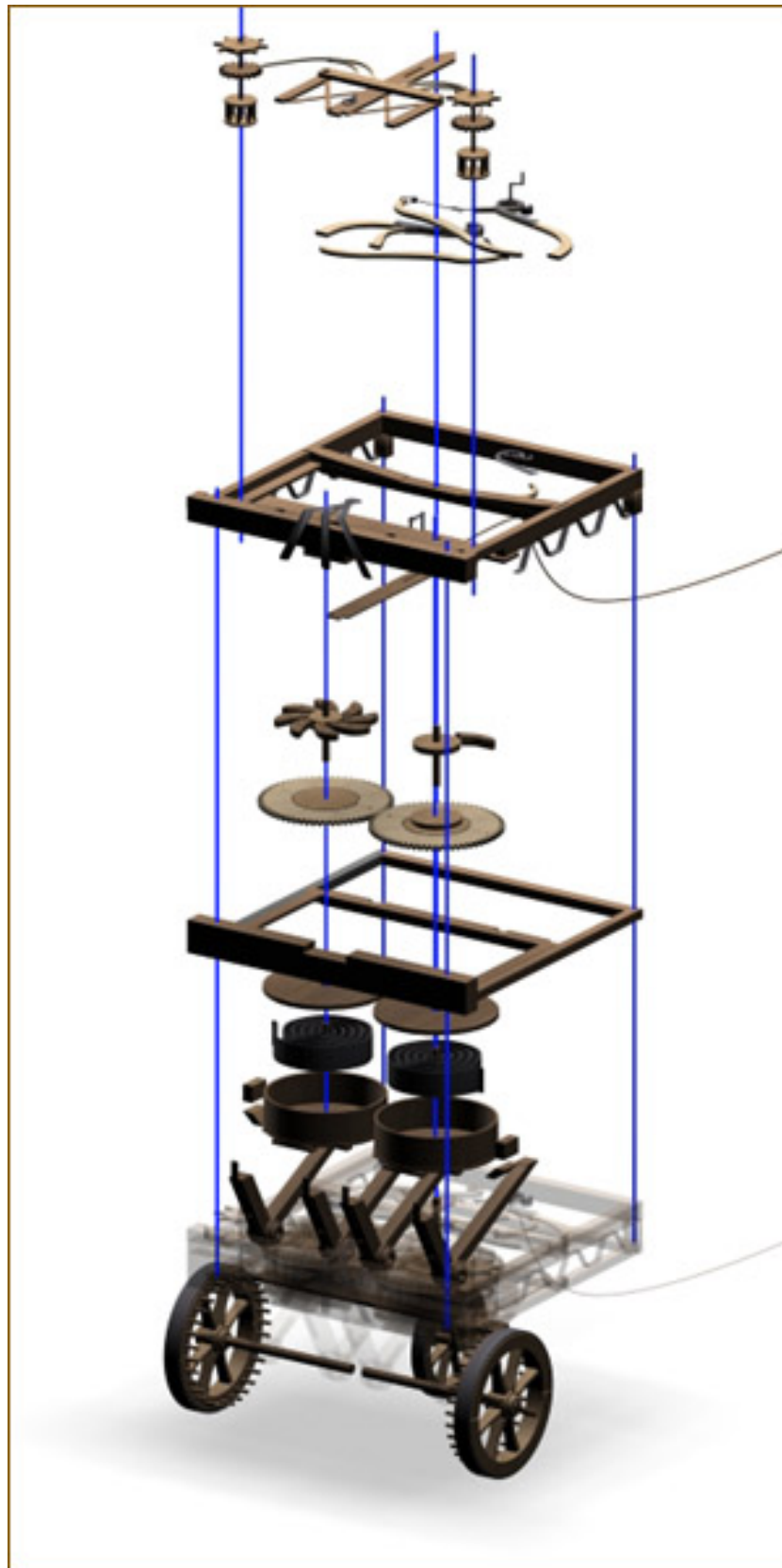


Figura 9.55: Vista explosionada del conjunto.

Imagen de síntesis. Imagen generada por ordenador (3dsmax2015). Fuente: web L'Automobile.

9.5.2.4. Vistas por componentes.

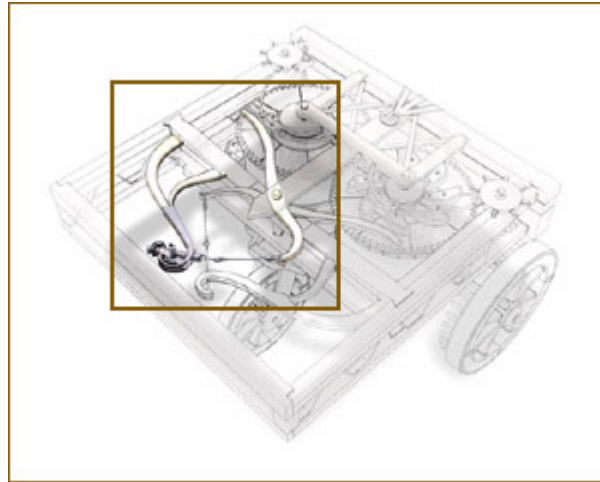


Figura 9.56: Ballestas.
Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

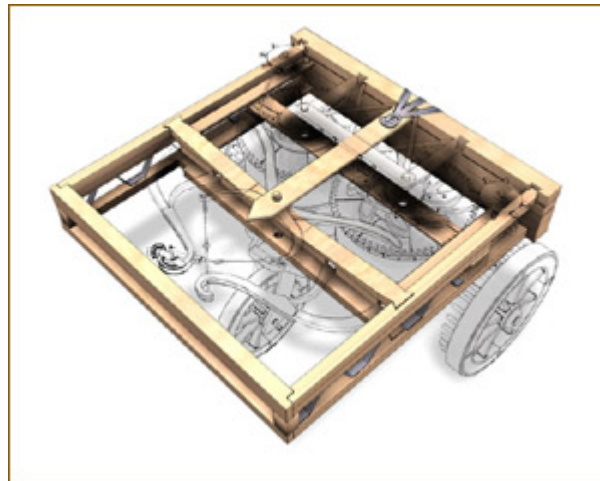


Figura 9.57: Chasis.
Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.



Figura 9.58: Dirección.
Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

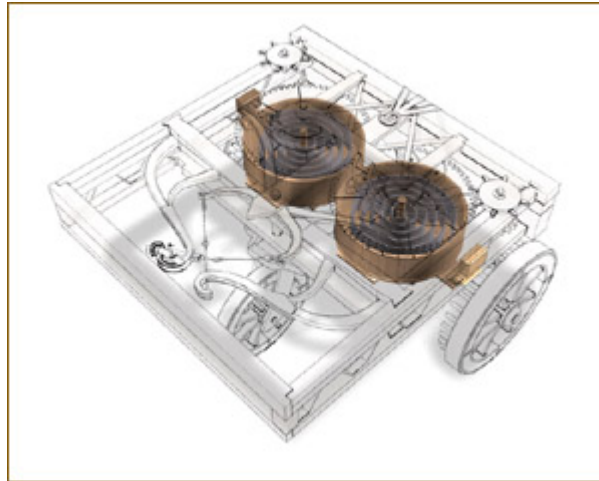


Figura 9.59: Motor.

Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

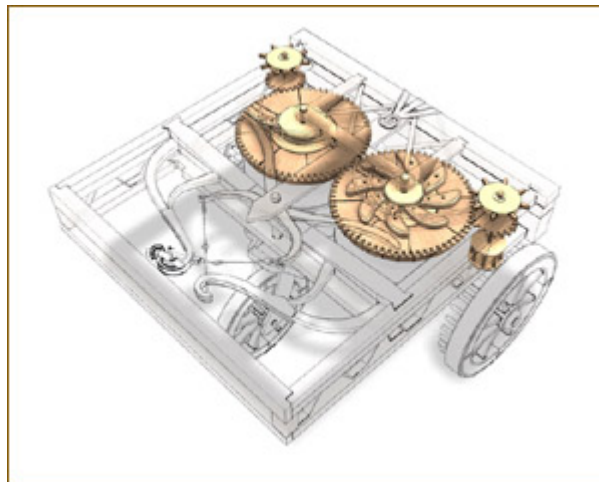


Figura 9.60: Transmisión.

Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

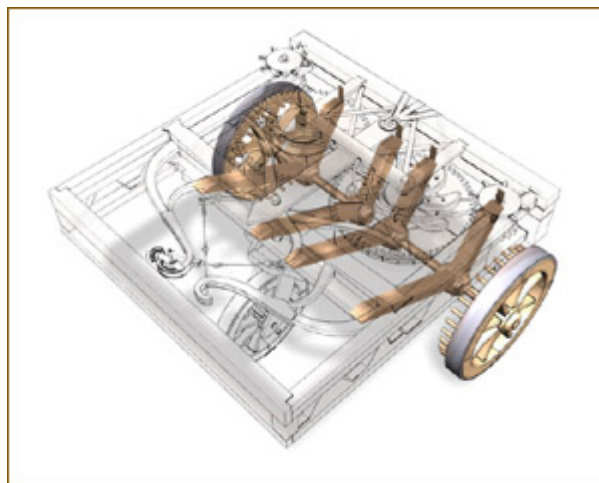


Figura 9.61: Ejes y ruedas.

Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

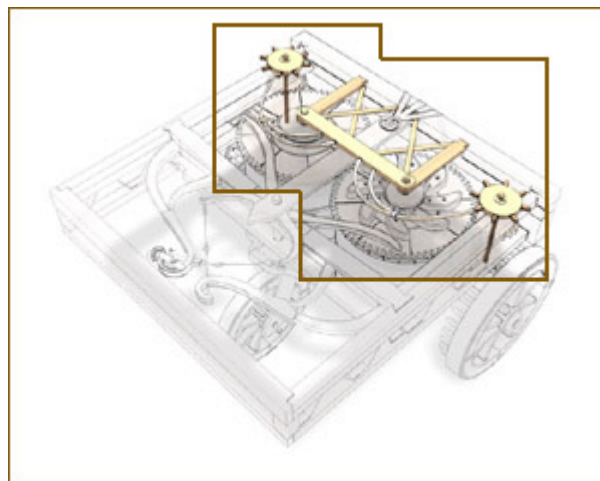


Figura 9.62: Mecanismo de escape.
Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

9.5.3.1. Motor de muelles.

Los dos grandes muelles en espiral, dispuestos bajo las ruedas dentadas horizontales, suministran la fuerza motriz. Los muelles, en cerrados en un tambor de madera, se cargan en dirección inversa. Leonardo ha recurrido a menudo a sistemas de propulsión por muelle, sobre todo para mecanismos de relojería.



Figura 9.63: Los muelles en espiral, dispuestos bajo el carro, se cargan en direcciones opuestas, tal y como se indican con las flechas azules.
Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

9.5.3.2. Ruedas dentadas horizontales.

Los dos muelles motores liberan la energía acumulada haciendo girar en sentido inverso las ruedas dentadas horizontales a las que están directamente unidos. Las dos ruedas están emparejadas y transmiten la energía acumulada a los otros mecanismos del carro. Su conexión directa excluye la posibilidad de que Leonardo hubiese concebido un mecanismo diferencial. Para la propulsión del carro habría sido suficiente un solo muelle. Sin embargo, los dos muelles ofrecen una solución más elegante y simétrica; además, su energía se suma.



Figura 9.64: La energía liberada por los muelles hace girar las ruedas dentadas en la dirección horizontal indicada por las flechas rojas.
Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

9.5.3.3. Sistema de transmisión angular.

Las dos ruedas dentadas horizontales giran en sentido opuesto y hacen girar a dos engranajes más pequeños dispuestos en posición angular. Estos engranajes son los encargados de transmitir la potencia a las ruedas y a su vez hacen girar al mismo tiempo los engranajes del sistema de escape.

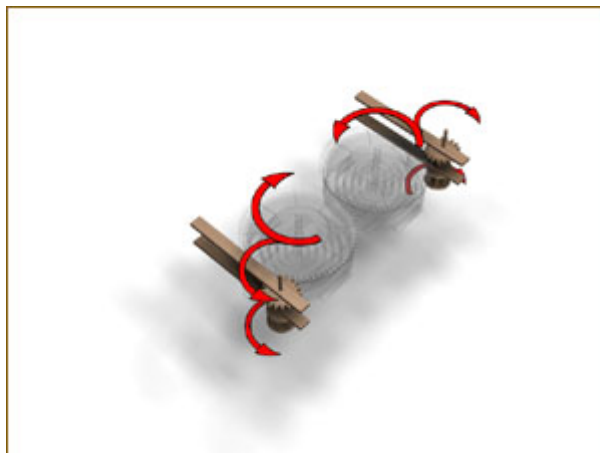


Figura 9.65: Las dos grandes ruedas horizontales son las encargadas de hacer girar las pequeñas ruedas angulares que simultáneamente transmiten la potencia a las ruedas y controla el sistema de escape
Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

9.5.3.4. Transmisión de la potencia a las ruedas.

La transmisión se lleva a cabo por el contacto directo entre los dientes de las ruedas horizontales y los pequeños engranajes laterales haciéndolos girar. Estos pequeños engranajes laterales están unidos solidariamente con un pequeño eje que transmite el movimiento de rotación a otros engranajes tipo jaula. Este elemento inferior del sistema es el encargado de dirigir la fuerza motriz a las ruedas estando en contacto directo con los dientes de la corona interna de la rueda. Las ruedas tienen ejes independientes.

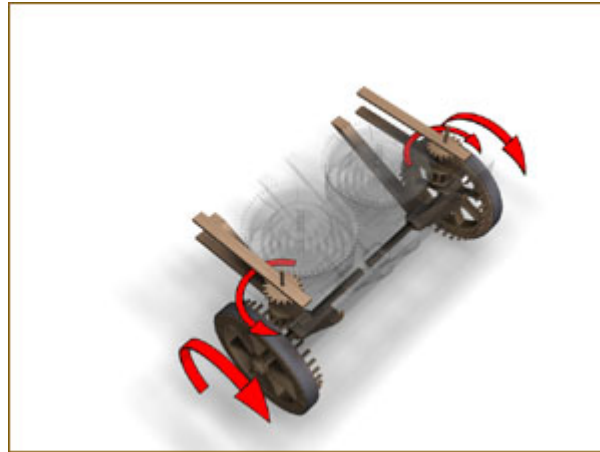


Figura 9.66: De las grandes ruedas horizontales a las pequeñas ruedas angulares y de ahí a los engranajes inferiores tipo jaula que hacen girar las ruedas en el sentido indicado por las flechas rojas. Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

9.5.3.5. Mecanismo de escape.

Los dispositivos angulares del carro, aparte de transmitir el movimiento a las ruedas, accionan el par de resortes de ballesta de la parte superior del carro. Al girar las espigas de las dos pequeñas ruedas angulares empujan rítmicamente los extremos de los resortes de ballesta. El dispositivo angular del lado izquierdo representa un sistema de escape del tipo de los empleados en los relojes. El sistema sirve para regular el impulso de los muelles motores. Leonardo es consciente de que la liberación de energía de un muelle no es constante. Para evitar un arranque de golpe, seguido de una brusca desaceleración, dota al carro de un escape que garantiza una distribución uniforme de la potencia, marcada por el rítmico clac sonoro del impacto de las espigas con los extremos de los resortes de ballesta.

