

El ingeniero Leonardo da Vinci

*Asdrúbal Valencia Giraldo**

(Recibido el 14 de agosto de 2004. Aceptado el 21 de septiembre de 2004)

Resumen

Se hace un resumen de la biografía de Leonardo da Vinci y se mencionan las diferentes facetas de su genio, sin embargo, se procura hacer énfasis sobre sus inquietudes científicas y, principalmente, técnicas. Esto con el fin de poder sopesar desapasionadamente las reales contribuciones de Leonardo a la ingeniería. Se concluye que esos aportes fueron muchos más en el campo de las ideas que en el de las aplicaciones prácticas. Sin embargo, la visión, la inquietud, la correlación entre el saber ver, la ciencia y la praxis hacen que Leonardo sea, verdaderamente, el primer ingeniero moderno.

----- *Palabras clave:* Leonardo, historia de la ingeniería, Renacimiento, códices, historia de las máquinas, máquinas de guerra.

The engineer Leonardo da Vinci

Abstract

A summary of Leonardo da Vinci's life is presented and many facets of his genius are mentioned. However, emphasis is on his scientific and, mainly, technical concerns. This is done in order to dispassionately weight his actual contributions to engineering. It is concluded that those contributions were much more in the idea field than in practical applications. However, his vision, inquiring mind, and correlation between knowledge, science and praxis, make Leonardo, indeed, the first modern engineer.

----- *Key words:* Leonardo, engineering history, Renaissance, codex, machine history, war machines.

* Profesor. Departamento de Ingeniería de Materiales. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. avalen@udea.edu.co.

Introducción

Leonardo da Vinci resumió el ideal renacentista del sabio de múltiples talentos —pintor, escultor, narrador, músico, científico, matemático, arquitecto, ingeniero— con una sed de conocimientos y una curiosidad insaciables; fue múltiple y fue uno, y cada arista de su genio estaba determinada por las otras del conjunto.

En ningún momento debe perderse de vista que la fama única de la que el florentino gozó en su tiempo, y que filtrada y purificada por la crítica histórica ha permanecido sin opacarse hasta nuestros días, se basa en la, igualmente única, universalidad de su espíritu. La universalidad de Leonardo es más que polifacetismo, era una fuerza espiritual, propia de sí, que generó en él un deseo ilimitado de conocimiento y que guió su forma de pensar y comportarse. Un artista por disposición y talento, encontró que sus ojos eran su principal vía al conocimiento; para Leonardo la vista fue el más alto sentido del hombre, porque la sola visión reunía los hechos de la experiencia de modo inmediato, correcto y certero. Por tanto, cada fenómeno percibido se convertía en un objeto de conocimiento. *Saper vedere* (saber ver) fue el gran lema de sus estudios sobre la naturaleza y las creaciones del hombre. Su creatividad llegó a todo dominio donde se usara la representación gráfica: por ello fue pintor, escultor, arquitecto, ingeniero y científico [1].

Excluido por nacimiento de casi todas las profesiones, Leonardo era, también, un amasijo de contradicciones y conflictos; rara vez cumplía con un encargo; viajaba mucho para su tiempo; quería vivir plenamente y llegar al fondo de todos los fenómenos, explicar las cosas; hacer todo lo que pudiese y anotar todo lo que presenciaba. Escribió en contra de la guerra, pero diseñó armamento para varios líderes militares; era un maestro de la pintura, acaso el más grande de todos los tiempos, pero parece que se cansó del arte. Se mostraba desdeñoso respecto del legado cultural, pero se sumergió en el saber clásico; creía que el ser humano era la suma

expresión de la divinidad, pero despreciaba a la humanidad. Y, aunque fuese el genio por antonomasia, podemos resumir sus aportes en tres campos principales: el arte, la ciencia y la ingeniería [2].

Se han escrito numerosas obras en estos cinco siglos donde se interpreta a Leonardo como artista; se ha dicho mucho menos sobre sus ideas científicas y apenas después del decenio de 1960, tras la recuperación de los códices de Madrid, se ha rescatado a Leonardo como ingeniero.

Leonardo estudió y recibió el influjo de las tendencias teóricas, y observó y se acercó a las tendencias prácticas de la evolución científica. Por un lado, era eminentemente práctico, sabía modelar y hacer manualmente muchas cosas, amaba de verdad el campo. Del otro, leyó a los sabios antiguos y conoció también a otros genios que le infundieron la comprensión de la técnica y los principios teóricos.

Conforme con lo anterior, este trabajo se centra en el ingeniero Leonardo, sin pretender abarcar las otras múltiples facetas del universo de Da Vinci, pero sin olvidarlas. Como señala Usher:

Leonardo vivió en dos mundos que para él estaban entrelazados por muchos intereses, y la pérdida de cualquiera de ellos hubiera sido una calamidad para sí y un detrimento de los logros en el otro campo. Sin embargo, cuando se emprende la tarea de apreciarlo, cada tipo de trabajo se debe juzgar por sus propios estándares y alcances en la secuencia de empeños del campo especificado; es una sobresimplificación decir que cualquiera de los dos mundos fue más esencial que el otro [3].

Es bajo ese enfoque que se pretenden poner de relieve, y justipreciar, los trabajos tecnológicos de Leonardo, con el fin de señalar su verdadero lugar en la historia de la ingeniería, pues hay autores que han dicho: "...cuando miramos en su historia, encontramos que difícilmente tuvo alguna influencia sobre la ciencia o la ingeniería de su tiempo. En este sentido ha sido tan sobreestimado como Roger Bacon" [4].

Los primeros años en Florencia

Hijo ilegítimo de Ser Piero, notario y terrateniente próspero, Leonardo nació el 15 de abril de 1452 en la propiedad familiar de su padre en Anchiano, una aldea de la pequeña población de Vinci, cerca de Empoli. Su madre fue una joven campesina, con quien el padre de Leonardo tuvo una relación irregular y que poco después se casó con un artesano de la región. Leonardo creció en Anchiano, con su abuelo y poco antes de 1469 se fue a vivir a Florencia con Ser Piero, donde creció, fue tratado como un hijo legítimo y recibió la educación elemental usual en aquel tiempo: lectura, escritura y aritmética. En cuanto al latín, el idioma clave del aprendizaje tradicional, Leonardo no lo estudió seriamente hasta mucho después, cuando adquirió la capacidad de entenderlo por sí mismo. Apenas a los treinta años se dedicó a las matemáticas —geometría y aritmética avanzadas— que estudió con diligencia y tenacidad; pero tampoco acá fue más allá de las etapas iniciales.

Cuando tenía unos quince años entró como aprendiz al taller de Andrés Verrocchio, donde aprendió no solamente pintura y escultura sino también artes técnico-mecánicas. En el adyacente taller de Antonio Pollaiuolo, también trabajó y probablemente allí fue atraído por los estudios de anatomía. En el taller de Verrocchio no solo se producían refinados trabajos de arte sino también complicados trabajos técnicos, como la erección de la enorme esfera de cobre encima del domo de Santa María del Fiore en 1472. En tanto que Verrocchio fue el maestro directo, Brunelleschi fue su maestro ideal, sus influencias se reconocen en los estudios técnicos del joven Leonardo.

En 1472 Leonardo fue aceptado en el gremio de pintores de Florencia aunque permaneció cinco años más en el taller de su maestro y luego trabajó independientemente hasta 1481. En sus pinturas iniciales hay muchos bosquejos técnicos —por ejemplo, bombas, armas, aparatos mecánicos—, evidencia del interés que tenía en el conocimiento de materias técnicas al principio de su carrera. Leonardo entró en relaciones con los eruditos

más prominentes de la época como Benedetto Aritmetico el matemático, hombre que se ocupaba de los asuntos prácticos, se interesaba por la industria y el comercio y, con Brunelleschi, que probablemente fue quien dirigió la atención del joven a los problemas de ingeniería y a las necesidades de la industria de la época. Aprendió del físico, astrónomo y geógrafo Toscanelli y del famoso aristotélico griego Giovanni Argiropoulo. Además existía en Florencia un hombre que ejerció sobre él una influencia profunda, pues admiraba su saber, su arte, sus escritos y hasta su propia persona: León Battista Alberti, anciano ilustre que por aquel tiempo dirigía los trabajos de construcción de la portada de la iglesia Santa María Novella [5].