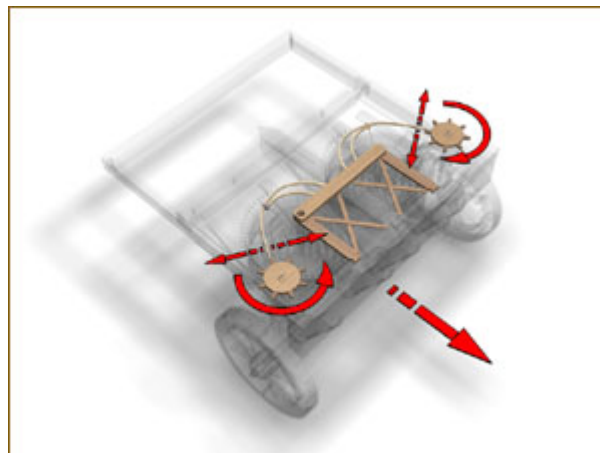


Figura 9.67: El dispositivo de transmisión en el lado izquierdo del vagón impulsa a un refinado sistema de escape para normalizar la liberación de la fuerza motriz de los muelles. Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

9.5.3.6. Rueda de pétalos (levas).

El sistema de transmisión descrito en el apartado anterior permite al carro desplazarse en línea recta, manteniendo al mismo tiempo una velocidad relativamente constante, hasta que se libera por completo la energía almacenada en los muelles-motores. En el dibujo en planta B se pueden observar unos objetos en formas de pétalos fijados en la parte superior de la superficie horizontal de dos grandes ruedas dentadas. Estos pétalos son excéntricos que desempeñan un papel clave en la planificación de la circulación (rueda horizontal izquierda) y

para la producción de efectos especiales (rueda horizontal derecha). Se puede observar en el dibujo que hay ocho excéntricas en forma de pétalo sobre la rueda horizontal izquierda. El número y la ubicación de los pétalos se puede variar. La rueda de excéntricas está fijada solidariamente a la rueda horizontal por un perno que hace de eje central, de esta forma giran al mismo tiempo que la rueda horizontal izquierda (sentido indicado por la flecha roja). Los pétalos golpean y hacen avanzar uno de los extremos del brazo curvo (flecha verde) anclado centralmente en la parte superior del chasis. El otro extremo de la pluma se convierte en un pequeño movimiento hacia adentro (flechas azules).

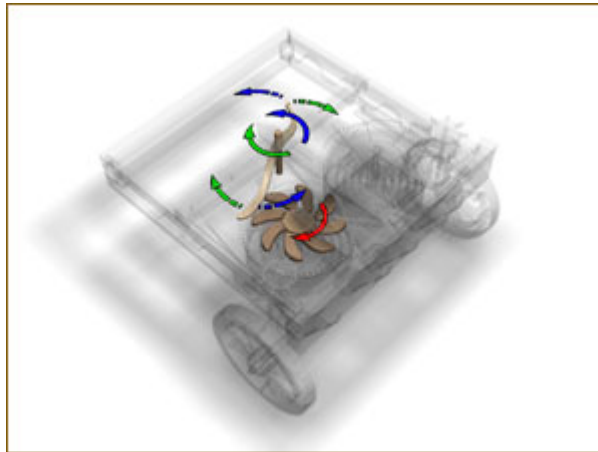


Figura 9.68: El movimiento rotativo de la rueda de levav que gira simultáneamente con el engranaje horizontal izquierdo hace que los pétalos golpeen a un brazo curvo de madera (centrado sobre el chasis) produciendo en éste un movimiento alternativo (flechas azules y verdes).

Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

El otro extremo del brazo curvo está conectado mediante un cable al final de un tensor de ballesta funcionando como un muelle de retorno. Cada vez que el brazo curvo es golpeado con un pétalo de la rueda de excéntricas, dicho brazo gira en sentido horario alrededor de un eje central (flecha verde). Justo cuando cesa el contacto entre cada pétalo y el brazo curvo, éste vuelve a su posición original obligado por el muelle de retorno del tensor (flecha roja). El impacto sucesivo de los pétalos reactiva continuamente el giro del brazo y el tensor de retorno (acción indicada por la flecha roja). Como se desprende del boceto B de la planta del carro, Leonardo ha previsto la posibilidad de ajustar la fuerza del tensor de retorno mediante un tornillo y un perno.

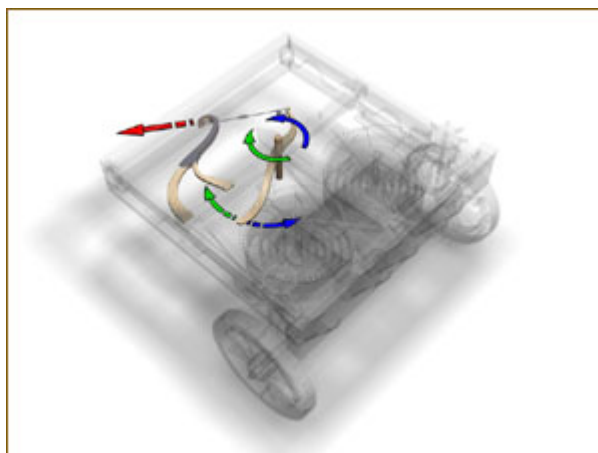


Figura 9.69: Cada pétalo de la rueda de levav golpea el extremo de un brazo curvo de madera (flecha verde), mientras que el tensor de retorno (flecha roja) lo hace volver a su posición original.

Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

9.5.3.7. Dirección programable.

El resultado de la acción conjunta entre los pétalos de la rueda de excéntricas y su golpeo continuo con el extremo del brazo curvo hace que éste oscile a derecha e izquierda respecto del eje central donde está anclado el brazo curvo sobre el chasis (flechas verde y azul), la frecuencia de oscilación depende del número y posición de los pétalos de la rueda de excéntricas. El perno o eje central donde se ubica el brazo curvo está conectado a una rueda trasera cuya misión es decidir la dirección o posible trayectoria a seguir por el carro. El pequeño ritmo de rotación del perno provocado por la acción de los pétalos al golpear el brazo curvo obligan al carro a cambiar de dirección. La suma de las “micro-direcciones” determina la trayectoria final. Si la rueda dentada horizontal izquierda no tiene implementado ningún pétalo sobre la rueda de levas significa que la dirección que tendrá el carro será rectilínea. Se podría decir entonces que la rueda trasera actúa como timón o volante del carro.

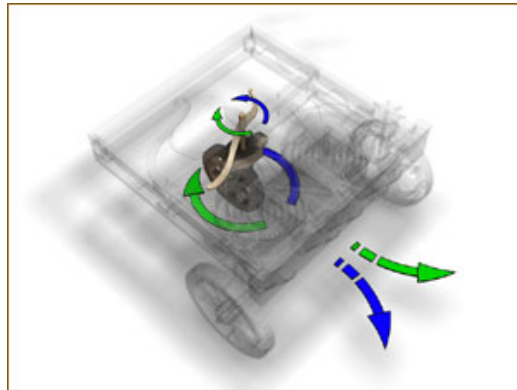


Figura 9.70: La continua rotación del perno central causada por el movimiento oscilatorio del brazo curvo al ser golpeado rítmicamente por cada uno de los pétalos de la rueda de levas se transmite a la rueda trasera (timón) determinando de esta forma la trayectoria del automóvil.

Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

Los pétalos de la rueda de excéntricas fijada sobre la rueda horizontal izquierda rigen el movimiento de la dirección del carro, la trayectoria del vagón por la tanto es programable en relación con el número y la ubicación de los pétalos.

La siguiente figura ilustra tres de las posibles trayectorias del carro:

- Trayectoria recta (flecha verde)
- Una pequeña curva apenas acentuada (flecha azul)
- Una curva muy pronunciada (flecha roja)

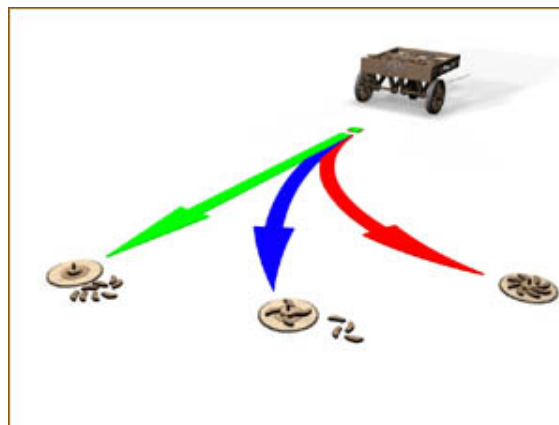


Figura 9.71: Posibles trayectorias del automóvil.

Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

Trayectoria rectilínea:

Eliminando completamente los pétalos de la rueda de excéntricas se evita que golpeen la extremidad del brazo curvo que gobierna el perno o eje central de dirección consiguiendo de esta forma que no oscile y por tanto forzando que la dirección del carro sea rectilínea.

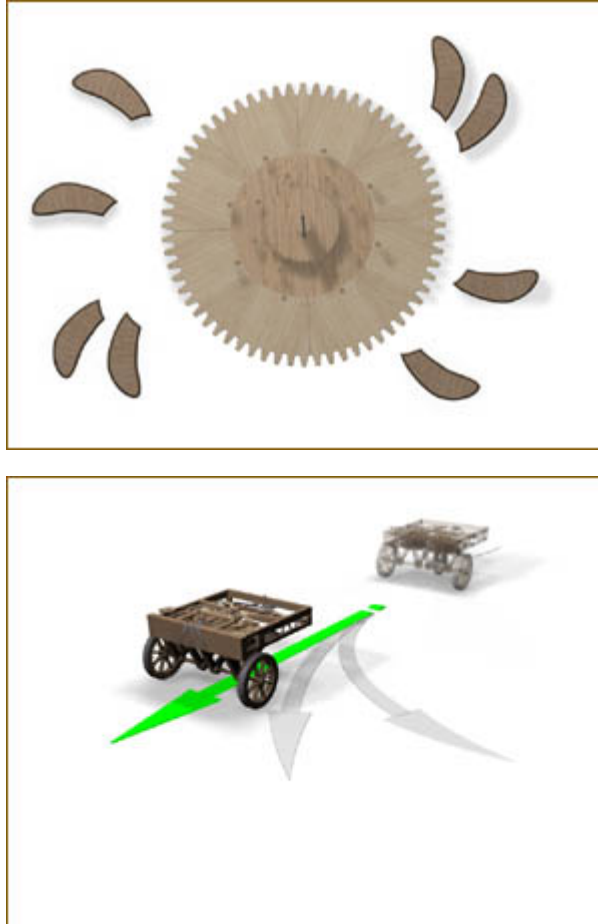


Figura 9.72: Si sobre la rueda horizontal izquierda no va dispuesto ningún pétalo en la rueda de levas el carro procede a moverse a lo largo de una línea recta. Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

Curva apenas acentuada:

Implementando ahora un pequeño número de pétalos sobre la rueda de excéntricas fijada sobre la rueda horizontal izquierda, el dispositivo que controla la dirección sufre, por cada vuelta de la rueda, tantos pequeños golpes como pétalos haya instalados. La suma de estos pequeños cambios de dirección determinan una trayectoria muy compleja (micro curva en zig-zag) que será tanto más pronunciada cuanto mayor sea el número de pétalos.

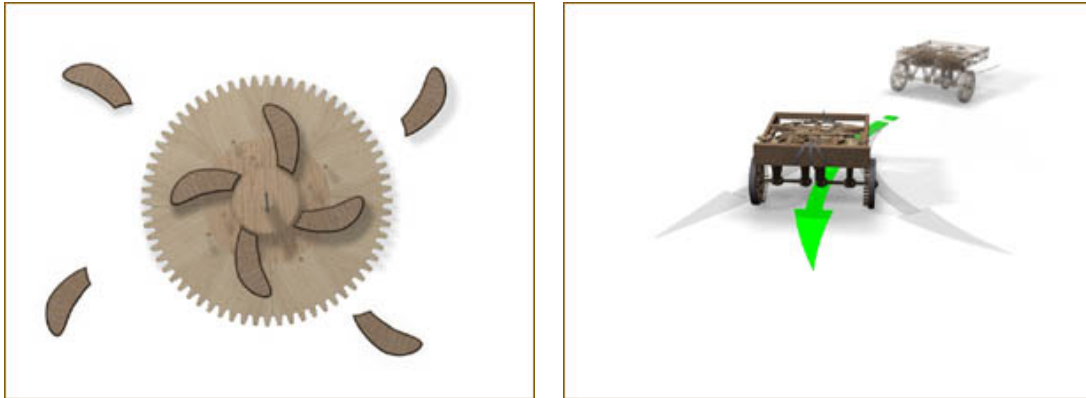


Figura 9.73: Sobre la rueda de levas situada sobre la rueda horizontal izquierda se observa cómo se han fijado tan sólo cuatro pétalos. El automóvil procede a moverse ligeramente siguiendo una trayectoria curvilínea poco acentuada.
Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

Curva muy pronunciada:

Montando ahora los ocho pétalos sobre la rueda de excéntricas conseguimos crear un golpeo continuo, manteniendo el mecanismo que regula la dirección bajo una presión constante por lo que el carro se ve obligado a moverse a lo largo de una curva mucho más pronunciada.

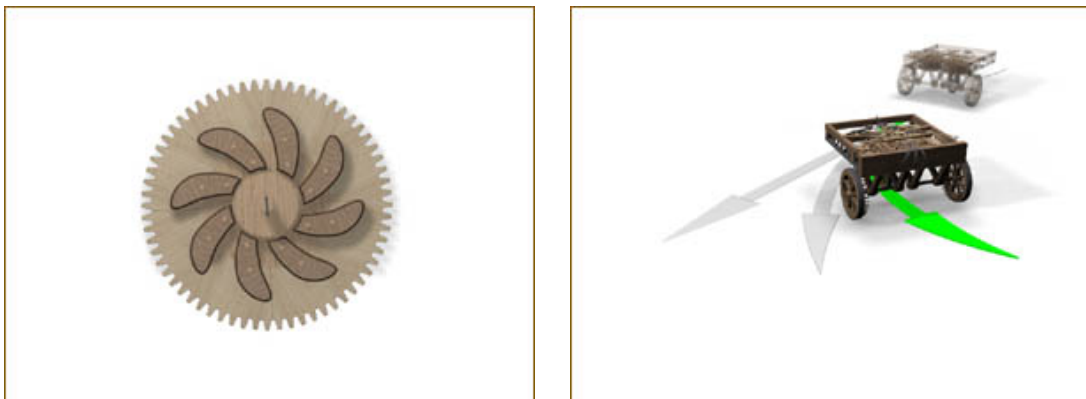


Figura 9.74: Sobre la rueda de levas situada sobre la rueda horizontal izquierda se observa ahora cómo se han fijado los ocho pétalos. El automóvil se mueve ahora siguiendo una curva más pronunciada que en el caso anterior.
Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

9.5.3.8. Mecanismo auxiliar.

El mismo sistema de pétalos que hay montado sobre la rueda excéntrica de la rueda izquierda que genera el movimiento alternativo del brazo curvo izquierdo es el que Leonardo reproduce especularmente sobre la rueda dentada horizontal derecha. Esta vez, sin embargo, el movimiento de giro no es solidario con el pivote central de dirección. En este caso el eje de dirección actúa como eje pasante del brazo curvo derecho. Cada vez que el pétalo de la rueda excéntrica derecha golpea el extremo del brazo curvo derecho este gira en sentido marcado por la flecha azul. Debido al mecanismo auxiliar que mantiene en tensión al brazo curvo por el otro extremo, hace que éste vuelva a recuperar su posición inicial (flecha verde).

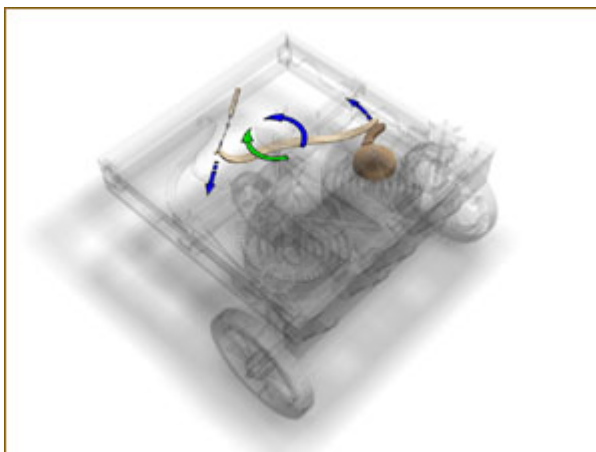


Figura 9.75: El pétalo situado sobre la rueda dentada horizontal derecha golpea al brazo curvo derecho. El muelle de retorno le obliga a regresar a su posición inicial. Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

Los dibujos de los recuadros 1 y 2 son dos versiones diferentes de este sistema auxiliar. En ambos casos, genera un movimiento alternativo donde la frecuencia depende del número y ubicación de las levas. Un solo pétalo (como en la imagen inferior) produce una oscilación del brazo curvo derecho por cada giro de la rueda dentada horizontal. El sistema podría funcionar, por ejemplo, debido al aleteo rítmico de la ballesta fijada en la parte izquierda del chasis del carro. Resumiendo se puede afirmar que el mecanismo auxiliar mantiene en tensión el muelle de retorno de la segunda ballesta con el extremo del segundo brazo curvo derecho. Este brazo de madera tensado como una ballesta presiona el pétalo que está situado sobre la rueda excéntrica derecha dispuesta simétricamente situada sobre el tambor derecho. Se controla de esta forma la velocidad y el tiempo de descarga de la fuerza liberada por el muelle motor.

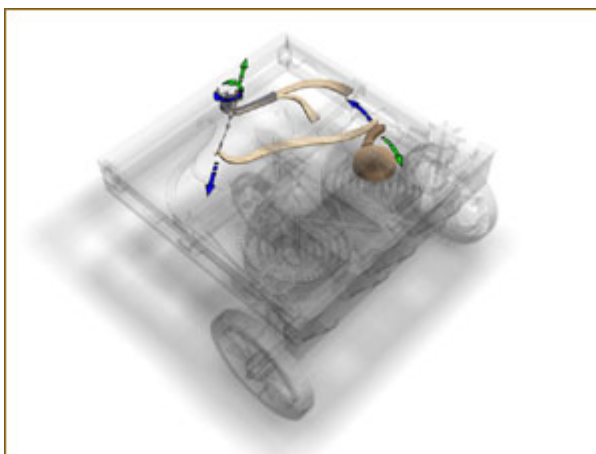


Figura 9.76: El sistema auxiliar en el lado derecho del automóvil mantiene un movimiento oscilante en el brazo curvo derecho controlando la velocidad y el tiempo de descarga de la potencia del muelle-motor. Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

9.5.3.9. Freno a distancia.

Un pequeño dibujo presenta un dispositivo esencial para el funcionamiento del carro: el freno de mano por control remoto. Éste consta de un listón, probablemente de madera, que puede deslizarse a lo largo de una abrazadera en el sentido indicado por la flecha verde. El listón es ensamblado entre los dientes coincidentes de las dos ruedas horizontales. De ese modo, una vez que los muelles motores han sido cargados, se impide a las ruedas horizontales que empiecen a girar; por consiguiente, el carro permanece inmóvil. En la anilla situada sobre

la abrazadera puede ser aplicada una cuerda. Al tirar de ella, las ruedas horizontales se desbloquean y el carro empieza a moverse.

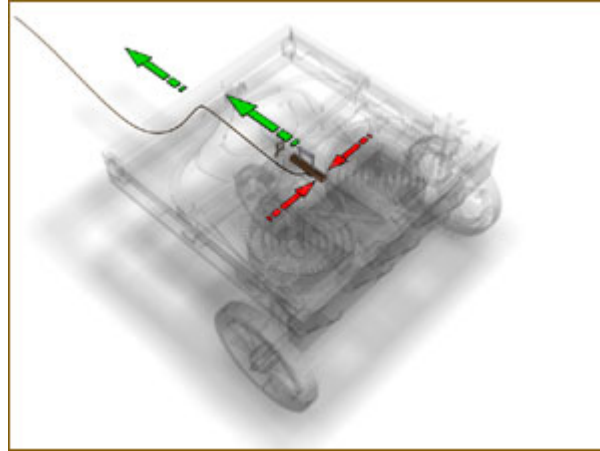


Figura 9.77: En la figura finalmente se observa cómo se incorpora un freno a distancia (mediante una cuerda) consistente en una pieza de madera que se interpone entre las dos ruedas dentadas horizontales impidiendo la transmisión de potencia a las ruedas. Tirando de la cuerda se liberarían las ruedas y el carro comenzaría a moverse.

Imagen de síntesis. Fuente: web L'Automobile.

Capítulo 10

CONCLUSIONES

10.1. Conclusiones generales.

Tal y como hemos comentado en la introducción del capítulo 3 de la presente tesis, siendo realistas y pragmáticos analizar pormenorizadamente y en su totalidad, la obra manuscrita de Leonardo, desde un punto de vista ingenieril sobrepasa con creces el contenido de cualquier tesis doctoral. Hay mucho material bibliográfico publicado sobre la cuestión, en muchos idiomas diferentes, principalmente en italiano y en inglés; y muy poco publicado en español, lo que dificulta enormemente su estudio. No obstante como primera conclusión si creemos que con las aportaciones descritas en la presente tesis doctoral, comentando y recopilando lo esencial de las investigaciones y escritos de refutados especialistas leonardistas, podemos tener una visión más fiable sobre el legado ingenieril que Leonardo nos mostró en sus manuscritos.

En el estudio de las bases científicas del capítulo 3, descritas y dispersas por Leonardo a lo largo de sus manuscritos, hemos hablado acerca de una docena de sus descubrimientos y anticipaciones de principios abstractos de la mecánica que estaban adelantados siglos para su época. Hemos citado su comprensión del movimiento relativo, su comprensión intuitiva de la conservación de energía, y su énfasis en los principios de la conservación en general; su anticipación en la ley de la disipación de la energía (la segunda ley de la termodinámica), y su asociación en procesos irreversibles con una magnitud física del tiempo; su yuxtaposición de la interacción entre gravedad e inercia en el vaivén de un péndulo con una interacción similar en la trayectoria de una piedra lanzada con un arco; sus experimentos con un plano inclinado para estudiar la aceleración de la gravedad y con chorros de agua para estudiar las trayectorias balísticas; su descubrimiento del principio conocido hoy en día como la tercera ley de Newton del movimiento, y su anticipación intuitiva de principio de Fermat; y, por último pero no menos importante, su cálculo del centro de masa del tetraedro por razonamientos de simetría.

Leonardo comprendió y utilizó el auténtico método experimental un siglo antes de que Francis Bacon filosofase sobre él, y antes de que Galileo lo pusiese en práctica. Leonardo no escribió tratados metodológicos, pero en sus cuadernos de apuntes nos dejó esparcidas sus ideas. Dice que las matemáticas, la geometría y la aritmética, pueden llegar a la certeza absoluta dentro de su propio ámbito, pues manejan conceptos mentales ideales de valor universal. En cambio, la verdadera ciencia (refiriéndose a las ciencias empíricas), se basa en la observación; si pudiera aplicarse a ella el razonamiento matemático podría lograrse mayor grado de certeza, siendo hoy en día, uno de los pasos fundamentales del método científico. *"No hay certeza en la ciencia si no se puede aplicar una de las ciencias matemáticas"*.

En sus apuntes, Leonardo dejó constancia de la importancia que concede al método en la investigación (adelantándose a autores de la Modernidad tales como Descartes) y los preceptos que establece en su método en nada difieren de las modernas definiciones que hoy utilizamos para hablar del método científico.

La comparación realizada entre Leonardo y la mecánica de Galileo en el capítulo 3 ha sido muy esclarecedora, porque realizaron experimentos similares, se enfrentaron con problemas conceptuales similares, y utilizaron un lenguaje matemático similar, indicando las reglas que descubrieron en términos de proporciones y leyes geométricas en lugar de ecuaciones algebraicas. La obra cumbre de Galileo marca una especie de punto conceptual intermedio entre él y las primeras especulaciones de Leonardo y la publicación de *Principia* de Isaac Newton (Principios) en 1687. Gran obra de Newton, en la que se utiliza la notación algebraica y su cálculo recién inventado, fue la culminación triunfante de la nueva "ciencia del movimiento."

Lo que hizo que Leonardo fuera único como ingeniero, fue que muchos de los nuevos diseños que presentó en sus manuscritos incluían avances tecnológicos que no se desarrollarían hasta varios siglos después. Aún más importante, él era el único entre los famosos ingenieros renacentistas que hicieron la transición desde la ingeniería a la ciencia. Entender cómo algo funcionaba no era suficiente para él; también necesitaba saber por qué. Por lo tanto fue parte importante en un proceso inevitable que puso en marcha para llevar la tecnología y la ingeniería hacia la ciencia pura.

En definitiva se pone de manifiesto que Leonardo poseía unos conocimientos científicos que estaban muy por encima del legado aristotélico y arquimediano que imbuía toda su época, y que estos conocimientos sustentaban toda su base creativa y por tanto como segunda conclusión pensamos que independientemente de que la mayoría de las invenciones que realizó Leonardo no se hubieran materializado, no hay comparación posible con la capacidad gráfico-descriptiva e ingenieril de los contemporáneos de Leonardo, que parecen "medievales" con respecto a los dibujos del maestro, que todavía hoy son irreprochables, en muchos de sus manuscritos y que si Leonardo los hubiese terminado y los hubiese impreso, habría dado tal impulso al desarrollo de la mecánica como para hacer que se adelantase al menos un siglo.

Pero desafortunadamente nada del "Leonardo científico" fue publicado ni adecuadamente estudiado hasta finales del siglo XIX. De hecho, Leonardo no completó ningún libro destinado al público, ni se preocupó por imprimirlos. Es verdad que este desafortunado hecho se puede llegar a explicar por la propia naturaleza de "su método científico", por la gran variedad y complejidad de los temas entremezclados en cada uno de sus folios, lo que hemos descrito como "caos compositivo", por su forma particular de escritura especular que impedía su legibilidad y por la propia dispersión de sus escritos tras su muerte. Entre los caóticos manuscritos de Leonardo hay honrosas excepciones, entre ellas el Códice de Madrid I. Sus dibujos, por el contrario, son extremadamente claros y completos, y contienen estudios sobre los conceptos en los que se basa toda la mecánica moderna, es decir, las máquinas simples.

Estudiosos de la ciencia y de la tecnología como Bertrand Gille en su famoso libro de *Los ingenieros del Renacimiento* escribió que: "...aunque se puede detectar en Da Vinci un cierto esfuerzo de reflexión sobre los mecanismos que rigen el funcionamiento de varias máquinas de la época, su estudio del armamento, por ejemplo, es inexistente, y como sus compañeros de la época entonces escultores, pintores, constructores, Leonardo se interesaba más en la fortificación militar y prefería dedicar un número importante de sus trabajos al sistema hidráulico de las obras públicas. Pero, en estas áreas, tampoco resultó ser un descubridor...". Gille también llegó a contar que: "...Leonardo es dotado de una curiosidad inmensa que desgraciadamente lo lleva a dispersarse, lo cual le impide especializarse en ciertos sectores, y por ende, a erigir los pilares de una investigación metódica. Además, Bertrand Gille indica que, aun si Leonardo Da Vinci lega un número amplio de dibujos a la posteridad, su aporte a nivel de innovaciones técnicas fue mínimo, dado que no brindaba soluciones prácticas viables, pero quedaba de una manera u otra fijado en el espíritu de su tiempo orientado hacia el análisis y la reproducción literal de los dibujos anteriores."

Por último Gille resaltó que “..sin embargo, no se puede denigrar al florentino, puesto que su deseo de observación y el de usar ciertas nociones de cálculo en la elaboración de máquinas que dibujó, pone a este último entre los precursores de los ingenieros modernos”.

Por otra parte, GeogeBasalla en su libro “La evolución de la tecnología” escribió: “Muchos de estos artefactos son imposibles tal como se presentan, y pocos, si acaso alguno, influyeron en el ulterior desarrollo tecnológico....sus logros técnicos, que a menudo se representan erróneamente, merecen elogio por su verdadero valor; no como conjunto de proyectos de nuevas máquinas, o como profecías exactas de la forma de la tecnología del futuro, sino como exploraciones maravillosamente imaginativas y originales del potencial inherente de este empeño.”

Comentarios como los resaltados en los párrafos precedentes son los que tienen parte de culpa en que nos hayamos decidido a realizar la presente tesis. Precisamente para comprobar de primera mano la veracidad de tales afirmaciones.

Una vez finalizada la tesis, estamos en disposición de concluir que no estamos de acuerdo con Gille ni con Basalla en menosvalorar la capacidad de conocimientos científicos y técnicos de Leonardo. Por todo lo argumentado en los párrafos precedentes, creemos que queda sobradamente demostrada la capacidad de Leonardo de diseñar y crear máquinas y artilugios que no solamente eran muy originales, sino que sí estaban de acuerdo y se regían por principios y leyes científicas, en muchos de los casos adelantados a su época. Y creemos que el principal y primer objetivo de la investigación sobre Leonardo que nos marcamos al comienzo de la tesis de reivindicar su figura como uno de los grandes ingenieros de todas las Historias la hemos puesto de manifiesto “*ser o no ser...ingeniero...esa es la cuestión*”.

En los capítulos de Leonardo: Ingeniero Militar, Mecánico, Hidráulico, Civil y Aeronáutico nos hemos dedicado a recopilar y comentar una reducida selección de ingenios y máquinas, dispersas por sus manuscritos, que nos ayudaran a comprender mejor su utilidad y su funcionamiento, independientemente de que se hubieran llevado a cabo en su época. Creemos que en dichos capítulos dejamos reforzado todavía más la figura de Leonardo como ingeniero.

En el capítulo 5 de Ingeniería Mecánica, después de realizar un análisis y clasificación de todos los mecanismos que Leonardo diseñó dispersos entre sus manuscritos, subrayar que no sólo se limitó a crear o esbozar artilugios o máquinas, más o menos impresionantes o llamativas, sino que se dedicó a profundizar, a estudiar y a comprender todos los elementos simples que gobiernan las máquinas. Como conclusión, constatar que los dibujos de máquinas y mecanismos de Leonardo perseguían un objetivo evidente, proporcionar una representación precisa y absolutamente clara de la estructura y funcionamiento de mecanismos extraordinariamente complejos, recurriendo a una serie de recursos gráficos (vistas en planta y en alzado, vistas en transparencia, vistas de los componentes, simulación de las cadenas cinemáticas, empleo del claroscuro para subrayar las superficies de contacto, esquematización de las líneas de fuerza, etc.) que nadie antes había concebido orgánicamente.

Investigar y elaborar un modelo tridimensional en 3D del famoso automóvil de Leonardo, folio 812 recto del Códice Atlántico, era otro de los objetivos que nos habíamos marcado al principio de la tesis.

Una vez concluida la investigación y realizado el modelo tridimensional podemos concluir la enorme dificultad que existe en muchos casos a la hora de acometer el estudio de los manuscritos vincianos. Si el folio 812 recto del Códice Atlántico ha generado especulaciones y escritos sobre su viabilidad, su funcionamiento y su utilidad durante más de cien años, y tan sólo muy recientemente se ha demostrado su verdadera condición, hay que pensar en un equipo multidisciplinar de especialistas para acometer cualquier estudio sobre Leonardo. Especialistas leonardistas, técnicos, científicos, lingüistas e historiadores de la

ciencia y de la técnica que puedan acometer con éxito cualquier estudio científico serio que se centre en la figura de Leonardo.

Como conclusión constatar la validez de las nuevas herramientas informáticas en generación y animación de modelos tridimensionales para ayudar a reconstruir infográficamente, comprender, analizar y explicar los órganos complejos de los elementos que gobiernan cualquier máquina que físicamente no existe y tan sólo se encuentra esbozada en unos manuscritos incomprensibles para la gran mayoría del público. Dicha validez se pone de manifiesto cuando el modelo tridimensional trasciende, y de una forma clara y sencilla, se puede explicar aquello que permanecía oculto.