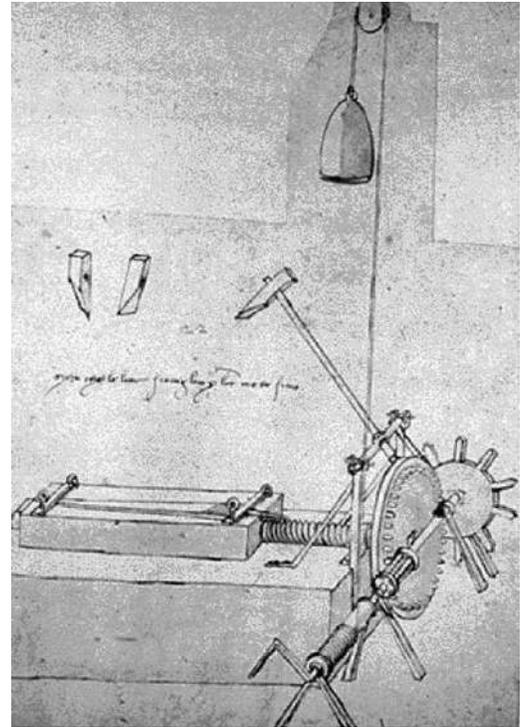
Alberti fue el mayor teórico del Renacimiento y uno de sus mejores arquitectos, que al principio gótico del movimiento opuso el ritmo del volumen. Aunque practicaba todas las artes y todas las ciencias, y escribió un *Tratado de Pintura*, para él la arquitectura era el arte por excelencia. También fue hijo ilegítimo, fue gimnasta, aprendió música sin maestro y estudió derecho, que dejó para dedicarse a la física y a la matemática. Frecuentaba a los artistas, los sabios y los artesanos, procurando averiguar sus secretos, oyéndolos y observando su labor. Para descansar de estos trabajos aprendía a pintar, a modelar, y realizaba múltiples inventos, entre otros una cámara oscura, una escritura secreta, y un misterioso calidoscopio, que causó asombro entre sus contemporáneos, pues se veían en él la luna y las estrellas levantarse detrás de un paisaje rocoso.

Alberti medía la altura de las torres, la profundidad de los mares, la marcha de los buques, la anchura de los ríos; se interesaba en la fabricación de relojes de bolsillo y de los cuadrantes solares, los mismos asuntos por los que se interesaría Leonardo. Sus escritos, casi todos en forma de diálogo, presentan la ciencia bajo un aspecto amable y familiar, gracias a una cualidad que encontramos de nuevo en Leonardo: la profundidad intelectual unida al sentido del humor [6].

Leonardo luchó por dilucidar problemas generales como la transmisión de la fuerza o de la resis-

tencia de los materiales; en un principio trató de resolverlos mediante los ensayos, hasta que llegó a un cálculo del que podía decir lacónicamente: “esto es sencillo y bueno, mejor” [7]. Uno de los componentes fundamentales de las máquinas de Brunelleschi era el tornillo, que halló amplia aplicación en los proyectos técnicos iniciales de Leonardo y también aparece en muchos aparatos para elevar agua. Empezó a construir herramientas para ahorrar trabajo, inventadas por él: diseñó máquinas para torneear y pulir y estudió la asociación de partes y el engrane de goznes y bisagras. En esos estudios, Leonardo combinó la máquina con las fuerzas vitales de la naturaleza, en particular el agua que fluye, cuyos movimientos espirales los consideró equivalentes naturales del tornillo. Los planos para un asador automático y una máquina para hacer limas son testimonio de los propósitos estrictamente prácticos de esta fase temprana. Como hemos señalado, cada idea le llevaba más lejos: para trabajar el metal necesitaba instrumentos nuevos. Por ejemplo, confeccionar limas a mano era una tarea muy trabajosa y de resultado incierto; para ello, Leonardo construyó una máquina que ejecutaba dicha labor; inventó “un método para que las limas se estriasen solas”: una gran mole suspendida del techo proporcionaba la fuerza motriz; al elevarse ésta por medio de una manivela, ponía en movimiento una rueda dentada, que a cada rotación disparaba un martillo, al mismo tiempo que un husillo empujaba automáticamente el bloque con la lima. No se olvidó de consignar el trazado oblicuo del cincel en la punta del martillo y así lo especifica en un croquis lateral.

Florencia entró en guerra y aunque Leonardo no se sentía atraído por la causa de los Médicis, se interesaba profundamente por la técnica militar y seguía los acontecimientos con gran interés. Se trataba de un período en que la técnica de la guerra sufría una transformación, en el que los recientes inventos, el dominio del hierro y el acero por el hombre, ofrecían nuevos medios de destrucción y Leonardo había llenado ya páginas de sus cuadernos de apuntes con diseños de máquinas trituradoras y rodantes, y entonces se



Máquina para hacer limas (Códice Atlántico)

sumió en el estudio de nuevos problemas. Llenó los bocetos de cuadros con dibujos de armas y material de guerra, como en una hoja que puede verse en los Uffizi y data de 1478.

Las acciones de artillería se complicaban en aquella época a causa del difícil manejo de los pesados cañones. Leonardo proyectó una cureña de tres ruedas con un gran tornillo que terminaba en unas pinzas gigantescas que levantaban el cañón. Dio mayor movilidad a otra cureña para cañones livianos engranando las uniones. Proyectó “una bombardera que no recula cuando es disparada” y un cañón liviano de varias bocas y colocó en un carro de artillería 33 cañones livianos “once de los cuales podían ser disparados a un tiempo”. Parece que Leonardo no despertó mucho interés con sus planes —Lorenzo de Médicis empleaba a otro artista florentino, Giuliano da Sangallo, como ingeniero militar— pero siguió observando el curso de la guerra y adaptando sus diseños a los requerimientos variables de la lucha [8].

Para la defensa de la fortaleza de Colle, Leonardo ideó toda clase de medios para impedir que las tropas enemigas se acercaran a los bastiones. Diseñó un sistema de vigas que salían súbitamente de las troneras y derribaban las escaleras colocadas por los sitiadores contra las murallas. Otro aparato para proteger los bastiones consistía en una gran rueda dentada colocada fuera para poner en movimiento una enorme viga con velas horizontales, como las de un molino de viento, y a la que se podía hacer girar continuamente para impedir que los enemigos pusiesen arietes o escalas contra los bastiones. Pero sus proyectos, aunque bellamente realizados no le consiguieron encargos como ingeniero militar. La guerra no duró lo bastante como para que un desconocido pudiese llamar la atención en ese campo.

Primera estadía en Milán (1482-1499)

Leonardo llegó a Milán en 1482 y parece que tuvo razones profundas para irse, el neoplatonismo prevaleciente en la Florencia de los Médicis iba contra su mente orientada a la experiencia. Además, sufría la inferioridad intelectual en que le situaba el mundo que empezaba a frecuentar y, así mismo, el resentimiento que muestra ante ese desprecio, excluido del grupo de los humanistas orgullosos, se instaura en defensor de una concepción opuesta del pensamiento, que evoca con amargura en el Códice Atlántico cuando dice

Mis adversarios dirán que, carente de preparación literaria, no podré decir lo que quisiera expresar, ignorando que mis obras están sujetas más a la experiencia que a las palabras de otros y que experiencia es la maestra de los que escriben bien; y yo, así mismo, la considero como maestra de sus maestros. Los hombres de letras no son más que recitadores y declamadores de las obras de otros y a su lado brillan los hombres de experiencia directa, intérpretes entre la Naturaleza y la Humanidad. Vosotros, con la locura del sofismo, despreciáis la matemática que contiene la verdad [9, 10].

Había otras razones para abandonar Florencia: los altos impuestos hacían que varios patrones nunca pagaran los trabajos que encargaban, la competencia profesional era extremadamente

fiera, la guerra y la peste presentaban grandes peligros físicos.

Parece que a Leonardo lo atrajo la más realista atmósfera académica de Milán y la brillante corte de Ludovico Sforza. En demanda de trabajo envió a éste la siguiente carta, redactada en su peculiar estilo.

¡Augusto señor! Estoy cansado de ver examinar las obras de los maestros e inventores de máquinas de guerra. Pero dado que éstas apenas se diferencian en cuanto a su invención y funciones de las utilizadas habitualmente, o, sin entrar en relaciones con ningún otro, me esforzaré por explicar y revelar mis secretos a Vuestra Excelencia. Estoy dispuesto a ponerlos a vuestra disposición en el momento que os parezca más oportuno y confío en que den buen resultado las cosas que a continuación voy a enumerar someramente...