Para concluir la Real Academia Española define la ingeniería como **“el conjunto de conocimientos que permite aplicar el saber científico a la utilización de los materiales y de las fuentes de energía mediante invenciones o construcciones útiles para el hombre”**.

Sin duda, como conclusión final, Leonardo merece ser digno de atribuirse tal definición.

10.2. Futuras líneas de investigación.

Seguir profundizando en la obra de Leonardo da Vinci. Creando nuevos modelos tridimensionales que nos ayuden a comprender mejor sus diseños. Creando un grupo de investigación multidisciplinar que pueda analizarlos desde múltiples puntos de vista.

Hacer extensivos los estudios no sólo a Leonardo, sino a los principales ingenieros de la historia tanto españoles como extranjeros, que nos permitan comprender y divulgar sus logros de una forma visual y con un lenguaje técnico serio, claro y riguroso.

Aprovechando todo el trabajo realizado de recopilación y análisis de información de todo lo relacionado con la ingeniería de Leonardo, en una base de datos. Seguir con la actualización de la base de datos y hacerla pública en una página web que permita a los investigadores que comienzan a estudiar la figura de Leonardo, ser un punto de partida y de encuentro.

Aprovechar el trabajo realizado en la identificación y clasificación de los mecanismos y máquinas de Leonardo y compararlas con otros ingenieros de la época como Taccola, Francesco di Giorgio o Giovanni Fontana entre otros.

Seguir con los estudios de *“arqueología vinciana”*, terminando de completar todas la facetas ingenieriles que trató Leonardo:

- Leonardo INGENIERO TOPÓGRAFO
- Leonardo INGENIERO DE LA EDIFICACIÓN

Apéndice A

Leonardo da Vinci

BIBLIOGRAFÍA

El placer más noble es el júbilo de comprender
(Leonardo da Vinci)

LIBROS

ANTOCCIA, Luca. CHASTEL, André. CIANCHI, Marco. LAURENZA, Domenico. GALUZI, Paolo. PAPA, Rodolfo. PEDRETTI, Carlo. “*Atlas Ilustrado de: LEONARDO DA VINCI, arte y ciencia y las máquinas*”. Florencia, Milán: Giunti Editore S.p.A. SUSAETA ediciones S.A., para la edición española. 2000.

BECK Th. Beck, “*Leonardo da Vinci (1452 bis 1519)*, in «Zeitschrift des Vereines utschler Ingenieure»”, Berlin 1906, pp. 524-531, 562-569, 645-651, 777-784.

BERTOLONI-MELI, Domenico. “*Thinking with Objects: The Transformation of Mechanics in the Seventeenth Century*”. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2006.

CAPRA; Fritjof. “*The Science of Leonardo*”. New York: Doubleday, 2007.

CIANCHI, Marco, LAURENZA, Domenico, PEDRETTI, Carlo. “*Atlas Ilustrado de: LEONARDO, anatomía, el vuelo y las máquinas*”. Florencia, Milán: Giunti Editore S.p.A. SUSAETA ediciones S.A., para la edición española. 2000.

——— CIANCHI, Marco. “*Leonardo. Anatomía*”.

——— LAURENZA, Domenico. “*Leonardo. El vuelo*”.

——— PEDRETTI, Carlo. “*Leonardo. Las máquinas*”.

CLAGETT, Marshall. “*Leonardo da Vinci: Mechanics.*” En *Leonardo’s Science and Technology*, edited by Claire Farago, pp. 1-20. New York: Garland Publishing, 1999.

GILLE, Bertrand. “*Les Ingénierus de la Renaissance*”. Broché. 1978

DIBNER, Bern. “*Leonardo: Prophet of Automation.*” En *Leonardo’s Legacy: An International Symposium*, editado por C. D. O’Malley, pp. 101–23. Berkeley & Los Angeles: University of California Press, 1969.

——— “*Machines and Weaponry.*” En *The Unknown Leonardo*, editado por Ladislao Reti, pp. 166–89. New York: McGraw-Hill, 1974.

FASSO, Constantino. “*Birth of Hydraulics During the Renaissance Period.*” En *Hydraulics and Hydraulic Research: A Historical Review*, editado por Günther Garbrecht, pp. 55–79. Boston: Balkema, 1987.

GALLUZZI, Paolo. “*Renaissance Engineers from Brunelleschi to Leonardo da Vinci*”. Florence: Giunti, 1996.

IRIONDO, A. “Leonardo da Vinci, el ingeniero”. Bilbao. Fundación Escuela de Ingenieros: 1997

KEELE, Kenneth D. “*Leonardo da Vinci’s Elements of the Science of Man*”. New York: Academic Press, 1983.

LAURENZA, Domenico. “*Moti di ‘consumazione’.*” In *La mente di Leonardo*, edited by Paolo Galluzzi, pp. 284–85. Exhibition catalogue. Florence: Giunti, 2006. LAURENZA, Domenico. TADDEI, Mario. ZANON, Edoardo. “*Atlas Ilustrado de: las máquinas de Leonardo*”. Giunte Editore S.p.A. Florencia, Milán: Giunti Editore S.p.A. SUSAETA ediciones S.A., para la edición española. 2000.

LEONARDO DA VINCI. “Cuadernos”. Edición de H. Anna Suh. Paragon Books Ltd, para la edición española. 2006.

LEONARDO DA VINCI. “*Il CODICE ATLANTICO della Biblioteca Ambrosiana di Milano*”. Presentación de Carlo Pedretti. Transcripción crítica Augusto Marinoni. Firenze: Giuni. 2000.

MACAGNO, Enzo. “*Mechanics of Fluids in the Madrid Codices.*” In *Leonardo e l’Età della Ragione*, edited by E. Belloni and P. Rossi, pp. 333–74. Milan: Scientia, 1982.

MOODY, Ernest A., CLAGETT, Marshall. “*The Medieval Science of Weights*”. Madison: University of Wisconsin Press, 1952.

NAVONI, Marco. “LEONARDO DA VINICI y los secretos del Códice Atlántico”. Barcelona: BLUME. 2012.

PEDRETTI, Carlo. “*Leonardo: The Machines*”. Florence: Giunti, 1999.

RETI, Ladislao. “*El Leonardo desconocido*” Madrid: Taurus. 1975.

——— “*Leonardo de Vinci. Códices de Madrid. Volumen 3. Estudio introductorio.*” TAURUS. 1974.

ROSHEIM, Mark E. “*L’automa programmabile di Leonardo*”. Vinci: Biblioteca Leonardiana. 2001

TADDEI, Mario. “*Atlas Ilustrado de: los robots de Leonardo da Vinci*”. Leonardo 3. SUSAETA ediciones S.A., para la edición española. 2000.

VV.AA. “El imaginario de Leonardo. Los códices de Madrid en la BNE”. Madrid: BNE. 2012

ZÖLLNER, Frank. “*Tomo I: Leonardo da Vinci. Obra pictórica completa. Tomo II: Esbozos y dibujos*” Köln, London, Los Ángeles, Madrid, Paris, Tokio: TASCHEN. 2004.

LIBROS WEB

BASALLA, George. “La evolución de la tecnología”. Barcelona: Crítica. 2011.
<http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiQndu7qtXKAhVCXBoKHUydDaYQFggcMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.fing.edu.uy%2Fcedras%2Fdisi%2Fctysociedad%2FLa%20evolucion%20de%20la%20tecnologia%20George%20Basalla%201.pdf&usq=AfQjCNGa4Zmz0e3PYAPMMVpDMPqJuwmrpg>
 Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

BELTRAMI, Luca. “*Il Codice Trivulziano di Leonardo da Vinci*”. Milano [U. Hoeple]: 1891.
<https://archive.org/details/ilcodicedileonar00leonuoft>
 Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

CAPRA, Fritjof. “*Learning from Leonardo*”. Berrett-Koehler Publishers, 2013
 A través de la biblioteca de la Universidad de Málaga, se necesita estar registrado. SAFARI books online.
http://0-proquestcombo.safaribooksonline.com.jabega.uma.es/book/math-and-science/9781609949891/leonardo-notebooks-facsimiles-and-transcriptions/ch12_leon_html
 Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015

PÉLADAN, Joséphin. “*Les manuscrits de Léonard de Vinci: les 14 manuscrits de l'Institut de France*”. Paris. Sansot: 1910.
<https://archive.org/details/lesmanuscritsdel00leonuoft>
 Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

DE ESPAÑA, José. “*Breviario. Leonardo da Vinci*”
<http://www.librosmaravillosos.com/breviario/index.html>
 Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

KEEKE, Kenneth D. “Leonardo da Vinci’s elements of science of man”. AP Academic Press: 1983. Acceso parcial al libro.
https://books.google.es/books?id=Hkm0BQAAQBAJ&pg=PA5&lpg=PA5&dq=kenneth+d+keele+leonardo+da+vinci&source=bl&ots=rOOXs2OHio&sig=_zcW9fzjfa6k9k64FsOUVC MxWGA&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiarvPLw8LKAhXHDxoKHUtpBSUQ6AEIbjAJ#v=onepage&q=kenneth%20d%20keele%20leonardo%20da%20vinci&f=false
 Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

LEONARDO DA VINCI. “Codex Madrid I”. 1493
http://ebooks.library.cornell.edu/k/kmoddl/toc_leonardo1.html
 Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015

MOON, Francis C. “*The Machines of Leonardo da Vinci and Franz Reuleaux*” Springer, 2007
 Se necesita estar registrado en la Universidad de Málaga.
<http://0-link.springer.com.jabega.uma.es/book/10.1007/978-1-4020-5599-7>
 Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015

REULEAX, F. “*The Kinematics of machinery*”. London. Alex. B. W. Kennedy, 1876
http://ebooks.library.cornell.edu/k/kmoddl/toc_reuleaux2.html
 Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015

PÁGINAS WEB

Arundel MS 263

Leonardo da Vinci, Notebook ('The Codex Arundel')

British Library

http://www.bl.uk/manuscripts/Viewer.aspx?ref=arundel_ms_263_f001r

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

Biblioteca de la Universidad de Málaga

Acceso al catálogo general, publicaciones periódicas, publicaciones digitales y bases de datos a través de la Biblioteca de la Universidad de Málaga. Se necesita acceso.

<http://jabega.uma.es/>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

BNE

Biblioteca Nacional de España

<http://www.bne.es/es/Inicio/index.html>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

DOCUMENTOS WEB originales sobre diferentes interpretaciones del automóvil de leonardo

pedretti_barbera.pdf

http://brunelleschi.imss.fi.it/automobile/pdf/pedretti_barbera.pdf

jotta_opuscolo.pdf

http://brunelleschi.imss.fi.it/automobile/pdf/jotta_opuscolo.pdf

canestrini_macchine.pdf

http://brunelleschi.imss.fi.it/automobile/pdf/canestrini_macchine.pdf

loria_ruota.pdf

http://brunelleschi.imss.fi.it/automobile/pdf/loria_ruota.pdf

marinoni_engineer.pdf

http://brunelleschi.imss.fi.it/automobile/pdf/marinoni_engineer.pdf

museo_vinci.pdf

http://brunelleschi.imss.fi.it/automobile/pdf/museo_vinci.pdf

pedretti_achademia.pdf

http://brunelleschi.imss.fi.it/automobile/pdf/pedretti_achademia.pdf

pedretti_macchine.pdf

http://brunelleschi.imss.fi.it/automobile/pdf/pedretti_macchine.pdf

e-Leo

Archivio digitale di storia della tecnica e della scienza. Biblioteca Leonardiana.

<http://www.leonardodigitale.com/>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015

En el archivo digital de la historia de la técnica y de la ciencia se pueden consultar los siguientes manuscritos originales de Leonardo digitalizados en alta resolución y con la transcripción de los textos en italiano tomadas de las correspondientes ediciones facsímiles que a continuación se detallan:

Códices de Madrid I y II

Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): ed. Mc Graw Hill Compay (New York), 1974.

(Propiedad del manuscrito original: Biblioteca Nacional de España, Madrid).

Códice Atlántico

Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Giunti Editore 1973-1975.

(Propiedad del manuscrito original: Biblioteca Ambrosiana di Milano).

Códice Atlantico

Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Milano, Hoepli, 1891 [i.e. 1894]-1904.

(Proprietà degli originali: Biblioteca Ambrosiana di Milano).

Codice Arundel

Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Roma, Danesi, 1923-1930.

(Propiedad del manuscrito original: British Museum di Londra).

Códice Leicester (antiguo Hammer)

Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Milano, Cogliati, 1909.

(Propiedad del manuscrito original: Collezione privata di Bill Gates).

Códice sobre el vuelo de los pájaros

Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1976.

(Propiedad del manuscrito original: Biblioteca Reale di Torino).

Códice Trivulziano

Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1980.

(Propiedad del manuscrito original: Biblioteca Trivulziana di Milano).

Códices Forster I-II-III

Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana):

Firenze, Giunti Barbèra, 1992.

(Propiedad del manuscrito original: Victoria and Albert Museum di Londra).

Diseños anatómicos

Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1980-1985.

(Propiedad del manuscrito original: Royal Library, Windsor).

Manuscritos de Francia, Mss. A-M

Manuscrito A: Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1990.

Manuscrito B: Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1990.

Manuscrito C: Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1986.

Manuscrito D: Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1989.

Manuscrito E: Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1989.

Manuscrito F: Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1988.

Manuscrito G: Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1989.

Manuscrito H: Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1987.

Manuscrito I: Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1987.

Manuscrito K: Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1989.

Manuscrito L: Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1987.

Manuscrito M: Edición facsímil utilizada para la digitalización (propiedad de la Biblioteca Leonardiana): Firenze, Giunti Barbèra, 1987.
(*Propiedad de los manuscritos originaesl: Bibliothèque del' Institut de France*).
Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

HAMMER CODEX. Leonardo da Vinci.

<http://hammercodex.com/index.php>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

Leonardo and the Engineers of the Renaissance

The machines, technical devices and constructions of Leonardo da Vinci, Brunelleschi and the Sienese engineers of the Renaissance. Museo galileo.

<http://brunelleschi.imss.fi.it/ingrin/index.html>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

Leonardo da Vinci

Victoria and Albert Museum

<http://www.vam.ac.uk/page/l/leonardo-da-vinci/>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

Leonardo da Vinci

Museo Nazionale Scienza e Tecnologia. Leonardo da Vinci

<http://www.museoscienza.org/leonardo/>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

Universal Leonardo

<http://www.universalleonardo.org/>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

Leonardo da Vinci: anatomical drawings from the Royal Library, Windsor Castle

Digital Collections. Thomas J. Watson Library, The Metropolitan Museum of Art. Exhibition of drawings from the Royal Library at Windsor, held January 20 - April 15, 1984 at the Metropolitan Museum of Art ; Catalog prepared by Kenneth Keele and Jane Roberts ; Bibliography: p. 167 ; Includes full-page illustrations ; Exhibition title: Leonardo da Vinci : anatomical drawings from the Royal Library, Windsor Castle.
<http://libmma.contentdm.oclc.org/cdm/compoundobject/collection/p15324coll10/id/84801/rec/2>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

Leonardo da Vinci y el pensamiento complejo

Página web de Edgar Morin. El Padre del Pensamiento Complejo.
<http://www.edgarmorin.org/aportaciones/436-160.html>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

Leonardo Interactivo

Acceso a los Códices de Madrid de Leonardo da Vinci de la Biblioteca Nacional de España.
<http://leonardo.bne.es>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

Leonardo da Vinci. Codex Madrid I.

Ein Projekt des Historischen Instituts der RWTH Aachen University.
<http://www.codex-madrid.rwth-aachen.de/madrid1/>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

Leonardo da Vinci his treatise on painting

Published by The Institute for Advanced Technology in the Humanities
 © 2012 Rector and Visitors of the University of Virginia: Author Francesca Fiorani
<http://www.treatiseonpainting.org/home.html>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

Leonardo3

www.leonardo3.net/

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

“L’automobile” di Leonardo da Vinci

Museo galileo. Istituto e Museo di Storia della Scienza
<http://brunelleschi.imss.fi.it/automobile/>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

MecanESO

©2005 CEJAROSU

<http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

Celso Javier Rocés Suárez. Diseño de una página web con los contenidos de Mecánica vistos en primer ciclo de ESO. Máquinas, operadores y mecanismo muy bien estructurado. (Tercer Premio a Materiales Educativo 2005).

Museo galileo

Istituto e Museo di Storia della Scienza
<http://brunelleschi.imss.fi.it>

Búsqueda realizada el 16 de noviembre de 2015.

ARTICULOS PUBLICADOS EN REVISTAS

GALLUZZI, Paolo. “*La extraña aventura de los manuscritos de Leonardo*” De EL CORREO DE LA UNESCO, octubre 1974 año XXVII.

GARCIA TAPIA, Nicolás. “*Ingeniería del agua en los códices de Leonardo y en los manuscritos españoles del siglo XVI*”
Revista Ingeniería del Agua. Universidad Politécnica de Valencia.
Publicado en el volumen 3, número 2 (junio 1996)

NARDINI, Bruno. “*LEONARDO DA VINCI contado a los niños*”. De EL CORREO DE LA UNESCO, octubre 1974 año XXVII.

TESIS DOCTORALES

CERVERA Bravo, Jaime. “*Cálculo de estructuras y resistencias de materiales. Origen y desarrollo histórico de los conceptos utilizados.*” 1982

HIDALGO G., David. “Leonardo da Vinci: arquitectura y urbanismo. El concepto de ciudad ideal”. Dpto. de Edificación y Urbanismo. EPS de Alicante. Universidad de Alicante. 2014.

SHAW Pooler, Richard. “*The lost manuscripts of Leonardo da Vinci*” University of South Africa. 2014

Apéndice B

Leonardo da Vinci BASE DE DATOS

*La belleza perece en la vida,
pero es inmortal en el arte
(Leonardo da Vinci)*

B.1. Introducción.

A lo largo de todo el periodo de investigación, en la fase de recopilación de datos, se ha creado una base de datos indexada, para ordenar, clasificar y manipular, toda la información contenida en los manuscritos referentes a temas de marcado carácter ingenieril. Con el fin de presentar los datos de una forma ordenada y temática, además de extraer conclusiones.

B.2. Correspondencias entre los Códices de Leonardo en temas de mecánica técnica.

B.2.1. Correspondencias en temas de mecánica técnica entre el Códice Atlántico y el Códice de Madrid I.

Código Atlántico (numeración actual)	Código Atlántico (numeración antigua)	Código Madrid I	Descripción
CA_0035r	Folio 0010r-a	CM1_0014r	Artificio para equilibrar muelles
CA_0077r	Folio 0027r-a	CM1_0156v	Balanzas (solo texto, can.)
		CM1_0157r	Balanzas (solo texto, can.)
		CM1_0170v	Pesos sobre la balanza (solo texto, can.)
CA_0077v	Folio 0027v-a	CM1_0112r	Engranaje epicicloidal (dibujos y texto, can.)
		CM1_0111v	Engranaje epicicloidal (dibujos y texto, can.)
		CM1_0018r	Leva cilíndrica
		CM1_0024r	Engranaje epicicloidal
		CM1_0036r	Cabrestante compuesto
		CM1_0026r	Gato de tornillo
CA_0078r	Folio 0027r-b	CM1_0018v	Resorte circular
		CM1_0053r	Instrumento para cortar barras (dibujos, can.)
		CM1_0053r	Fresa (dibujos, can.)
		CM1_0054v	Piedras trasladadas por un contrapeso
		CM1_0051r	Movimientos de la flecha y la ballesta (can.)
		CM1_0052r	Proporción entre los tiempos del movimiento y el derivado (can.)
		CM1_0053r	Proporción entre los movimientos de la ballesta y la flecha
		CM1_0050v	Forma óptima de las saetas

Apéndice B: Tablas BASE DE DATOS

		CM1_0052rr	Movimiento, peso y fuerza
		CM1_0051r	Ballesta cargada con 400 libras de peso
		CM1_0051r	Proporción entre los movimientos de la saeta y el ángulo formado por la cuerda de la ballesta
CA_0078v	Folio 0027v-b	CM1_0053v	Para estirar las telas
		CM1_0054r	Triángulos provistos de garfios
		CM1_0050r	Cerradura
		CM1_0050r	Llaves
		CM1_0053v	Listones cruzados
		CM1_0054r	Útil combinado de taladro con broca anular
		CM1_0053r	Proporción entre el movimiento primario y el derivado (can.)
		CM1_0052v	Fuerza y peso (can.)
		CM1_0054v	Movimiento de la flecha en relación con el peso que carga la ballesta (can.)
CA_0084v	Folio 0030v-b	CM1_0054r	Para estirar las telas
CA_0095r	Folio 0034v-b	CM1_0172r	Bisagras que se pliegan igualmente hacia atrás
CA_0174r	Folio 0061v-a	CM1_0005r	Teoría de las ruedas dentadas (can.)
		CM1_0005r	Se restan partes iguales de cuerpos que están entre sí en determinada proporción
		CM1_0032v	Varillas de conexión y leva en forma de S para telar automático
CA_0277r	Folio 0101r-b	CM1_0012v	Soportes para campanas
CA_0306v	Folio 0110v-b	CM1_0057v	Tornillos desunidos
		CM1_0058r	Tornillos invertidos (3 textos, can.)
		CM1_0147r	Curvas de balística
CA_0408v	Folio 0151v-b	CM1_0048r	Compuerta a inglete y sus armaduras metálicas
CA_0421v	Folio 0155v-b	CM1_0005r	Rueda y piñón
		CM1_0082r	Lista de temas que completa la del folio 82r del Códice de Madrid I
CA_0579r	Folio 0216v-b	CM1_0008r	Mecanismo de relojería con leva sinusoidal y péndulo
CA_0617r-b	Folio 0226v-c	CM1_0062r	Eje para un compás o para un carro
CA_0691r	Folio 0257r-a	CM1_0060v	Gravedad (6 textos, can.)
		CM1_0061v	Péndulo y rueda de escape; vírgula y paletas
		CM1_0133r	Tambor con la cuerda arrollada y contrapeso (texto can.)
		CM1_0133r	Ingenio del Carmino
		CM1_0132v	Percusión de dos bolas
		CM1_0132v	Piedra que cae en el agua
		CM1_0132v	Desgaste del soporte de un eje
CA_0720r	Folio 0266v	CM1_0023v	Para perforar el suelo
		CM1_0023v	Levas
CA_0721r	Folio 0267r-a	CM1_0019v	Tornillos cargados fuera del centro
CA_0721v	Folio 0267v-a	CM1_0029r	Instrumento elevador
CA_0768r CA_0769r CA_0770r CA_0771r CA_0772r	Folio 0283r	CM1_0172r	Bisagras que se pliegan en ambos sentidos, para pabellones

CA_0769v	Folio 0283v-c	CM1_0172r	Bisagras que se pliegan en ambos sentidos, para pabellones
CA_0778r	Folio 0286r-a	CM1_0147r	Rueda de movimiento continuo
CA_0799r	Folio 0293r-a	CM1_0047r	Detalles de una prensa con cuñas
CA_0818r	Folio 0298r-b	CM1_0172v	Viga sobre rodillo
		CM1_0043r	Para subir una viga
CA_0818v	Folio 0298v-b	CM1_0029r	Instrumento elevador
		CM1_0034r	Instrumento elevador mediante tornillos
		CM1_0043v	Instrumento elevador mediante un movimiento de balanceo
		CM1_0044r	Instrumento elevador mediante un movimiento de balanceo
CA_0830r-c	Folio 0304r-c	CM1_0124r	Trinquete de doble efecto
	Folio 0304v-d	CM1_0124r	Trinquete de doble efecto
CA_0830r-c	Folio 0304r-d	CM1_0151v	Molinos de Vigevano
CA_0830v-c	Folio 0304v-b	CM1_0151v	Molinos de Vigevano
CA_0830v-a	Folio 0304v-a	CM1_0098v	Cerraduras y resortes para las mismas
		CM1_0099v	Cerraduras y resortes para las mismas
CA_0867r	Folio 0315v-b	CM1_0053r	Cortador de barras
CA_0893r	Folio 0326r-b	CM1_0069v	Eje de carro en rodillos
CA_0985r	Folio 0356r-a	CM1_0032v	Telar automático
CA_0991v	Folio 0357r-d	CM1_0083v	Prensa para tablillas
CA_0993r	Folio 0357v-d	CM1_0100v	Ejes articulados (4 dibujos)
		CM1_0098r	Cerraduras
		CM1_0099v	Cerraduras
		CM1_0044v	Sistema de poleas
		CM1_0083r	Aproximadamente 24 dibujos pequeños que representan casos de los que se habla en la parte teórica, muy especialmente en el folio 83r del Códice de Madrid I
CA_1021r	Folio 0366r-a	CM1_0024r	Levas y movimientos epicicloidales
		CM1_0111v	Mecanismo epicicloidal (vista lateral y frontal, 8 figuras)
		CM1_0177v	Centro de gravedad (sólo texto)
		CM1_0177v	Carga de un soporte (sólo texto)
CA_1021r	Folio 0366r-b	CM1_0111v	Mecanismos epicicloidales
		CM1_0112r	Mecanismo epicicloidal (vista lateral y frontal, 5 figuras y texto)
		CM1_0033v	Modo de cargar un carro (3 figuras)
		CM1_0034v	Modo de cargar un carro
		CM1_0029r	Modo de levantar una columna
		CM1_0043v	Modo de levantar una viga
		CM1_0044r	Detalle de un instrumento elevador (2 figuras)
		CM1_0081v	Instrumento para arquear una viga
		CM1_0034r	Cric doble
CA_1021v	Folio 0366v-a	CM1_0048v	Rodamiento de rodillos
		CM1_0046v	Prensa con cuña
		CM1_0047r	Prensa con cuña (4 figuras)
		CM1_0049r	Mecanismo para cerrojo (6 figuras)
		CM1_0045v	Rueda de leva (texto can.)
		CM1_0059v	Cohete en dos tiempos (texto sólo)
		CM1_0081v	Cohete en dos tiempos (texto sólo)
CA_1021v	Folio 0366v-b	CM1_0080v	Leva articulada; detalles
CA_1038r	Folio 0372r-b	CM1_0014r	Instrumento igualador de resortes (3 dibujos)
		CM1_0015v	Engranaje cónico
		CM1_0016v	Resorte circular (5 dibujos)
		CM1_0019r	Engranaje globoidal
		CM1_0020v	Una sola rueda que mueve varios piñones (sólo texto)
CA_1049r	Folio 0376r-c	CM1_0069v	Eje de carro en rodillos
CA_1049v	Folio 0376v-c	CM1_0012v	Cojinete compuesto, antifricción
CA_1081v	Folio 0390v-b	CM1_0101v	Cojinete de bolas o rodillos y pivote cónico
CA_1086r	Folio 0392r-b	CM1_0012v	Cojinetes antifricción

		CM1_0066r	Eje sostenido por dos ruedas
CA_1090r CA_1089r CA_1091r	Folio 0393r	CM1_0036v	Máquina de hilar; detalles en el Códice de Madrid I
		CM1_0067v	Máquina de hilar; detalles en el Códice de Madrid I
		CM1_0068v	Máquina de hilar; detalles en el Códice de Madrid I
CA_1090v	Folio 0393v-a	CM1_0036v	Máquina de hilar; detalles en el Códice de Madrid I
		CM1_0067v	Máquina de hilar; detalles en el Códice de Madrid I
		CM1_0068v	Máquina de hilar; detalles en el Códice de Madrid I
CA_1106r	Folio 0397r-b	CM1_0035r	Cabria
		CM1_0011v	Engranaje parcial
		CM1_0009v	Dispositivo que se autodesengancha (2 dib.)
		CM1_0096r	Engranajes cónicos
		CM1_0010v	Mecanismo de la luna en relojería (3 dib.)
		CM1_0011r	Mecanismo de la luna en relojería (3 dib.)
		CM1_0011v	Mecanismo de relojería (12 dibujos)
		CM1_0011v	Vírgula con paletas articuladas
		CM1_0011r	Transmisión articulada
		CM1_0016v	Resorte circular
CA_1106v	Folio 0397v-b	CM1_0012r	Mecanismo de relojería (aprox. 18 dib.)
		CM1_0014v	Trefilado para resortes (2 dib.)
		CM1_0016v	Resorte circular (unos 6 dib.)
		CM1_0009v	Dispositivo que se autodesengancha
		CM1_0019r	Engranajes globoidales
CA_1111v	Folio 0399v-b	CM1_0010v	Reloj de Chiaravalle: engranaje concoidal y mecanismo de la luna
		CM1_0011r	Reloj de Chiaravalle: engranaje concoidal y mecanismo de la luna
		CM1_0011v	Reloj de Chiaravalle: eje en ejes

TABLA B.1: Listado de correspondencias de temas de mecánica práctica entre el Códice de Madrid I y el Códice Atlántico. Fuente: (RETI, 1974)

B.2.2. Correspondencias en temas de mecánica técnica entre el Manuscrito A de Francia y el Códice de Madrid I.

CORRESPONDENCIAS EN TEMAS DE MECÁNICA TÉCNICA ENTRE EL MANUSCRITO A DE FRANCIA Y EL CÓDICE DE MADRID I		
Ms. A	Códice Madrid I	Descripción
MsA_0001v	CM1_0190r	Palanca de un torno (cancelado)
	CM1_0190r	Rueda delgada en el medio (can.)
	CM1_0189v	Peso que cae
MsA_0002v	CM1_0189v	Peso sostenido en dos puntos (can.)
	CM1_0187r	Rueda que gira en un eje más delgado (can.)
MsA_0003v	CM1_0189v	Soportes unidos entre sí (can.)
MsA_0004r	CM1_0189v	Martillo que cae 100 veces (can.)
	CM1_0189r	Ballesta y flecha
	CM1_0189r	Movimiento que continúa elevándose hasta la mitad de su curso (can.)
	CM1_0189r	Martillo que se hinca en el plomo (can.)
	CM1_0188v	Martillo de 4 libras que cae desde una altura de 3 codos (can.)
MsA_0004v	CM1_0188v	Martillos de diferente anchura que caen sobre el plomo (can.)
	CM1_0188v	Caída de dos pesos iguales (can.)

	CM1_0188v	El golpe tiene menor efecto cuando la mano está más cerca del fulcro (can.)
	CM1_0188v	Movimiento de la tuerca (can.)
MsA_0005r	CM1_0188r	Del peso (figura)
	CM1_0188r	Del peso (figura)
MsA_0007r	CM1_0187r	Golpe seco que hace saltar una parte (can.)
MsA_0007v	CM1_0186v	Golpe dado en cuerpos que resuenan (can.)
MsA_0009r	CM1_0187r	Resistencia de cuerpos arrastrados (can.)
MsA_0019r	CM1_0186r	Ángulo de rebote
MsA_0021v	CM1_0186r	Cuerpo redondo sobre plano inclinado (can.)
MsA_0022r	CM1_0177r	Esfera perfecta sobre plano inclinado
	CM1_0186r	Ángulo de impacto del golpe (can.)
MsA_0026r	CM1_0185r	Golpe producido por dos movimientos opuestos (can.)
	CM1_0184r	Golpe de cuerpos desiguales (can.)
	CM1_0184r	Golpe de cuerpos iguales
MsA_0027r	CM1_0184r	El golpe es término del movimiento (can.)
	CM1_0184r	Cuerpo que percute y se queda en el lugar del impacto (can.)
MsA_0027v	CM1_0184r	El golpe es término del movimiento (can.)
	CM1_0183v	Agua que se mueve a 2 millas por hora (can.)
MsA_0028r	CM1_0183v	Torre redonda batida por un tiro de bombardarda (can.)
	CM1_0183r	Bombardarda que recula al dispararse (can.)
MsA_0029v	CM1_0182v	Ballesta compuesta (figura)
MsA_0030r	CM1_0180v	Flecha disparada por una ballesta, y peso que la carga (can.)
MsA_0030v	CM1_0181r	Peso en el agua y en el aire (can.)
	CM1_0180v	Hombre que levanta un peso mediante una polea (can.)
	CM1_0180r	Cuerda de la que se tira por tierra plana (can.)
MsA_0031r	CM1_0180r	Golpe dado a una roca, en el agua (can.)
	CM1_0180r	Golpe dado a la cuerda que sostiene en el aire a un hombre al que se da tormento (can.)
	CM1_0180r	Movimiento súbito de un cuerpo denso (can.)
	CM1_0180r	Golpe dado a un recipiente que contiene grano (can.)
MsA_0031v	CM1_0180r	Movimiento que se produce a sacudidas
	CM1_0179r	Clavo que se hinca en un madero (can.)
	CM1_0179r	Golpe producido por un movimiento vigoroso (can.)
	CM1_0179r	Movimiento producido por el aire comprimido (can.)
	CM1_0179r	Peso que cae en el agua (can.)