Leonardo describe luego distintas máquinas bélicas, métodos de asedio, carros blindados e instrumentos náuticos de su particular invención:

En primer lugar puedo fabricar puentes más ligeros, fácilmente transportables... He inventado también otros artefactos que resisten el fuego y que son invulnerables, fáciles de construir y de desarmar, conozco también la forma de incendiar y destruir los puentes del enemigo. Segundo: en caso de asedio de una fortaleza, sé cortar el agua de los fosos, fabricar numerosos puentes levadizos y otros ingenios apropiados para semejante empresa. Tercero: cuando en un asedio la altura de la muralla o su solidez hagan inútiles las bombardas, yo sabré destruir las torres o cualquier otra fortificación... Cuarta: sé construir un tipo de bombardas de fácil transporte y emplazamiento, capaz de lanzar bombas incendiarias. El humo que éstas producen amedrentará, confundirá e infligirá terribles daños al enemigo. Quinto: sé construir cuevas subterráneas y pasadizos sinuosos sin ruido ni estruendo... Sexto: fabrico carros blindados seguros e invulnerables que, cuando penetren en las filas del enemigo, harán retroceder al más nutrido de los ejércitos: tras ellos puede ir sin miedo la infantería y a salvo de cualquier contratiempo imprevisto. Séptimo: de ser necesario, fabricaré bombardas, morteros y otras piezas de artillería... Octavo: en caso de no ser útiles las bombardas, construiré

máquinas para lanzar piedras, hondas, balistas y otros aparatos portentosos y excepcionales... Noveno: si se diera el caso, sé también de medios defensivos y ofensivos utilizables en el mar, y he inventado barcos capaces de resistir el impacto de las más poderosas bombardas... [11].

El escrito se cierra señalando la posibilidad de realizar el monumento ecuestre de Francisco, el fundador de la ínclita casa Sforza [12]. Nada de lo anterior conmovió a Ludovico y Leonardo pasó más de cinco años sobreviviendo y tratando de lograr el favor del regente, sin embargo, el artista llegó a permanecer diecisiete años en Milán, hasta que Ludovico cayó del poder en 1499. Estaba registrado entre el personal del palacio como *pintor e ingeniero ducal*. Llegó a ser altamente estimado y se mantenía ocupado como pintor y escultor y como diseñador de los festivales de la corte, también era consultado frecuentemente como asesor técnico en los campos de la arquitectura, las fortificaciones y cuestiones militares y sirvió como ingeniero hidráulico y mecánico.

En esta fase de su vida el genio de Leonardo se reveló en toda su versatilidad, así como su pensamiento poderosamente creativo en lo artístico y lo científico, adquiriendo aquella calidad de único que provocó el asombro y admiración de sus contemporáneos.

En los años de Milán, Leonardo giró aún más hacia los estudios científicos, empezó a seguirlos sistemáticamente y con tal intensidad, que le demandaban más y más su tiempo y energía y evolucionaron hacia un dominio independiente de creatividad productiva. Entre ellos surgió una necesidad creciente de anotar y escribir en forma literaria cada una de sus percepciones y experiencias, lo cual constituye un fenómeno único en la historia del arte. Indudablemente, los varios tratados que aparecieron o estuvieron disponibles durante esos decenios proporcionaron un estímulo externo. Sus investigaciones geofísicas, botánicas, hidrológicas y aerológicas también pertenecen a este período y constituyen parte de la “cosmología visible” que lucía ante Leonardo como una meta distante. Contra el conocimiento especulativo de los libros, que él ridiculizaba,

estableció hechos irrefutables ganados de la experiencia —de saber ver [13].

El encuentro con Francesco di Giorgio en Pavía en 1490, fue decisivo en la actitud de Leonardo sobre la arquitectura y el conocimiento. En ese mismo año se embarcó en un completo análisis de los canales, que desempeñaron papel vital en el Ducado de Milán y planeó escribir un “tratado sobre el agua”, que veía como un paso necesario para resolver los problemas de ingeniería hidráulica. De la misma manera como vio que la anatomía era la base indispensable para la representación del cuerpo humano. Leonardo estaba tratando de reversar el enfoque empírico de la tradición del taller. Para él, la geometría era un instrumento capaz de unificar los diversos campos de la investigación, de la mecánica a la botánica, y de la hidráulica a la anatomía. Al mismo tiempo, Leonardo estudió latín y se dedicó al aprendizaje de los clásicos. Sin embargo, muchas de sus investigaciones técnicas en esos días todavía son intentos de solucionar problemas reales, como los estudios para fundir el caballo de bronce para el monumento de Sforza.

Mucho del trabajo de Leonardo en Milán, y en otras épocas, compilado en sus cuadernos de notas y en hojas individuales, luego compilados en códices, se puede describir propiamente como “sueños tecnológicos”. En total suman miles de páginas escritas apretadamente y abundantemente ilustradas con croquis —el legado literario más voluminoso que cualquier pintor haya dejado tras de sí.

Los manuscritos de Leonardo han sido víctimas de la misma fatalidad que sus pinturas. Los dejó en testamento a su amigo Melzi, quien los enseñó entre otros a Vasari y Lomazzo y los custodió piadosamente, preparando extractos y copias. Pero murió en 1570, y su hijo Horacio relegó a los desvanes aquellos, para él, extraños textos llenos de croquis y fórmulas, escritos de manera ilegible, y de ese modo empezó la dispersión y pérdida de ese legado [14]. De más de 40 códices mencionados en las fuentes más viejas —a menudo, por supuesto, muy imprecisamente— 21

han sobrevivido; estos a su vez a veces contienen cuadernos separados originalmente y ahora empastados juntos, de modo que, por todo, se han preservado 31. A éstos deben añadirse varios grandes atados de documentos: un volumen en la Biblioteca Ambrosiana, Milán, llamado Códice Atlántico debido a su tamaño, fue reunido por el escultor Pompeo Leoni a fines del siglo XVI; su volumen hermano, luego de rodar mucho, terminó en posesión de la corona inglesa y fue ubicado en la Royal Library, Castillo de Windsor. El Manuscrito Arundel, que está en el British Museum, contiene varios fascículos de Leonardo sobre distintos temas. En 1965 dos cuadernos de notas, que se suponían perdidos, se descubrieron en la Biblioteca Nacional de España. El primero es un vasto trabajo sobre principios tecnológicos, el que da más luces para el presente escrito; el segundo es un diario intelectual que abarca catorce años, se publicaron como Los Códices de Madrid en 1974 [15].

En resumen, las colecciones principales de documentos de Leonardo están en: Institut de France, París; British Museum, Londres; Uffizi, Florencia; Biblioteca Ambrosiana, Milán; Accademia, Venecia; Royal Library, Windsor Castle; Biblioteca Reale, Turín; Biblioteca Nacional, Madrid; Victoria and Albert Museum, Londres.

Dos características hacen especiales las notas de Leonardo: su uso de la escritura especular y la relación entre palabra y dibujo. Leonardo era zurdo; de modo que su escritura especular fue fácil y natural para él. No debe considerarse como una escritura secreta. Aunque inusual, su caligrafía se puede leer claramente y sin dificultad con la ayuda de un espejo, como lo testificaron sus contemporáneos.

La segunda característica especial de los escritos de Leonardo es la nueva función dada a la ilustración concomitante con el texto. Leonardo buscaba apasionadamente un lenguaje que fuera claro y a la vez expresivo. La vivacidad y riqueza de su vocabulario eran el resultado de un intenso autoestudio y representaban una significativa contribución a la evolución de la prosa científica en el italiano vernáculo.

De otro lado, en su método de enseñanza, Leonardo dio precedencia absoluta a la ilustración sobre la palabra escrita; o sea que el dibujo no ilustra el texto; en vez de ello, el texto sirve para explicar el dibujo. Al formular sus propios principios sobre la representación gráfica —que él mismo llamó demostraciones—, Leonardo fue un precursor de la moderna ilustración científica.

Durante los años de Leonardo en Milán los dos campos de acción —el artístico y el científico— desarrollaron y moldearon su futura creatividad. Fue una especie de dualismo creativo, con mutuo acicate y también mutua presión de cada campo. Muchos de los descubrimientos técnicos de Leonardo en ese período dan la impresión de que estaba fascinado más por las potencialidades de los inventos mecánicos y menos interesado por los resultados prácticos que por la producción, el aumento y la multiplicación de la fuerza. El mecanismo de las ruedas dentadas que giran, zumban y brillan constituía para él un milagro; hacía continuamente experimentos con ellas.