TABLA B.2: Listado de correspondencias de temas de mecánica práctica entre el Código de Madrid I y el Manuscrito A de Francia. Fuente: (RETI, 1974)

B.2.3. Correspondencias en temas de mecánica técnica entre los Códices Forster y el Código de Madrid I.

Correspondencia entre Código Forster I ₂ y el Código de Madrid I		
Código Forster I ₂	Código de Madrid I	Descripción
CF1_0044v	CM1_0191v	Modo de hacer barnices (cancelado)
CF1_0044v	CM1_0021v	Escala mecánica
Correspondencia entre Código Forster II ₂ y el Código de Madrid I		
Código Forster II ₂	Código de Madrid I	Descripción
CF2_0065v	CM1_0191r	Descenso libre de graves
	CM1_0191r	A mayor gravedad descenso más veloz
	CM1_0123v	Un barco desplaza un peso igual al del barco mismo
CF2_0066r	CM1_0166r	Balanzas
CF2_0066v	CM1_0168v	Balanzas
CF2_0069v	CM1_0058v	Bombardarda disparada en la niebla
CF2_0070v	CM1_0088v	Caída libre de cuerpos iguales
CF2_0073v	CM1_0088v	Hombres que tiran de maromas
CF2_0075v	CM1_0049r	Maromas utilizadas para alzar pesos

CF2_0076r	CM1_0049r	Maromas utilizadas para alzar pesos
CF2_0078v	CM1_0152r	Fuerza, tiempo, movimiento y peso
CF2_0080r	CM1_0181v	Centro de gravedad de un cuerpo piramidal
CF2_0088v	CM1_0135v	Curvatura de vigas
CF2_0089r	CM1_0136v	Curvatura de vigas
CF2_0089r	CM1_0137r	Curvatura de vigas
CF2_0089v	CM1_0147vv	Contra el movimiento continuo
CF2_0090r	CM1_0158r	
CF2_0092v		
CF2_0091v	CM1_0176r	Movimiento continuo con bolas
CF2_0095v	CM1_0168v	Tambor que recoge la cuerda con ángulo menor que el recto
CF2_0097r	CM1_0019v	Centro de gravedad que cae fuera del centro del tornillo
CF2_0098r	CM1_0087v	Distribución del peso sobre la viga
CF2_0099r	CM1_0162r	Peso que actúa en la perpendicular
CF2_0108r	CM1_0177r	Rueda sobre plano inclinado
CF2_0112v	CM1_0148v	Pesos colgados de cuerdas
CF2_0116v	CM1_0144v	Definición de gravedad
CF2_0117r	CM1_0145r	
CF2_0117r	CM1_0052v	Fuerza, peso, percusión y movimiento
CF2_0127v	CM1_0190v	Viga compuesta
CF2_0128r	CM1_0162v	Peso
CF2_0142v	CM1_0088v	Aceleración en el descenso de los cuerpos
CF2_0147v	CM1_0156v	Balanzas
CF2_0157v	CM1_0155v	Soportes y sus cargas
CF2_0159r	CM1_0191r	Pastelees
Correspondencia entre Códice Forster III y el Códice de Madrid I		
Códice Forster III	Códice de Madrid I	Descripción
CF3_0006r	CM1_0169v	Experimentos con cuerpos inclinados
CF3_0028v	CM1_0054r	Instrumento combinado
CF3_0029r	CM1_0177v	Soporte cargado en el centro
CF3_0038v	CM1_0182v	Ballesta doble
CF3_0040v	CM1_0175r	Instrumento para levantar pesos
CF3_0042r	CM1_0098v CM1_0099r CM1_0099v	Cerraduras
CF3_0045v	CM1_0181v	Centro de gravedad de cuerpos piramidales
CF3_0051r	CM1_0190v	Caída de graves
CF3_0057v	CM1_0048r	Compuertas
CF3_0057r		
CF3_0066r	CM1_0141v	Hombre en el fondo del mar
CF3_0067v	CM1_0179v	Cuchillo que corta un durazno
CF3_0081v	CM1_0175v	Análisis de los movimientos del tornillo
CF3_0082r		
CF3_0088v	CM1_0012v	Giulio tedesco entra al servicio de Leonardo el 18 de marzo de 1493

TABLA B.3: Listado de correspondencias de temas de mecánica práctica entre el Códice de Madrid I y los Códices Forster I, II y III. Fuente: (RETI, 1974)

B.2.4. Correspondencias en temas de mecánica técnica entre el Manuscrito H de Francia y el Códice de Madrid I.

CORRESPONDENCIAS ENTRE EL MANUSCRITO H DE FRANCIA Y EL CÓDICE DE MADRID I		
Ms. H	Códice Madrid I	Descripción
MsH_0030v	CM1_0069r	Teoría de las ruedas hidráulicas
MsH_0031r	CM1_0151v	Molinos de Vigevano
MsH_0037r	CM1_0126v	Ángulos de deslizamiento o distribución de los materiales
MsH_0038v	CM1_0151v	Molinos de Vigevano: detalles
MsH_0050v	CM1_0172r	Detalles de los pabellones de Vigevano
MsH_0056v	CM1_0152r	Experimentos hidráulicos
MsH_0057v	CM1_0134v	Experimentos hidráulicos
MsH_0058v	CM1_0134v	Teoría de las caídas de agua
MsH_0061r	CM1_0134v	Teoría de las caídas de agua
MsH_0061v	CM1_0151v	Ruedas hidráulicas, accionadas horizontalmente
MsH_0063r	CM1_0151v	Teoría de las ruedas hidráulicas
MsH_0072v	CM1_0026r	Gato de tornillo
MsH_0073r	CM1_0026r	Gato de tornillo
MsH_0073v	CM1_0134v	Teoría de las caídas de agua
MsH_0074v	CM1_0151v	Teoría de las ruedas hidráulicas
MsH_0078v	CM1_0172r	Pabellones de Vigevano
MsH_0079r	CM1_0172r	Pabellones de Vigevano
MsH_0080v	CM1_0157v	Para clavar estacas
MsH_0081r	CM1_0151v	Gasto de un molino
MsH_0083r	CM1_0151v	Construcción de una rueda hidráulica con veinte paletas
MsH_0087v	CM1_0151v	Teoría de las caídas de agua
MsH_0089r	CM1_0172r	Pabellones de Vigevano
MsH_0094v	CM1_0151v	Molinos de Vigevano: rendimiento
MsH_0105r	CM1_0012v	Giulio tedesco, con fecha 1494
MsH_0106v	CM1_0012v	Giulio tedesco, con fecha 1494
MsH_0110v	CM1_0061v	Péndulo en un mecanismo de relojería
MsH_0113v	CM1_0124r	Mecanismo con trinquete de doble efecto

TABLA B.4: Listado de correspondencias entre el Códice de Madrid I y el Manuscrito H de Francia.
Fuente: (RETI, 1974)

B.3. Estudios arquitectónicos y urbanísticos en los manuscritos de Leonardo.

El objeto de este apartado es identificar la relación de los folios que hacen referencia a estudios arquitectónicos y urbanísticos de los manuscritos de Leonardo, para introducirlos en la BASE DE DATOS.

B.3.1. Códice Atlántico.

Estudiadas las páginas del Códice Atlántico que hacen referencia a estudios, bocetos o simplemente anotaciones con la arquitectura y el urbanismo, se contabilizan un total de 74 folios.

CÓDICE ATLÁNTICO		
Folio		Descripción
Folio 0001v-a		Máquina excavadora
Folio 0001v-b		Máquina excavadora
Folio 0007v-b		Estudios de arquitectura en Pavía
Folio 0013r-a		Estudio de iglesia
Folio 0034v-b		Estudio de pabellón de madera para Vigevano
Folio 0037r-a		Estudios de iglesia de planta central

Folio 0041v-b		Fortificaciones campales
Folio 0041v-a		Fortificaciones
Folio 0041r		Estudio de fortificación en Piombino
Folio 0042v-c		Estudio de arquitectura eclesiástica
Folio 0042v-b		Estudios de fortificaciones
Folio 0043v-a		Estudio de fortificación de planta cuadrada
Folio 0043r-b		Estudio de fortificaciones
Folio 0044r-b		Estudio arquitectónico
Folio 0044v-b		Estudio arquitectónico
Folio 0048v-a-b		Estudio de fortificaciones
Folio 0048r-a		Estudio de fortificaciones
Folio 0061r-b		Estudio de ampliación villa Melzi
Folio 0063v-b		Puerto de Civitavecchia y estudios arquitectónicos
Folio 0065v-b		Planta del proyecto de expansión de Milán
Folio 0073v-a		Planta esquemática ciudad de Milán
Folio 0076v-b		Estudio palacio Real Romorantin
Folio 0114r-b		Estudios arquitectónicos
Folio 0115v		Estudios arquitectónicos
Folio 0148r-a		Estudio para el tributo Duomo de Milán
Folio 0153r-d-c		Estudio de ampliación villa Melzi
Folio 0158r-a		Proyecto de vivienda. Casa Guiscardi
Folio 0158v-a		Proyecto de vivienda. Casa Guiscardi
Folio 0159v-a		Estudios arquitectónicos
Folio 0167v-a		Estudios de desecación de los pantanos Pontine
Folio 0200r-a		Estudios de encofrados
Folio 0202v-a		Estudios arquitectónicos
Folio 0205v-a		Estudios arquitectónicos
Folio 0215r-a		Estudio de edificio rural
Folio 0217v-c		Estudio palacio Real Romorantin
Folio 0217v-b		Estudio palacio Real Romorantin
Folio 0220v-a		Estudio de vivienda rural
Folio 0220r-a		Estudio de vivienda rural
Folio 0225r-b		Intenciones de representar Milán
Folio 0231r-b		Villa de Charle de Amboise
Folio 0234v-a-b		Estudios arquitectónicos
Folio 0235v-a		Estudios arquitectónicos
Folio 0238r-b		Estudios de edificio de madera para Vigevano
Folio 0248r		Cuentas de dinero viaje a Venecia
Folio 0266r		Estudio Cimborrio Duomo de Milán
Folio 0266v-a		Estudio de iglesia
Folio 0270r-c		Carta de estudio cimborrio Duomo de Milán
Folio 0270v-b		Estudio palacio Real Romorantin
Folio 0271v-a		Estudio arquitectónico villa Charle de Amboise
Folio 0271r-f		Puerto de Civitavecchia
Folio 0279v-a		Estudios arquitectónicos
Folio 0281r-a		Estudio de desecación de los pantanos de Pontine
Folio 0281r-b		Estudios de escalera
Folio 0281v-b		Estudios de fortificación
Folio 0283r-b		Edificio de madera para Vigevano
Folio 0284v		Estudios de puente elevadizo
Folio 0294v-b		Estudio arquitectónico para el palacio de Romorantin
Folio 0298r-b		Estudio tecnológico y de arquitectura
Folio 0305v-a-b		Planimetría de canales villa de Charle de Amboise
Folio 0310r-b		Cimborrio Duomo de Milán
Folio 0310v-b		Cimborrio Duomo de Milán
Folio 0315r-b		Palacio Mediceo Florencia

Folio 0324r		Estudio arquitectónico
Folio 0335v-e		Construcción temporal para fiestas
Folio 0341v-b		Estudios de arquitectura en Pavía
Folio 0349r-a		Grúa para el cimborrio del Duomo de Florencia
Folio 0352r-b		Estudio de iglesia
Folio 0362r-b		Estudio arquitectónico
Folio 0362v-b		Estudios de iglesia
Folio 0377v-a		Estudio del sistema urbanístico de Porta Vercellina
Folio 0382r-a		Estudios de Basílica
Folio 0395r-a		Desembocaduras del río Naviglio
Folio 0395r-b		Estudio de ampliación villa Melzi
Folio 0397r-b		Estudio de torre campanario

Tabla B.5: Relación de folios del Códice Atlántico donde Leonardo hace referencia a estudios, bocetos o anotaciones relacionadas con la arquitectura y el urbanismo.

Fuente: (HIDALGO, 2014)

B.3.2. Códice Arundel.

Estudiadas las páginas del Códice Arundel que hacen referencia a estudios, bocetos o simplemente anotaciones con la arquitectura y el urbanismo, se contabilizan un total de 8 folios.

CÓDICE ARUNDEL		
Folio		Descripción
Folio 0126r		Estudio de casa rural de 3 terrazas
Folio 0138r		Estudio de grietas
Folio 0141v		Estudio de grietas
Folio 0157r		Estudio de grietas
Folio 0157v		Estudio de grietas
Folio 0264v		Palacio Real Romorantin
Folio 0269r		Estudio arquitectónico palacio Romorantin
Folio 0270v		Estudio arquitectónico palacio Romorantin

TABLA B.6: Relación de folios del Códice Arundel donde Leonardo hace referencia a estudios, bocetos o anotaciones relacionadas con la arquitectura y el urbanismo.

Fuente: (HIDALGO, 2014)

B.3.3. Códices Forster I y II.

Estudiadas las páginas del Códice Forster I y II que hacen referencia a estudios, bocetos o simplemente anotaciones con la arquitectura y el urbanismo, se contabilizan un total de 12 folios.

CÓDICE FORSTER I		
Folio		Descripción
Folio 0053r		Santa María della Grazie
Folio 0063v		Santa María della Grazie
CÓDICE FORSTER II		
Folio		Descripción
Folio 0015v		Edificio milanés
Folio 0022r		Estudio de portada
Folio 0023v		Proyecto expansión de Milán
Folio 0037v		Análisis de base de columna
Folio 0044v		Análisis de base de columna
Folio 0045r		Análisis de base de columna
Folio 0054v		Esquema de fachada Duomo de Milán
Folio 0055v		Planta Duomo de Milán

Folio 0062v		Carta arquitectónica
Folio 0068r		Comentarios sobre la ciudad ideal

TABLA B.7: Relación de folios del Códice Forster donde Leonardo hace referencia a estudios, bocetos o anotaciones relacionadas con la arquitectura y el urbanismo.

Fuente: (HIDALGO, 2014)

B.3.4. Manuscritos de Francia.

Estudiadas las páginas de los Manuscritos de Francia que hacen referencia a estudios, bocetos o simplemente anotaciones con la arquitectura y el urbanismo, se contabilizan un total de 67 folios.

MANUSCRITO A		
Folio		Descripción
Folio 0114r		Estudios previos sobre la ciudad ideal
Folio 0114v		Estudios previos sobre la ciudad ideal
MANUSCRITO B		
Folio		Descripción
Folio 0004v		Estudio de iglesia
Folio 0005r		Estudio de fortificación
Folio 0010v		Ocho formas de encimbrar una cúpula
Folio 0011v		Estudios de arquitectura del castillo de Milán
Folio 0012r		Estudios de arquitectura del castillo de Milán
Folio 0014v		Estudios arquitectónicos
Folio 0015r		Estudios arquitectónicos: pórtico de una iglesia
Folio 0015v		Estudios de canalización ciudad ideal
Folio 0016r		Estudios de canalización ciudad ideal
Folio 0016v		Estudios arquitectónicos
Folio 0017v		Estudios de iglesia de planta central
Folio 0018r		Estudios de iglesia de planta central
Folio 0018v		Iglesia de planta central con nueve cúpulas
Folio 0019r		Estudios arquitectónicos: fortificación
Folio 0019v		Estudios arquitectónicos
Folio 0021r		Basílica de 5 cúpulas
Folio 0021v		Estudios arquitectónicos
Folio 0022r		Iglesia de planta central
Folio 0022v		Estudios de arquitectura
Folio 0023r-		Estudios de arquitectura
Folio 0023v		Estudios de arquitectura
Folio 0024r		Estudios de arquitectura: Basílica
Folio 0024v		Estudios de arquitectura: Fortificación
Folio 0025v		Iglesia de planta central con cuatro torres
Folio 0028v-		Estudio de arquitectura: encofrados
Folio 0030r		Estudio de arquitectura
Folio 0034v		Estudio de arquitectura
Folio 0035v		Estudio de arquitectura: Basílica
Folio 0036r		Estudio de la ciudad ideal
Folio 0036v		Estudio de arquitectura: Fortificación
Folio 0037r		Estudios de la ciudad ideal
Folio 0037v		Estudios de la ciudad ideal
Folio 0038r		Estudios urbanístico y de canalizaciones
Folio 0038v		Estudio de arquitectura
Folio 0039r		Estudio de establo para Vigevano
Folio 0039v		Estudio de arquitectura
Folio 0047r		Estudio de edificio ciudad ideal
Folio 0048v		Estudio de arquitectura
Folio 0052r		Estudio de arquitectura: Basílica

Folio 0055r		Estudio de arquitectura: Iglesia
Folio 0056v		Estudio de arquitectura: Iglesia
Folio 0057r		Estudio de arquitectura: Duomo de Milán
Folio 0058r		Muralla Santa María della Pertica
Folio 0058v		Estudio de arquitectura: Fortificación en Pavía
Folio 0060r		Estudio de arquitectura
Folio 0068r		Estudio de arquitectura
Folio 0068v		Estudio de arquitectura: Escalera de dos niveles
Folio 0069r		Estudio de arquitectura: Fortificación
Folio 0093v		Estudio de arquitectura: Iglesia
Folio 0094r		Estudio de arquitectura: Iglesia
Folio 0095r		Estudio de arquitectura
MANUSCRITO H		
Folio		Descripción
Folio 0078v		Edificio de madera para Vigevano
Folio 0089r		Edificio de madera para Vigevano
Folio 0123r		Planta de iglesia cruz griega
MANUSCRITO I		
Folio		Descripción
Folio 0018v		Estudio de arquitectura villa palacio
Folio 0056r		Estudio de arquitectura villa palacio
Folio 0056v		Estudio de arquitectura
Folio 0118r		Estudio de arquitectura: Santa María della Grazie
MANUSCRITO L		
Folio		Descripción
Folio 0015v		Estudio de fortificación en Piombino
Folio 0019v		Escaleras del palacio Ducal Urbino
Folio 0020r		Escaleras del palacio Ducal Urbino
Folio 0073v		Escaleras del palacio Ducal Urbino
Folio 0074r		Escaleras del palacio Ducal Urbino
MANUSCRITO H		
Folio		Descripción
Folio 0053v		Puente elevadizo

TABLA B.8: Relación de folios de los Manuscritos de Francia donde Leonardo hace referencia a estudios, bocetos o anotaciones relacionadas con la arquitectura y el urbanismo.

Fuente: (HIDALGO, 2014)

B.3.5. Códices de Madrid I y II.

Estudiadas las páginas de los Códices de Madrid I y II que hacen referencia a estudios, bocetos o simplemente anotaciones con la arquitectura y el urbanismo, se contabilizan un total de 13 folios.

CÓDICE MADRID I		
Folio		Descripción
Folio 0005v		Método para encadenar arcos
Folio 0033v		Máquina de transporte de material pesado
Folio 0034r		Máquina de transporte de material pesado
Folio 0113v		Arcos de la cúpula de Santa María della Grazie
CÓDICE MADRID II		
Folio		Descripción
Folio 0004r		Situación actual de la Verruca
Folio 0007v		Estudio de fortaleza la Verruca
Folio 0008r		Estudio de fortaleza la Verruca
Folio 0011v		Estudio palacio
Folio 0022v		Proyecto de canalización del río Arno
Folio 0023r		Proyecto de canalización del río Arno

Folio 0037r		Estudio de fortificación
Folio 0052v		Proyecto de desviación del río Arno
Folio 0079r		Estudio de fortificación

TABLA B.9: Relación de folios de los Códices de Madrid donde Leonardo hace referencia a estudios, bocetos o anotaciones relacionadas con la arquitectura y el urbanismo.

Fuente: (HIDALGO, 2014)

B.3.6. Códice Trivulziano.

Estudiadas las páginas del Códice Trivulziano que hacen referencia a estudios, bocetos o simplemente anotaciones con la arquitectura y el urbanismo, se contabilizan un total de 10 folios.

CÓDICE TRIVULZIANO		
Folio		Descripción
Folio 0004r		Estudio de encofrado
Folio 0008r		Estudio de pilares en Duomo de Milán
Folio 0008v		Estudio de pilares en Duomo de Milán
Folio 0009r		Estudio de pilares en Duomo de Milán
Folio 0011r		Estudio de pilares en Duomo de Milán
Folio 0021r		Estudio de pilares en Duomo de Milán
Folio 0021v		Modelo de establos
Folio 0022r		Estudio de fachada
Folio 0022v		Plano esquemático del Duomo de Milán
Folio 0027v		Estudio de pilares en Duomo de Milán

TABLA B.10: Relación de folios del Códice Trivulziano donde Leonardo hace referencia a estudios, bocetos o anotaciones relacionadas con la arquitectura y el urbanismo.

Fuente: (HIDALGO, 2014)

B.3.8. Colección Windsor.

Estudiadas las páginas del Códice Forster I y II que hacen referencia a estudios, bocetos o simplemente anotaciones con la arquitectura y el urbanismo, se contabilizan un total de 22 folios.

COLECCIÓN WINDSOR		
Folio		Descripción
Folio nº 12.284		Planta de la ciudad de Imola
Folio nº 12.292		Perspectiva Palacio Romorantin
Folio nº 12.353		Estudio arquitectónico sepulcro Trivulziano
Folio nº 12.355		Estudio arquitectónico sepulcro Trivulziano
Folio nº 12.356		Estudio arquitectónico sepulcro Trivulziano
Folio nº 12.552		Estudio de arquitectura
Folio nº 12.522		Estudio de planta central para cripta
Folio nº 12.560		Estudio de tecnología y arquitectura
Folio nº 12.579		Estudios de columnas
Folio nº 12.585		Estudio de castillo
Folio nº 12.591		Estudio arquitectónico
Folio nº 12.592		Estudio arquitectónico
Folio nº 12.609		Estudio de ábside de Iglesia
Folio nº 12.680		Proyecto desviación río Arno
Folio nº 12.681		Plan urbanístico de Florencia
Folio nº 12.686		Apuntes topográficos de Imola
Folio nº 12.689		Estudio de desecación de los pantanos

Folio nº 12.689		Villa rústica típicamente Toscana
Folio nº 12.692		Estudio de arquitectura
Folio nº 19.077		Estudio de ampliación Villa Melzi
Folio nº 19.104		Villa Melzi
Folio nº 19.134v		Estudio de arquitectura

TABLA B.11: Relación de folios de la Colección Windsor donde Leonardo hace referencia a estudios, bocetos o anotaciones relacionadas con la arquitectura y el urbanismo.

Fuente: (HIDALGO, 2014)

Apéndice C

Leonardo da Vinci

Glosario técnico usado en sus manuscritos

*La adquisición de cualquier conocimiento
es siempre útil al intelecto, que sabrá descartar
lo malo y conservar lo bueno.
(Leonardo da Vinci)*

Glosario técnico. Aparatos leonardinos.

A continuación pasamos a definir la terminología técnica, tal cual la usó Leonardo en sus manuscritos. Las búsqueda concretamente se ha realizado en los Códices de Madrid I y II, así como en el Códice Atlántico. La herramienta de búsqueda empleada ha sido la que la propia página **e-Leo** pone a disposición de cualquier investigador. La traducción del italiano al español se ha llevado a cabo por nosotros.

ANELLO

1. Elemento o dispositivo di forma anulare adibito a varie funzioni

ANILLO

1. Elemento o dispositivo anular que puede combinar varias funciones

ASTE

1. 'asta, elemento di forma allungata facente parte di una machina o di uno strumento di vario tipo', 'braccio di un'arma da getto'
2. 'braccio di bilancia' (anche con riferimento a studi teorici sull'equilibrio)

BARRA, VARA, PÉRTIGA

1. 'barra, elemento alargado que forma parte de una máquina o herramienta de diferentes tipos', 'brazo de un arma impulsora'
2. 'brazo de una balanza' (también haciendo referencia a estudios teóricos sobre la balanza)

BALESTRA

1. 'balestra, arma composta da un arco fissato a un fusto di legno e dotata di un dispositivo che tende la corda e la rilascia di scatto'
2. 'macchina bellica da getto di enorme dimensioni', 'balestrone'

BALLESTA

1. 'ballesta, arma que consiste en un arco fijado a un vástago de madera y provisto de un dispositivo que tensa la cuerda y libera el obturador'
2. 'máquina impulsora de guerra de enorme tamaño ', " balestrone'

BALESTRO

1. 'balestra, arma composta da un arco fissato a un fusto di legno e dotata di un dispositivo che tende la corda e la rilascia di scatto'
2. 'dispositivo a molla dal meccanismo análogo a quello di una balestra

BALESTRO

1. 'ballesta, arma que consiste en un arco fijado a un vástago de madera y provisto de un dispositivo que tensa la cuerda y libera el obturador'
2. 'dispositivo de resorte a partir del mecanismo análogo al de una ballesta'

BALLOTTA

1. 'masa sferica che funge da peso e contrappeso
2. 'rotella', 'specie di rullo per guidare il filo nella macchina tessile'
3. 'palla di uno strumento bellico', 'proiettile'

BALLOTTA

1. 'masa esférica que puede actuar tanto como un peso y contrapeso'
2. 'rueda', 'especie de rodillo para guiar el hilo en una máquina textil'
3. 'bola de arma de guerra', 'bala o proyectil'

BERETTA

1. 'elemento a forma di cupola, componente di una macchina cimatrice'

BERETTA

1. 'elemento en forma de cúpula, que forma parte de una máquina de corte'

BILANCIA / BILANZA

1. 'bilancia', 'congegno per lo estudio dell'equilibrio'

BALANZA

1. 'balanza', 'dispositivo para el estudio del equilibrio'

BRACCIO

1. 'braccio, elemento di forma allungata adibito a varie funzioni'
2. 'braccio flessibile che aziona un'arma da getto o un dispositivo a molla dal funzionamento analogo'
3. 'braccio della bilancia' (anche con riferimento a studi teorici sull'equilibrio)

BRAZO

1. 'brazo, elemento alargado que puede ser usado de varias formas funcionales diferentes'
2. 'brazo flexible que acciona un arma impulsora o dispositivo de resorte con un funcionamiento similar'
3. 'brazo de la balanza' (también haciendo referencia a estudios teóricos sobre la balanza)

BRICCOLA

1. 'macchina bellica da getto'

BRICCOLA

1. 'máquina impulsora de guerra'

CACCIATORE

1. 'parte di una macchina per lo stampaggio'

CAZADOR

1. 'parte de una máquina para estampación'

CALCAGNO

1. 'elemento metallico mobile intorno a un perno, con una sporgenza funzionale alla trasmissione del movimento nei meccanismi di carica delle armi da fuoco' con riferimento alle forbici 'parte posteriore'

TALÓN

1. 'elemento metálico móvil alrededor de un perno, cuya función es la transmisión del movimiento del mecanismo que carga el arma de fuego' haciendo referencia a las tijeras 'parte trasera'

CALCOLA / CALCULA

1. 'specie di pedale che nelle macchine tessili serve per alzare e abbassare i fili dell'ordito'

CALCOLA / CALCULA

1. 'tipo de pedal que en las maquinas textiles se utiliza para levantar por debajo los hilos de la urdimbre'

CARELLO

1. 'una delle due ruote di un qualunque accoppiamento rotoidale (ruota dentata, puleggia o ruota a gabbia), in genere quella più piccola che riceve il movimento'

PIÑÓN

1. 'una de las dos ruedas de cualquier acoplamiento giratorio (rueda dentada, polea o jaula), generalmente la más pequeña que recibe el movimiento'

CARRUCOLA / CARRUCULA

1. 'carrucola, macchina semplice costituita da un disco con gola di guida della fune, girevole intorno al suo albero, sorretto da una staffa'

POLEA

1. 'polea, máquina simple para mover o levantar cosas pesadas que consiste en una rueda suspendida, que gira alrededor de un eje, con un canal o garganta en su borde por donde se hace pasar una cuerda o cadena, apoyado en un soporte'

CASSA

1. 'elemento cavo che funge per lo più da contenitore'
2. 'telaio di contenimento di un meccanismo o di un ingranaggio'
3. 'telaio di contenimento della forma di una fusione'
4. 'pala di ruota idraulica a cassette'

CAJA

1. 'elemento hueco que actúa principalmente como un contenedor'
2. 'armazón o bastidor de sujeción de un mecanismo o de un engranaje'
3. 'armazón o bastidor compuesto'
4. 'palas de una rueda hidráulica en forma de cangilones'

CATENACCIO

1. 'dispositivo per bloccare le funi'
2. 'chiavistello', 'serratura dell'uscio'

BROCHE

1. 'dispositivo para bloquear cuerdas'
2. 'cerrojo', 'cerradura de la puerta'

CHIAVE

1. 'elemento di metallo per l'azionamento o il bloccaggio di un meccanismo'
2. 'nelle balestre, perno che blocca il congegno di caricamento dell'arma'
3. 'rubinetto che regola l'afflusso di un fluido in un recipiente'

4. 'in ámbito architetonico, elemento di fissaggio in ferro o legno'

LLAVE

1. 'elemento metálico para accionar o bloquear un mecanismo'
2. 'en una ballesta, pasador de bloqueo del dispositivo que carga el arma'
3. 'grifo que regula el flujo de un fluido en un recipiente'
4. 'en arquitectura, dispositivo de fijación de hierro o madera'

CONTRALIEVA / CONTRALLIEVA / CONTRO A LIEVA

1. 'leva che agisce in opposizione a un'altra leva'

CONTRAPALANCA

1. 'palanca que actúa en oposición a otra palanca'

FALCONE

1. 'macchina semplice costituita da una trave sporgente per sollevare pesi (eventualmente dotato di carrucola)'
2. 'pezzo di artiglieria di calibro inferiore al cannone (vedi)'

FALCONE

1. 'máquina simple que consiste en una viga o travesaño saliente para levantar peso (ocasionalmente provistos de una polea)'
2. 'pieza de artillería de calibre inferior al cañón (ver cannone)'

FATTORINO

1. 'dispositivo per il bloccaggio di una ruota dentata'

FATTORINO

1. 'dispositivo para bloquear una rueda dentada'

FILATOIO

1. 'macchina per filare'

HILADORA

1. 'máquina de hilar'