Aproximadamente en 1495, antes de empezar su trabajo en la Última Cena, Leonardo diseñó y posiblemente construyó el primer robot humanoide en la civilización occidental. El robot, una consecuencia de sus primeros estudios sobre anatomía y kinesiología, registrados en el Códice Huygens, fue diseñado de acuerdo con el canon de Vitrubio. Este caballero armado fue diseñado para sentarse, agitar los brazos, y mover la cabeza mediante una cabeza flexible mientras abría y cerraba su mandíbula, anatómicamente correcta. Puede haber hecho ruidos acompañados por tambores automáticos. Por fuera, el robot está vestido con la armadura típica germano-italiana de finales del siglo XV. Este robot influiría sobre sus últimos estudios anatómicos en los cuales modeló las extremidades con cuerdas para simular los tendones y músculos [16].

El robot consistía en dos sistemas independientes: piernas con tres grados de libertad, tobillos, rodillas y caderas; y brazos con cuatro grados de libertad con articulaciones en los hombros, codos, muñecas y capacidad de agarre. Un controlador

mecánico analógico programable dentro del pecho proporcionaba la potencia y control de los brazos. Las piernas se movían por medio de una biela externa que impulsaba el cable, conectado a las posiciones claves del tobillo, la rodilla y la cadera.

La robótica actual ha sido dominada, no por las medidas del hombre, como quería Leonardo, sino por la máquina herramienta. Un verdadero hombre mecánico requiere un paradigma diferente, similar al sugerido por la filosofía humanística y la estética de Leonardo.

La inspiración de Leonardo provino de los antiguos textos griegos. Ctesibio produjo los primeros órganos y relojes de agua con figuras en movimiento. Herón de Alejandría detalló varios autómatas que se usaban en el teatro y con propósitos religiosos. La tradición griega fue revivida por Vitruvio, quien describió varios autómatas y desarrolló el canon de las proporciones, que es la base de la estética anatómica clásica. Los autores árabes también diseñaron arreglos mecánicos complejos. Por ejemplo Al-Jazari, ilustró varios diseños que también anticipaban el principio del moderno inodoro. Leonardo tomó la mayoría de las sugerencias para sus estudios mecánicos de la obra de un filósofo del siglo XIII, Jordanus Nemorarius, de ahí aprendió, por ejemplo, “todo peso desea descender al centro de la tierra por el camino más corto”, y también la idea, nueva en ese tiempo, por medio de la cual explicaba Jordanus la ley de equilibrio de la palanca [17].

Pero no solamente con el autómata fue Leonardo un profeta de automatización. A fines de 1495 y principios de 1496 Leonardo diseñó dos máquinas que sustentan esta afirmación, ambas se relacionan con el afilado y el pulido. La primera es para desbastar y pulir cilindros huecos, la otra, más complicada, es una máquina de afilar agujas para la producción en masa [18].

El 2 de octubre de 1498, se le dio a Leonardo una propiedad cercana a la Porta Verucellina de Milán y se le nombró *ingenere generale*. Se esperaba una invasión francesa y él estaba muy ocupado

en la planeación de las defensas de la ciudad. Sin embargo, los franceses entraron triunfantes en Milán en 1499 y Ludovico fue hecho prisionero y enviado a Francia.

Regreso a Florencia (1500-06)

En diciembre de 1499 o a más tardar en enero de 1500 —tres meses después de la victoria francesa— Leonardo abandonó la ciudad en compañía de Lucas Pacioli —que fue en gran medida el responsable de su entrenamiento en matemáticas y geometría— y, luego de una estadía en Mantua, llegó a Venecia donde le esperaban grandes tareas. Su fama como ingeniero era conocida por el Consejo de la República, que necesita con urgencia su orientación en el plano militar puramente técnico. Los turcos amenazaban y Leonardo recomendó que se prepararan para inundar la región amenazada. El Consejo pidió a Leonardo, constructor de obras hidráulicas y técnico de fortificaciones, informes y sugerencias para instalar un baluarte defensivo junto al río Isonzo. Leonardo viajó al teatro de operaciones; propuso erigir presas con esclusas, construyó piezas de artillería en el arsenal y a lo largo de algunas semanas no hizo otra cosa que idear ingenios para la guerra naval. Leonardo llenó incontables hojas con armas sorprendentes y muy innovadoras, capaces de atacar y hundir la flota turca. La idea de atacar un barco bajo el agua era muy antigua. Aristóteles conocía la campana de buzo y en Venecia había buceadores. Leonardo diseñó una barrena para perforar el suelo del navío; la misión del buzo es practicar dos orificios en las planchas e introducir en ellos una cabria con un mecanismo de palanca. El proyecto, sin embargo, no convenció demasiado a los jefes de la flota veneciana. Leonardo planeó entonces barcos-bomba, llenos de pólvora y astillas de madera que al encenderse estallarían. Construye barcos con espolón, provistos de una formidable palanca para fijarse a la nave enemiga por debajo de la línea de flotación, “pero procura que las maromas que mantienen a los barcos enganchados entre sí puedan cortarse a voluntad para que el navío enemigo no te arrastre al hundirse”.

Leonardo confía ciegamente en sus propias ideas, aumenta su caudal de conocimientos, lee, estudia informes referidos a los buscadores de perlas en la India. Al pie de un boceto escribe:

Este artilugio se utiliza en el mar de las Indias para subir las perlas a la superficie. Se hace de cuero con abundantes abrazaderas para que el mar no lo cierre. En la superficie espera un acompañante sobre una barca. El buceador saca las perlas y los corales, equipado con unas lentes y un peto erizado de púas. Esta especie de coraza le sirve de protección frente a los peces o a los grandes pulpos.

Diseña también una especie de flotadores, a los que se remite al tratar de las máquinas capaces de volar: “Probarás esta máquina (*voladora*) sobre un lago y te ceñirás un tubo largo para que no te ahogues en caso de caída” [19].

Inventa unos caparazones para nadar, destinados a permitir el ataque “bajo el agua”, una especie de “submarinos individuales”, con cierre hermético, un tubo de cuero que se obtura mediante una tapa, chalecos de salvamento y petos blindados a base de malla de hierro para afrontar la lucha cuerpo a cuerpo bajo el agua, daga en mano. A lo largo de esas semanas, Leonardo despliega una actividad inventora fabril, pero no olvida extremar las medidas de prudencia: “No enseñes esto a nadie, y toda gloria será para ti. Contrata única y exclusivamente a un modesto ayudante y haz que cosan este chaleco en tu propia casa”.

No es de extrañar que la mayoría de los inventos no pasasen del papel. No obstante, Leonardo hilvana una idea tras otra. Por ejemplo: calcula el tiempo necesario para aniquilar la flota turca y a renglón seguido, en sus notas, plantea un ultimátum “Si no os rendís dentro de cuatro horas, os enviaremos al fondo del mar”. Y luego exclama, regocijado: “¡Devastaré el puerto!” Y calcula que debe tocarle la mitad del botín.

Los venecianos, como expertos calculadores que eran, examinaron pronto la solución de Leonardo para fortificar la zona del Isonzo, y los costos les parecieron exorbitantes. Poseían talleres con magníficas instalaciones, constructores de barcos,

ingenieros, pero nunca pensaron en aprestar una flota poderosa.

De Venecia retornó a Florencia, donde ya estaba el 24 de abril de 1500, después de tan larga ausencia, fue aclamado con honores y reconocido como un hijo notable. Aquel mismo año fue nombrado como arquitecto experto en un comité que investigaba los daños en la fundación y en la estructura de la iglesia de S. Francesco al Monte. Los estudios matemáticos parecen haberlo mantenido lejos de la pintura la mayoría del tiempo.