FRONTE

1. 'estremità di un elemento di forma allungata', 'parte anteriore di un elemento, un órgano o una macchina'
2. 'circonferenza di testa di una ruota dentata'
3. con riferimento al cuneo 'testa', 'base'
4. con riferimento al martello 'superficie di battuta'

FRONTAL

1. 'extremidad de un dispositivo de forma alargada', 'parte delantera de un dispositivo u órgano de una máquina'
2. 'circunferencia de la cabeza de una rueda dentada'
3. En relación a la cuña "cabeza", "base"
4. En relación al martillo "superficie de contacto"

GARZO

1. 'strumento per cardare la lana (all'interno di una macchina tessile)'

GARZO

1. 'herramienta para el cardado de la lana (en una máquina textil)'

GIRELLA

1. 'ruota della carrucola', 'carrucola, puleggia'

GIRELLA

1. 'rueda de la polea', 'polea'

INGEGNO

1. 'congegno, meccanismo (di vario tipo)'

INGEGNO

1. 'artilugio, mecanismo (de varios tipos)'

LAMA

1. 'elemento metallico affilato e tagliente interno a un meccanismo'

LAMA

1. 'elemento metálico interno a un mecanismo agudo y afilado'

LIEVA MATERIALE

1. 'leva' (nella sua accezione materiale)

PALANCA

1. 'palanca' (en el sentido físico, tangible)

LIEVA / LIEVE / LEVA / LEVERA

1. 'leva, elemento di forma allungata che funge da leva o comunque riconducibile al principio della leva' (anche con riferimento a studi teorici)

PALANCA

1. 'palanca, miembro alargado que actúa como una palanca o en cualquier caso debido a la ley de la palanca' (también refiriéndose a estudios teóricos)

MAESTRA

1. 'congegno, o parte di un congegno sperimentale per misurare l'attrito tra vite e madrevite'
2. 'utensile per la filettatura delle viti'
3. 'paletta'

MAESTRO

1. 'dispositivo o parte de un un dispositivo experimental para medir el rozamiento entre el tornillo y la tuerca'
2. 'herramienta para el roscado de los tornillos'
3. 'cuchara'

MANGANO

1. 'macchina bellica da getto'
2. 'macchina per il sollevamento di pesi', 'argano'

MANGANO

1. 'máquina de guerra a impulsión'
2. 'máquina para levantar peso', 'cabrestante'

MANICO

1. 'manovella per azionare a mano un congegno'; raramente 'asta di forma diritta per la manovra di un congegno'

MANGO

1. 'manivela para accionar manualmente un dispositivo', rara vez 'varilla recta para el funcionamiento de un dispositivo'

MANOVELLA

1. 'asta adoperata per la manovra manuale di un disposito'

MANIVELA

1. 'varilla encargada de la maniobra manual de un dispositivo'

MARTINELLO

1. 'martinetto, macchina per il sollevamento di pesi ad altezza limitata'

GATO

1. 'gato, máquina para levantar pesos a una altura limitada'

MARTINETTO

1. 'martinetto, macchina per il sollevamento di pesi ad altezza limitata', 'cricco'
2. 'congegno che serviva per tendere la corda della balestra, martinello'

GATO

1. 'gato, máquina para levantar pesos con altura limitada', 'carraca'
2. 'dispositivo para tensar la cuerda de la ballesta, martinello'

MENATOIO

1. 'arganetto azionato a mano', 'manovella'
2. 'dispositivo per mettere in tensione le corde di un'intelaiatura'

MENATOIO

1. 'cabrestante accionado manualmente', 'manivela'
2. 'dispositivo para tensionar las cuerdas en un bastidor'

MEZZANO

1. 'asta di collegamento che funge da biella'

MEZZANO

1. 'barra de articulación que actúa con una varilla de conexión o biela'

MOLINO / MULINO

1. 'impianto per la macinazione del grano e di altri cereali'
2. 'impianto per la macinazione di materiali vari' (con riferimento alla polvere per armi da fuoco)
3. 'impianto per mettere in funzione meccanismi e strumenti diversi'
4. 'meccanismo costituito da un rotore ad asse verticale che serviva per far girare la mola impiegata nella levigatura di pietre preziose' (vedi [mulinello] / [mulenello] acc. 2)

MOLINO

1. 'instalación para moler el grano y otros cereales'
2. 'instalación para la molienda de diversos materiales' (refiriéndose a la pólvora para armas de fuego)
3. 'instalación que funciona con diversos mecanismos y herramientas'
4. 'mecanismo formado por un rotor de eje vertical que sirve para girar la muela abrasiva empleada en el pulido de las piedras preciosas' (ver la segunda definición de mulinello)

MULINELLO / MULENELLO

1. 'filatoio' (usato in partic. per attorcere le fibre tessili), 'aspo', 'arcolao'
2. 'meccanismo costituito da un rotore ad asse verticale, per far girare la mola impiegata nella levigatura delle pietre preziose'

MOLINO - CARRETE – BOBINA

1. 'máquina de hilado' (usado para hilar la fibra textil), 'carrete', 'rueca'
2. 'mecanismo formado por un rotor de eje vertical que sirve para girar la muela abrasiva empleada en el pulido de las piedras preciosas'

PESTONE

1. 'grande pestello di una macchina sminuzzatrice'

PESTONE

1. 'gran mano de mortero de una máquina de moler'

POLO UNIVERSALE

1. 'cerniera sferica'

POLO UNIVERSAL

1. 'articulación esférica'

RITRECINE

1. 'motore di un molino', 'ruota o insieme di organi che azionano la macina di un molino'

RITRECINE

1. 'motor de un molino', 'rueda o conjunto de órganos que conducen la muela de un molino'

ROCCHETTO

1. 'gabbia cilindrica o a tronco di cono che funge da ruota dentata', 'ruota a gabbia', 'piccola ruota dentata'
2. 'cilindretto attorno al quale si avvolge un filato', e per estensione anche 'cilindretto rotante solitamente destinato all'avvolgimento di funi'

ROCCHETTO

1. 'jaula cilíndrica o en forma de tronco de cono que actúa como rueda dentada'
2. 'pequeño cilindro alrededor del cual se enrolla un hilo', y por extensión también 'cilindro rotatoria generalmente usado con la intención de bobinado de cuerdas'

ROTA A VITE

1. 'ruota con profilo eccentrico a spirale', 'camma'

RUEDA TORNILLO

1. 'rueda con perfil excéntrica en espiral', 'leva'

ROTA DEL RITEGNO

1. 'ruota a dente di sega associata a un meccanismo di ritegno (bloccaggio / sbloccaggio)'

RUEDA DEL MECANISMO DE RETENCIÓN

1. 'rueda con dientes en forma de sierra asociada a un mecanismo de retención (bloqueo / desbloqueo)'

ROTA DENTATA / RUOTA DENTATA

1. 'ruota dentata' (vedi anche rota acc. 1, che spesso implica il significato di 'ruota dentata')

ENGRANAJE – PIÑÓN

1. 'rueda dentada (engranaje, corona, piñón)' (ver también ROTA definición primera, que a menudo implica el significado de RUOTA DENTATA)

ROTA SANZA POLO

1. 'corona dentata'

RUEDA SIN POLO

1. 'corona dentada'

ROTA / RUOTA / RODA

1. 'ruota di un congegno meccanico di vario tipo' (ruota dentata, ruota a gabbia, ruota a dente di sega, ruota con profilo eccentrico, elemento discoidale, volano, ecc.)
2. 'ruota di un veicolo o di altra struttura mobile'

3. 'ruota motrice munita di pale o cassette che intercettano acqua o aria'
4. 'ruota motrice munita, esternamente o internamente, di gradini cosicché un uomo possa imprimerle il movimento con il proprio corpo'
5. 'puleggia', 'rotella di carrucola'
6. 'mola, disco rotante per macinare, affilare, levigare o molare'
7. 'nelle antiche armi da fuoco, dischetto d'acciaio azionato da un mollone che, per attrito contro la pietra focaia, produceva scinille per accenderé l'innesco'

RUEDA

1. 'rueda de un dispositivo mecánico de diversos tipos' (engranaje cilíndrico, engranaje de jaula, engranaje de diente de sierra, rueda con perfil excéntrico, elemento con forma de disco, volante, etc.)
2. 'rueda de un vehículo o cualquier estructura móvil'
3. 'rueda motriz provista de palas o cangilones que interceptan el agua o el aire'
4. 'rueda motriz equipada, externa o internamente, de escalones para que un hombre pueda imprimerle el movimiento con su propio cuerpo'
5. 'polea', 'rueda de la polea'
6. 'muela, disco giratorio para moler, afilar, pulir o amolar'
7. 'en las armas de fuego antiguas, disco de acero accionado por un resorte principal que, por fricción con un pedernal, producía chispas para encender la mecha'

ROTELLA

1. 'picola ruota di un ingranaggio'
2. 'puleggia', 'ruota di carrocola e la carrucola stessa'
3. 'cilindro su cui si avvolge il filo'
4. 'rotella', 'specie di rullo per guidare el filo nella macchina tessile'
5. 'congegno rotante per un sistema di artiglieria leggera a ripetizione'

ROTELLA

1. 'rueda pequeña de un engranaje, piñón'
2. 'polea', 'rueda de la polea o la polea misma'
3. 'cilindro sobre el que el que se enrolla el hilo'
4. 'rueda', 'especie de rodillo para guiar el hilo en la máquina textil'
5. 'dispositivo giratorio para un sistema de artillería ligera de repetición'

ROZELLA

1. 'puleggia', 'carrucola'

ROZELLA

1. 'polea', 'polea'

RUBECCHIO / RIBECCHIO / RIBECCO

1. 'grossa ruota dentata'

RUBECCHIO

1. 'engranaje grande'

SCALA

1. 'parte di un meccanismo costituita da un supporto fisso munito di una serie di tacche o di denti', 'cremagliera'
1. 'dispositivo per sollevare pesi'

ESCALA

1. 'parte de un mecanismo constituido por un soporte fijo provisto de una serie de muescas o dientes', 'cremallera'
2. 'dispositivo para levantar pesos'

SCALETTA

1. 'parte di un meccanismo costituita da un supporto fisso munito di una serie di tacche o di denti', 'cremagliera'

ESCALA

1. 'parte de un mecanismo constituido por un soporte fijo provisto de una serie de muescas o dientes', 'cremallera'

SEGA

1. 'sega, strumento o macchina per tagliare' o, più particolarmente, 'lama della sega' (solitamente dentata, tranne nel caso della sega per il taglio delle pietre, dove la lama agisce mediante lo smeriglio)
2. 'strumento formato da due lame dentellate che stringendosi l'una contro l'altra tagliano oggetti di ferro'

SIERRA

1. 'sierra, herramienta o máquina para cortar' o más particularmente, 'la hoja de la sierra' (generalmente dentada, excepto en el caso de la sierra para el corte de piedras, donde la hoja es sustituida por un esmeril)
2. 'herramienta formada por dos hojas de dientes de sierra que aferrándose la una contra la otra cortan objetos de hierro'

SEGA A ACQUA

1. 'sega azionata dall'energia idraulica'

SIERRA DE AGUA

1. 'sierra accionada por la fuerza del agua, energía hidráulica'

SERRATURA

1. 'meccanismo di bloccaggio o chiusura'

CERRADURA

1. 'mecanismo de cierre o bloqueo'

SERVIDORE / SERVITORE

1. 'dispositivo di bloccaggio di una ruota dentata'

SIERVO

1. 'dispositivo para bloquear una rueda dentada'

TAGLIA

1. 'paranco con più carrocole per il sollevamento e la trazione di pesi', 'bozzello'

POLIPASTO

1. 'polipasto con muchas poleas para elevar un peso a tracción', 'bloque'

TELAIO / TELARO

1. 'struttura che assicura l'assetto e il movimento degli elementi che compongono una macchina', 'incastellatura'
2. 'macchina tessile'
3. 'attrezzo per stendere i tessuti da ricamare'

BASTIDOR / TELAR

1. 'estructura que garantiza el ajuste y el movimiento de los elementos que componen una máquina', 'armazón'
2. 'máquina textil'
3. 'conjunto de herramientas para extender los tejidos para bordar'

TIRARE

1. 'dispositivo o macchina per la trazione, lo spostamento o il sollevamento di carichi'
2. 'congegno di caricamento di una balestra'

TIRARE

1. 'dispositivo o máquina a tracción, bien para mover o bien para levantar cargas'
2. 'artilugio para cargar una ballesta'

TORNIO

1. 'tornio, macchina caratterizzata del moto rotatorio del pezzo da lavorare dal moto di avanzamento lineare dell'utensile'

TORNO

1. 'torno, máquina que se caracteriza por el movimiento rotatorio de la pieza a mecanizar por el movimiento de avance linear de la herramienta'

TRABOCCO

1. 'trabocco, macchina bellica da getto'

TRABOCCO

1. 'trabocco, máquina bélica a impulsión'

TRAFILA

1. 'macchina per la trafilatura di barre di metallo'

TRAZADOR

1. 'máquina para el trazado de barras de metal'

TRAPANO

1. 'trapano, macchina utensile perforare legno, metallo o altro mediante una punta fatta girare rápidamente su se stessa'

TALADRO

1. 'taladro, máquina herramienta para taladra madera, metal o cualquier otro material, mediante un punta que se hace girar a gran velocidad sobre sí misma'

UCCELLO

1. 'macchina volante', 'cabina di macchina volante'

UCCELLO

1. 'máquina voladora', 'la cabina de la máquina voladora'

VENTOLA

1. 'pala o elemento rotante a pale che interagiscono con l'aria'
2. 'elemento rotante a pale utilizzato in un meccanismo a orologeria per rallentare il movimento'
3. 'elemento oscillante che fa vento'

VENTILADOR

1. 'pala o conjunto de palas giratorias que interactúan con el aire'
2. 'elemento giratorio de paletas usado en un mecanismo de relojería para ralentizar el movimiento'
3. 'elemento oscilante que provoca viento'

VITE PERPETUA

1. 'vite senza fine', 'ruota dentata'

TORNILLO PERPETUO

1. 'tornillo sinfín', 'engranaje'

VITE RETROSA

1. 'vite a filetti contrapposti'

TORNILLO INVERSO

1. 'tornillo con roscas opuestas'

VITE SANZA FINE / VITE SENZA FINE / VITA SANZA FINE / VITE SINE FINE

1. 'vite senza fine', 'ruota dentata'

TORNILLO SINFIN

1. 'tornillo sinfín', 'engranaje'

VITE VOTA

1. 'coclea', 'vite di Archimede'

TORNILLO "vota"

1. 'cóclea', 'tornillo de Arquímedes'

VITE / VIDE

1. 'vite', 'elemento cilíndrico o cónico filettato' (in senso generic e talora anche nell'espressione avv. a vite, a uso di vite', 'vite per stringere, collegare, fissure, ecc.')
2. 'vite senza fine', 'ruota dentata', 'vite di manovra'
3. 'punta perforante costituita da un cono, o tronco di cono, filettato'
4. 'coclea', 'vite di Archimede'
5. 'scanalatura spiraliforme'
6. 'nelle bombarde a culatta avvitabile, l'elemento filettato di collegamento'
7. 'anello o porzione di anello che, montato su un cilindro, funge da filetto di vite'

TORNILLO

1. 'tornillo', 'elemento cilíndrico o cónico roscado', 'tornillo para apretar, conectar, fija, etc.'
2. 'tornillo sinfín', 'engranaje', 'maniobra de tornillo'
3. 'punta de perforación consistente en un cono o tronco de cono roscado'
4. 'cóclea', 'tornillo de Arquímedes'
5. 'ranura en espiral'
6. 'en una bombardera la culata atornillable, la conexión roscada'
7. 'anilla o porción de anilla que se monta sobre un cilindro, actuando como una rosca de tornillo'

Nota: Evidentemente la terminología es mucho mayor, en este apéndice tan sólo hemos desglosado una muestra representativa.

INGENIERO Leonardo da Vinci