Al servicio de César Borgia

La fama de Miguel Ángel en Florencia estaba bien establecida en esta época. Esto y su omnívoro “apetito por la vida” pueden explicar la decisión, en el verano del año siguiente (1502), para que Leonardo dejara Florencia y entrara al servicio de César Borgia; en el salvoconducto que éste le extendió lo ensalza llamándole “nuestro amado y excelente servidor, el arquitecto e ingeniero Leonardo Vinci”. Leonardo comenzó a trabajar con ahínco: durante diez meses viajó a través de los territorios del *condottiero* y los midió. En el curso de su actividad, para propósitos estratégicos, Leonardo preparó unos extraordinarios planos de Imola y los mapas topográficos con una elegancia y visión de conjunto admirables tales, que echaron los cimientos de la moderna cartografía; hizo distintas mediciones, anotó las distancias de los proyectos, inventó ingenios bélicos, y tuvo tiempo para ofrecer al Sultán —por medio de la delegación turca que había acudido a entrevistarse con César— los planos para construir un puente sobre el Cuerno de Oro,

de cuarenta varas de ancho, setenta de altura sobre las aguas y seiscientos de largo, de las cuales cuatrocientas irán sobre el mar y doscientas sobre tierra firme. Esto hará que el puente se sustente a sí mismo.

En la corte de César Borgia, Leonardo también se reunió con Nicolás Maquiavelo, estacionado temporalmente allí como observador político para la ciudad de Florencia. Ese encuentro debía

llevarlo a una cercana asociación y los dos hombres se juntaron en un intento por llevar a cabo uno de los sueños más fantásticos de Leonardo: construir un sistema de canales que haría al río Arno navegable de Florencia al mar. Aunque la razón primaria para el proyecto era militar, Da Vinci y Maquiavelo también tenían el comercio en mente. Soñaban con el día en que los exploradores podrían zarpar del centro de la ciudad y atracar trayendo las riquezas del Nuevo Mundo para mayor Gloria de Florencia [20].

Cuando los capitanes se sublevaron contra César, Leonardo regresó a Florencia que estaba enzarzada en una guerra contra Pisa, la urbe rival situada a orillas del Arno, y necesitaba de su famoso ingeniero. Hizo una medición experta de un proyecto para desviar el río Arno por detrás de la ciudad, entonces sitiada por Florencia, para que quedara privada de acceso al mar. El plan demostró que era impráctico, pero la actividad de Leonardo lo llevó al tema que ideara con Maquiavelo, más significativo que servía más a la paz que a la guerra; el proyecto, propuesto en el siglo XIII y ahora de nuevo bajo consideración, era construir un gran canal que sobrepasara el estrecho del Arno, que no era navegable, y uniera a Florencia, por agua, con el mar. Leonardo desarrolló sus ideas en una serie de estudios; con vistas panorámicas de las orillas del río, que son también bosquejos del paisaje de un gran encanto artístico, y con medidas exactas del terreno produjo un mapa en que se mostraba la ruta del canal (con su tránsito a través del paso montañoso de Serravalle). El proyecto, considerado el tiempo y los siglos siguientes, nunca se realizó, pero siglos más tarde la autopista de Florencia al mar fue construida sobre la ruta exacta que Leonardo escogió para el canal. Sin embargo, no se tienen ejemplos definitivos de su trabajo. Apenas con el descubrimiento de los cuadernos de Madrid se supo que en 1504, enviado probablemente por el consejo que gobernaba en Florencia, estuvo al lado del Señor de Piombino cuando los sistemas de fortificación de la ciudad fueron reparados y Leonardo sugirió un plan detallado para su

reestructuración. Sus estudios para proyectos de larga escala en la región del Arno y en Lombardía muestran que fue también un experto ingeniero hidráulico.

El período florentino también fue, sin embargo, un tiempo de intenso estudio científico; Leonardo realizó disecciones en el hospital de Santa María Nuova y amplió su trabajo anatómico a un estudio comprehensivo de la estructura y funciones del organismo humano. Hizo observaciones sistemáticas del vuelo de las aves, sobre lo cual planeó un tratado. Aún sus estudios hidrológicos, “sobre la naturaleza y movimiento del agua” se ampliaron a una investigación sobre las propiedades físicas del agua, especialmente las leyes de las corrientes, que comparó con las del aire.

Durante aquellos años en Florencia, la productividad de Leonardo también estuvo marcada por su dualismo creativo. Sólo de manera esporádica trabajó en sus pinturas. El Códice sobre el vuelo de los pájaros, escrito alrededor de 1506, marca el inicio de una segunda fase de investigación. Una vez Leonardo se dio cuenta de lo inadecuado de la fuerza humana, volvió su atención al vuelo de los pájaros. Observó que éstos confían menos en el batir de las alas que en las corrientes de aire y el viento. Por consiguiente, cómo los pájaros cuando eran golpeados por una corriente de aire, se las arreglaban para mantener el equilibrio moviendo las alas y la cola. Durante este período, compiló el Códice sobre el vuelo de los pájaros y estudió las alas mecánicas que podían imitar los complejos movimientos de las alas de los pájaros.

Regreso a Milán (1506-1513)

Cuando, en mayo de 1506, Carlos d'Amboise, gobernador del rey de Francia en Milán, solicitó a la Signoria, que Leonardo fuera a Milán durante algún tiempo, el artista no tuvo ninguna duda en aceptar la invitación cuando obtuvo el permiso. Pero lo que inicialmente fue un período limitado se convirtió en un traslado permanente de seis

años, interrumpidos solamente por una estadía de seis meses en Florencia en el invierno de 1507-1508. Admirado y colmado de honores por sus patronos Carlos d'Amboise y el rey Luis XII, quien le asignó un estipendio anual de 400 ducados, sus deberes estaban limitados a asesorar en cuestiones arquitectónicas, evidencias tangibles de lo cual son los planos de una villa-palacio para d'Amboise y, quizás, algunos bosquejos de un oratorio para la iglesia de Sta. Maria alla Fontana, que Carlos patrocinó. Leonardo también revisó un viejo proyecto revivido por el gobernador francés: el canal de Adda que uniría a Milán con el lago Como.

Comparado con el casi ligero trabajo artístico, la actividad científica de Leonardo floreció, su amor por la teoría se intensificó en sus últimos años. Estudió mecánica, anatomía y geología de una manera íntimamente interrelacionada, considerándolas gobernadas por leyes universales. Concibió el cuerpo humano como un conjunto de mecanismos perfectos. La geometría le era de sumo interés y estaba particularmente fascinado por las transformaciones de las superficies de las formas geométricas, que aplicó a la hidrología y los estudios del corazón. Sus estudios anatómicos alcanzaron una nueva dimensión en colaboración con un famoso anatomista de Pavía, Marcantonio della Torre. Trazó un plan para un trabajo general que incluiría no solamente reproducciones exactas y detalladas del cuerpo humano y sus órganos sino también anatomía comparada y todo el campo de la fisiología. Incluso pensó en acabar su manuscrito anatómico en el invierno de 1510-1511. Más allá de aquello, sus manuscritos están repletos de estudios matemáticos, ópticos, mecánicos, geológicos y botánicos que deben entenderse como datos para su "cosmología perpetua". Esto llegó a ser impulsado cada vez más por una idea central: la convicción de que la fuerza y el movimiento como funciones mecánicas básicas producían todas las formas en la naturaleza orgánica e inorgánica y les daban su forma y, más aún, el reconocimiento de que esas fuerzas funcionales operaban de acuerdo con leyes ordenadas y armoniosas.

Estadía en Roma (1513-1516)

D'Amboise murió en 1511. Leonardo permaneció en Milán hasta el 24 de septiembre de 1513, pero los eventos políticos hicieron que, ya de sesenta años, se trasladara a Roma, donde permaneció tres años, mientras Donato Bramante construía San Pedro, Rafael pintaba los últimos salones de los nuevos apartamentos del Papa, Miguel Ángel trataba de completar la tumba del Papa Julio, y muchos artistas más jóvenes como Peruzzi, Timoteo Viti y Sodoma estaban activos allí. Los borradores de amargas cartas traicionan el disgusto del viejo maestro que trabajaba en su estudio sobre matemáticas y experimentos técnicos o, paseando por la ciudad, revisaba antiguos monumentos. Un mapa magníficamente ejecutado de los Pantanos de Pontine sugiere que Leonardo fue al menos consultor para un proyecto de restauración que Giuliano de Médicis ordenó en 1514.

Los años en Francia (1516-1519)

Con una vida tan solitaria, es fácil entender porqué Leonardo, a pesar de sus sesenta y cinco años, decidió aceptar la invitación del joven rey Francisco I para entrar a su servicio en Francia. A fines de 1516 abandonó Italia y pasó allí tres años de su vida en una pequeña residencia cerca del palacio estival del rey en Amboise, sobre el Loira. Primer pintor, arquitecto y mecánico del rey era el orgulloso título que tenía; sin embargo, el admirador monarca le dio toda la libertad de acción.

Para el rey trazó planos del palacio y jardín de Romoratin, destinado a ser la residencia de la Reina Madre. Pero el proyecto, trabajado cuidadosamente, combinando lo mejor de las características de las tradiciones italianas y francesas en arquitectura de palacios y paisajes, tuvo que detenerse porque la región se vio amenazada por la malaria.

Leonardo gastó la mayor parte de su tiempo ordenando y editando sus estudios científicos. Aparecieron los borradores finales de su trata-

do sobre la pintura y unas pocas páginas sobre anatomía.

El 2 de mayo de 1519, Leonardo murió en Cloux y fue enterrado en la capilla del palacio de Saint-Florentin. Pero la capilla fue devastada durante la Revolución Francesa y completamente demolida a principios del siglo XIX. Por consiguiente, su tumba ya no se puede localizar. Su discípulo Francisco Melzi fue el heredero de su legado artístico y científico.

Leonardo ingeniero

Podría decirse que antes que ingeniero, Leonardo fue científico racional ya que, a pesar de que hizo extenuantes esfuerzos para enseñarse a sí mismo y llegar a ser un erudito en idiomas, ciencia natural, matemática, filosofía e historia, como una mera lista del amplio contenido de su biblioteca puede atestiguarlo, siempre fue un empírico de la observación visual. Pero precisamente así —gracias a su genio— desarrolló su propia “teoría del conocimiento”, única en su clase, en la cual el arte y la ciencia forman una síntesis. Frente a todos los logros del genio creativo de Leonardo, se hace irrelevante la cuestión de cuánto acabó y cuánto no. La cuestión crucial es la fuerza intelectual inherente a cada una de sus creaciones. Esta fuerza ha permanecido operativa constantemente hasta el día de hoy [21].

En Leonardo, la mecánica también provino de la práctica artística, con la cual se hizo muy familiar como arquitecto e ingeniero. Durante toda su vida Leonardo fue un constructor inventivo, siempre se sintió a sus anchas con los principios de la mecánica de su época y contribuyó de muchas maneras a su avance. Parece ser que el estudio de las armas, la ballesta en particular, resultó fundamental para que dirigiera su atención a los temas de la mecánica teórica. Las áreas que le interesaron, en su denominación moderna, fueron: el principio de la suma de velocidades, la ley de composición de fuerzas, el concepto de fibra neutra y el papel que desempeña el centro de gravedad en la conducta de un cuerpo en movimiento [22].

Su libro modelo sobre la teoría de la mecánica, que apareció en Milán al final del decenio de 1490, fue descubierto en el Códice de Madrid 8937. Su importancia radica menos en su descripción de máquinas específicas o herramientas de trabajo que en su uso en modelos de demostración para explicar los principios mecánicos básicos y las funciones empleadas en la construcción de maquinaria. Leonardo estaba especialmente preocupado con los problemas de fricción y resistencia. Estos elementos —rosas de tornillo, piñones, cilindros hidráulicos, aparatos de vaivén, engranajes de transmisión y similares— se describen individualmente o en varias combinaciones; y aquí, también, el dibujo toma preeminencia sobre la palabra escrita. Como en sus dibujos anatómicos, Leonardo desarrolla principios definitivos de representación básica —estilización, patrones y diagramas— que garantizan una demostración precisa del objeto en cuestión.

Con el transcurso de los años su interés en la mecánica pura se mezcló cada vez más con su interés en la mecánica aplicada. Leonardo se dio cuenta de que las fuerzas que trabajaban en las leyes básicas de la mecánica operaban en todas partes en el mundo orgánico e inorgánico. Ellas determinaban, lo mismo, la naturaleza inanimada como la animada, así como al hombre. Finalmente, *fuerza* llegó a ser el concepto clave para Leonardo, que como *virtù spirituale* (propiedad espiritual) conforma y rige el cosmos. Por ello escribió: “La instrumental o mecánica es la más noble y útil de todas, puesto que por medio de ella ejecutan sus acciones todos los cuerpos vivos que tienen movimiento” [23].

Siempre que Leonardo sondeaba los fenómenos naturales, reconocía la existencia de fuerzas mecánicas primigenias que gobiernan la forma y función del universo: en sus estudios sobre el vuelo de los pájaros, en el cual basó su idea juvenil sobre la factibilidad de aparatos voladores y lo llevó a una investigación exhaustiva sobre el elemento aire; en sus estudios del agua, el transportador de la naturaleza, en el cual estaba interesado tanto en las propiedades físicas como en las leyes de movimiento de las corrientes; en sus

investigaciones sobre las leyes de crecimiento de las plantas y los árboles así como de las estructuras geológicas de la tierra y la formación de las colinas; y finalmente, en sus observaciones de las corrientes de aire, que evocaban la imagen de la llama de una bujía o la pintura de un pedazo de nube o una voluta de humo. En sus dibujos, especialmente en sus estudios de remolinos, basados en los numerosos experimentos que llevó a cabo, Leonardo de nuevo encontró una forma estilizada de representación que fue única de él: descomponer el fenómeno en sus partes constitutivas —las trazas de agua o vórtices del remolino— que al mismo tiempo preservaba la pintura completa. Visión analítica y sintética.

Entonces, para todos los dominios separados del conocimiento, la ciencia de Leonardo ofreció una pintura unificada del mundo: una cosmogonía basada en *saper vedere*. Su sabiduría final es que todos los trabajos de la naturaleza están sujetos a una ley de necesidad y a una ley de orden creada por el Primo Motore, el divino “Primer Motor Inmóvil”. “Maravillosa es tu justicia, oh Primer Motor, Tú que has previsto que ninguna potencia carezca del orden y el valor de tu necesario gobierno” [24].

En resumen, las manifestaciones ingenieriles —que no pueden separarse de las artísticas, arquitectónicas y científicas— se ven en sus construcciones civiles, en las máquinas de guerra terrestres, las máquinas para volar, las máquinas de uso civil, las máquinas hidráulicas y marítimas.

Obras civiles

Para la construcción del canal a base de esclusas que salvara los obstáculos naturales entre Florencia y el mar, Leonardo proyectó túneles e inventó máquinas, como excavadoras, grúas y calandrias. Los obreros trabajaban a base de pico y pala; las tormentas de otoño provocaban corrimientos de tierra y, en consecuencia, hubo que suspender las obras. Pisa todavía resistió el asedio cinco años: cayó cuando los florentinos consiguieron que un pirata bloqueara la salida

al mar. Las grúas y aparatos elevadores servirían para otra obra: Leonardo propuso elevar el baptisterio de Florencia con la ayuda de cabrias hidráulicas para colocarlo sobre un pedestal más alto que descansaría sobre arcadas.

Puede señalarse, también, que Leonardo estaba muy interesado en los puentes modulares retráctiles. Este proyecto complejo fue diseñado para superar el foso frente a una villa —probablemente de Carlos d’Amboise, el gobernador francés de Milán— para mantener alejados a los intrusos.

Mecánica aplicada

Como hemos señalado, lo más novedoso de las contribuciones técnicas de Leonardo es su análisis de los componentes (los órganos) de las máquinas, llevado a cabo durante el decenio de 1490. Él consideró las máquinas como ensamblajes de distintos dispositivos elementales, y sistemáticamente las descompuso en sus *órganos básicos* estudiando su rendimiento, es decir desarrolló lo que podríamos llamar la anatomía de las máquinas. Consideremos algunos de sus elementos preferidos, tomados de la exhibición del Istituto e Museo di Storia della Scienza, Florencia [25].

El tornillo y la rueda dentada

Leonardo clasificó metódicamente los diferentes tipos de tornillos. Buscó medir su potencia y especificar sus aplicaciones potenciales en las máquinas y las operaciones mecánicas. También diseñó máquinas para hacer tornillos. Dedicó

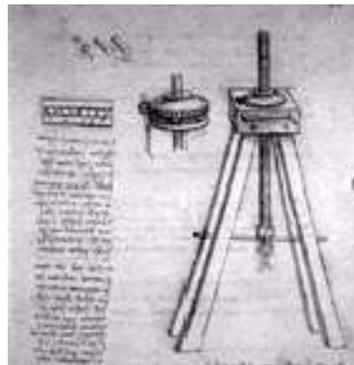


especial atención a los piñones, concentrándose en los perfiles de los dientes y clasificando con precisión los tipos de movimientos producidos por varias combinaciones de ruedas dentadas y piñones.

Poleas, bloques de poleas, ejes y rodamientos

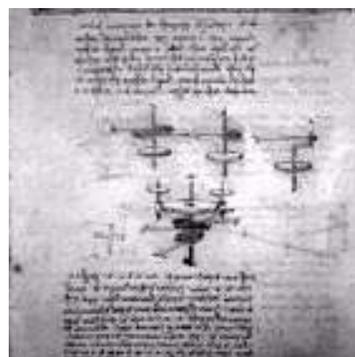
Leonardo hizo énfasis en las ventajas del uso eficiente de los conjuntos de poleas y las poleas, sobre todo para facilitar el levantamiento de cargas pesadas.

También analizó muchos sistemas para soportar ejes móviles en particular para disminuir la fricción. Sus diseños de rodamientos para ejes verticales y resistentes a la presión son notables.



Mecanismos de cigüeñales y volantes

Leonardo sugirió el uso de mecanismos de cigüeñales para convertir el movimiento rotatorio en lineal, como en el resorte de la máquina de



cuerda automática del Códice de Madrid I. También analizó en detalle el papel de las ruedas volantes en facilitar y regular el movimiento de los ejes rotativos.

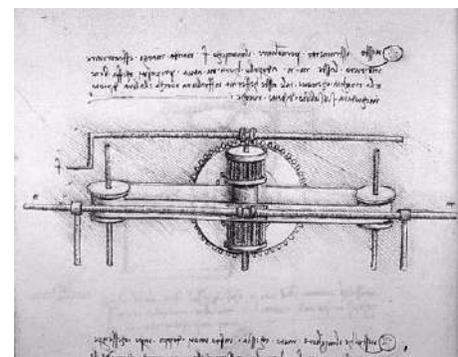
Resortes y levas

Leonardo diseñó lo que se puede llamar correctamente un catálogo visual de resortes. Recalcó su utilidad en cerraduras y en la relojería, y propuso soluciones a la fuerza regulada. También diseñó una máquina para hacer resortes. Su interés en las levas, así mismo, está ligado a la misma determinación de mejorar y regular los relojes, como se muestra en sus estudios de los escapes del péndulo y en los escapes con impulsor y leva sinusoidal.



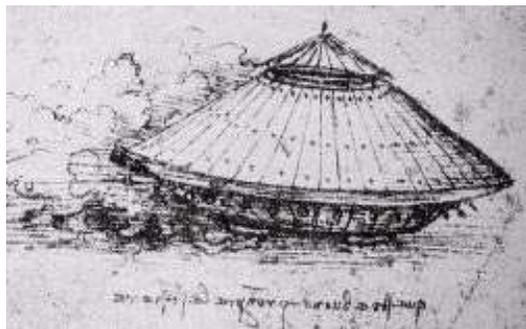
Transmisión con banda

Algunas veces Leonardo hizo uso de cuerdas y correas para generar movimiento rotatorio o lineal alternado a partir de movimiento rotatorio continuo, como el producido por una rueda hidráulica o un animal.



Máquinas de guerra

Es curiosa y desconcertante la actitud de Leonardo frente a la guerra y los aparatos bélicos. Personalmente era un hombre muy pacífico, a pesar de su formidable fuerza física andaba desarmado, contra la costumbre de la época.



Las máquinas de guerra que con tanta seguridad proponía Leonardo, en su mayoría quedaron reducidas a meros proyectos, pues no se construyó ni un solo carro blindado ni una sola máquina de asedio, la realización de tales ingenios era harto problemática. De acuerdo con algunos autores, a la fértil inteligencia de Leonardo no le interesaba más que la idea, y a menudo se perdía en divagaciones artísticas muy interesantes de problemas técnicos que nada tienen que ver con la realidad; la conclusión de las obras le tenía sin cuidado. En todo esto lo más asombroso y desconcertante es esa extraña mezcla del detalle calculado con suma minuciosidad y amor y la genial despreocupación de lo esencial. Por ejemplo: equipa el carro de hoces o de cuchillas, conocido por ese nombre desde la Antigüedad, con un complejo engranaje de sistemas giratorios; diseña un tanque, utilizado ya siglos atrás, incorporándole elementos muy ingeniosos; una torreta de observación, un mecanismo de transmisión de fuerza a las ruedas—un *motor*, operable manualmente— y cañones, confiando al futuro la invención de las fuerzas para mover semejante mole.

A primera vista las máquinas de guerra son geniales en todos sus detalles; en el fondo se trata casi siempre de paráfrasis artísticas, de alegorías de su estado anímico trasladadas al papel con

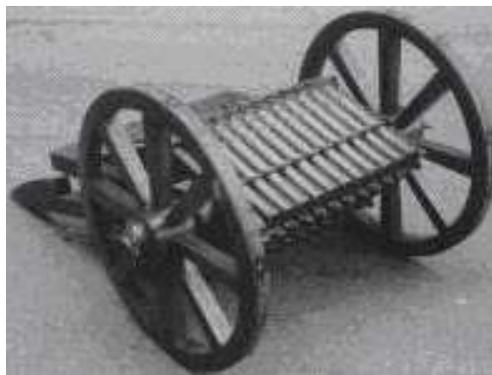
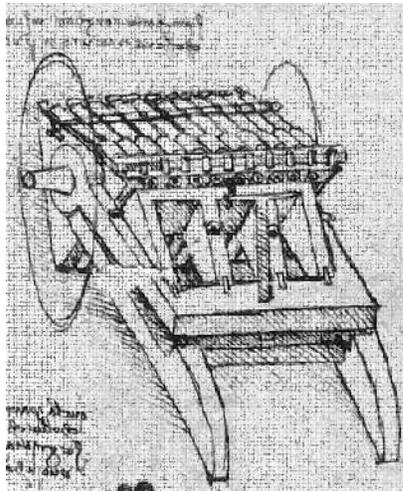
trazos maravillosos. Los morteros escupen una lluvia de metralla, en realidad balas metidas en un saco de cuero que se rompe justo al salir por la boca del arma, dispersando su contenido en amplio abanico. Pero el invento no acaba aquí: no se trata de balas de plomo corrientes, pues van provistas de un sistema de encendido, es decir, se convierten en autónomas antes de estallar. Evidentemente ésta es una fantasmagoría pirotécnica de Leonardo, pues entonces la tarea de hacerlas explotar en el momento preciso calculando exactamente el encendido de tiempo era un problema irresoluble. Recordemos que la espoleta retardada se inventaría en el siglo XIX.

No obstante, la técnica armamentista estaba relativamente desarrollada en vida de Leonardo. Los talleres de fundición de piezas de artillería de Milán gozaban de merecida fama. En una hoja Leonardo dibujó una enorme grúa de la que pende un cañón listo para ser izado por medio de cabrias y palancas. Sus dimensiones sobrepasan con mucho las medidas habituales; las distintas piezas y accesorios están recogidos con gran fidelidad; los obreros constituyen un espléndido estudio de movimiento, pugnando al lado del colosal cañón; los escorzos están resueltos con brillantez. Las técnicas de asedio son de lo más variado: comparándolas unas con otras se observan métodos muy antiguos al lado de otros sorprendentemente *modernos*. En uno de los dibujos se ve un muro coronado de almenas, y al enemigo aproximándose con escalas de asalto; para la defensa Leonardo concibe un sistema de palancas que recorre el muro y se proyecta desde dentro hacia fuera derribando escalas. El inventor diseña los soportes que hay que encajar en el muro para maniobrar los mecanismos. El método es plenamente medieval. Sin embargo, la artillería había revelado su tremendo poder, y en consecuencia Leonardo proyecta un fortín sobre una superficie llana, poligonal, similar a los que se construirían en el siglo XVIII.

La duplicación, la multiplicación constituía una de sus ideas favoritas, y así lo demuestra el análisis de sus máquinas de guerra. A Leonardo no le bastaba con inventar nuevas piezas de

artillería; concibió, además, un cañón de vapor que, con alusión mistificadora a una pretendida obra de Arquímedes, denominó el architronito o architronador; sobre una caja con carbones encendidos se colocaba un recipiente lleno de agua. Al calentarse ésta desprendía vapor que era dirigido hacia abajo, gracias al tornillo de Arquímedes, proyectando las balas como por arte de magia. Máxime al ver su furia y oír su estruendo. Leonardo llegó, incluso, a poner ruedas a este artefacto y a dotarlo de un dispositivo regulador del tiro, pero nunca entró en servicio.

Las piezas de artillería las concebía como tubos de un órgano, con cinco, diez, doce bocas.

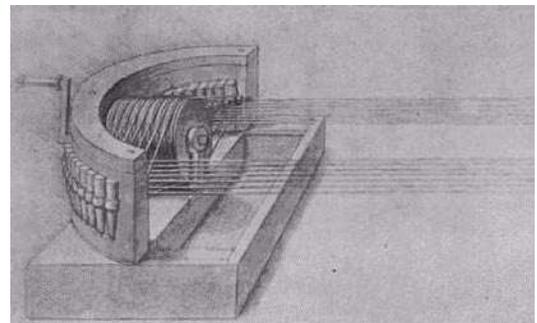


Ametralladora con 33 bocas de fuego. Diseño de Leonardo (Código Atlántico) y réplica del Museo Nacional de Ciencia "Leonardo da Vinci", Florencia

Esta idea sería puesta en práctica siglos más tarde como la ametralladora primitiva o el lanzacohe-tes múltiple ruso u *órgano de Stalin*. Leonardo también se ocupó de los proyectiles; estudió la resistencia del aire y diseñó obuses de líneas aerodinámicas elegantes y precisas, que nosotros, por desgracia, conocemos bien.

Máquinas de uso civil

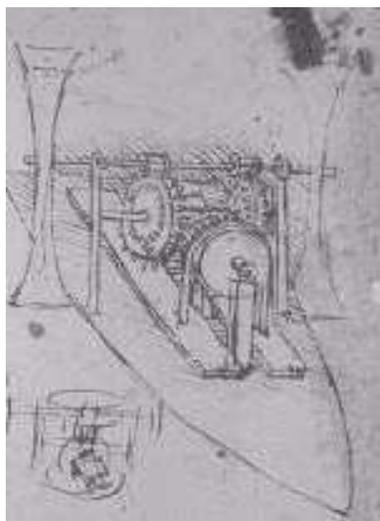
Cada idea le lleva más lejos: para trabajar el metal necesitaba instrumentos nuevos. Confeccionar limas a mano era una tarea muy trabajosa y de resultado incierto. Así, Leonardo construyó una máquina que ejecutaba dicha labor; inventó "un método para que las limas se estriasen solas": una gran mole suspendida del techo proporcionaba la fuerza motriz; al elevarse ésta por medio de una manivela, ponía en movimiento una rueda dentada, que a cada rotación disparaba un martillo, al mismo tiempo que un husillo empujaba automáticamente el bloque con la lima. El inventor no olvidó consignar el trazado oblicuo del cincel en la punta del martillo y así lo especifica en un croquis lateral.



Para mover grandes masas precisaba instrumentos de palanca. Leonardo se enfrentó una y otra vez con el problema de multiplicar la fuerza del hombre. Estudió las transmisiones a base de tornillos y ruedas dentadas, y proyectó grúas formidables para erigir columnas. Para esto necesitaba maromas y sogas. La cordelería era un oficio antiquísimo, y Leonardo inventó un ingenio para trenzar sogas, que él pensaba que acabaría con el gremio de los cordeleros.

Máquinas hidráulicas y marítimas

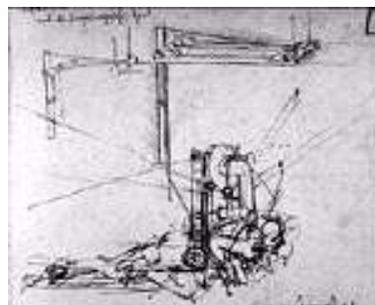
Sus hermosos diseños son insuperables, siempre que se ha intentado confeccionar maquetas a partir de sus dibujos, éstos han perdido parte de su encanto, pues los prototipos, soportes pasivos de la contemplación ajena, nos recuerdan cosas a las que hoy ya estamos acostumbrados; un traje de buzo, muy parecido a los que se usan en la actualidad, aunque la capa protectora sea de cuero en vez de goma; aletas para nadar, iguales a las utilizadas por los hombres rana durante la última guerra; *un vapor de ruedas*, que no es, claro está, un vapor en el sentido estricto de la palabra sino un barco movido por paletas que giran impulsadas por manivelas o, en los proyectos más acabados, por los pies: largos estribos desembocan por medio de correas de transmisión, en un mecanismo de engranajes que mueven el eje de la rueda de paletas. Un barco de doble fondo, de construcción sobria en apariencia y casi elegante, que sin embargo en aquella época barco de paletas resultaba ser una tarea insoluble.



Esta legión de inventos náuticos se gestó en Venecia a lo largo de unas pocas semanas, pero ni uno solo de los documentos de la República se refieren al tema. Si hoy los conocemos, es gracias a los cuadernos de Leonardo.

Máquinas para volar

En una de sus fases iniciales de investigación, Leonardo visualizó máquinas volantes complejas con alas que se baten. La máquina era operada con la fuerza muscular de un piloto acostado, que activaba las alas moviendo las piernas y los brazos. En otro proyecto, el piloto está erguido y mueve el aparato con los brazos, las piernas y la cabeza. Leonardo también consideró el uso de un motor de resorte que podía volverse a enrollar durante el vuelo. Planeó ensayar los vuelos y diseñó sistemas de seguridad para los choques usando pieles infladas de animales absorbedores de impacto.



Vuelo con velas

La aerología y la meteorología fueron partes integrales de la investigación de Leonardo sobre el vuelo. Diseñó anemómetros e higroscopios para medir la resistencia del aire en el vuelo. Comparó el aire con el agua, el vuelo con la natación. Como en ésta, un cuerpo que vuela batiendo sus alas se mueve hacia delante ejerciendo un empuje contrario. En una de las máquinas volantes, el piloto iba en un casco como el de un bote. Para Leonardo, los peces volantes, que pueden nadar y volar, ofrecen una prueba viviente de la analogía que liga a todos los seres vivos.

Ninguna de sus ideas ha tenido que esperar un lapso de tiempo tan dilatado —hasta nuestros días— para ser llevada a la práctica. Ninguno de sus inventos —que, en realidad, a menudo son una especie de monólogo del autor consigo mismo, que dice: “se debería...” o “se toma...” como si todo estuviera solucionado y únicamente

faltara poner manos a la obra— ha fascinado tanto a las gentes de hoy como esos dibujos y cálculos sobre el vuelo humano. No se puede afirmar con certeza que Leonardo llegara a construir un prototipo, pero cae dentro de lo posible. Él voló sobre la tierra, pero en alas de su espíritu.

Leonardo inventó un artefacto aéreo con un armazón de alambre de hierro y superficies montadas en tela “cuyos poros se han cerrado a base de almidón”, e incluso sopesó la posibilidad de realizar “una pequeña maqueta de papel”. Diseñó un paracaídas cuadrado y escribió lleno de confianza: “Con una tienda de tela de doce varas de longitud y otras tantas de anchura, una persona puede lanzarse sin temor alguno desde la altura que desee”. Pero su deseo más hondo, su sueño de Ícaro, consistió en volar con grandes alas, es decir, imitar el vuelo de los pájaros. Durante el período milanés, Leonardo abordó los estudios preliminares, observó la resistencia del aire y anotó la siguiente norma general: “Con un objeto se ejerce la misma fuerza contra el aire que la que éste ejerce sobre el objeto”. Y prosigue Leonardo:

Ves cómo las alas del águila, al batir contra el aire, hacen que la pesada ave se mantenga a gran altura sobre el aire enrarecido. Ves también cómo el aire marino impulsa al barco cargado hasta la borda al chocar contra las velas.

Y luego añade en tono de júbilo: “Estas razones evidentes permiten deducir que el hombre logrará someter al aire y elevarse sobre él cuando sea capaz de construirse unas grandes alas que venzan la resistencia que opone el aire”. Decidido a construir esas “grandes alas batientes”, Leonardo se dedicó a estudiar la conformación de las alas de los pájaros. Una libreta de apuntes, que data de su época florentina, recoge sus observaciones. Llevó a cabo innumerables experimentos con el fin de calcular la energía humana, única fuerza motriz de que disponía, y pensó que podía alcanzar una potencia de 425 kg por medio de unos mecanismos accionados por manos y pies; incorporó además al artificio muelles y resortes e inventó dispositivos de sujeción. Diseñó alas con

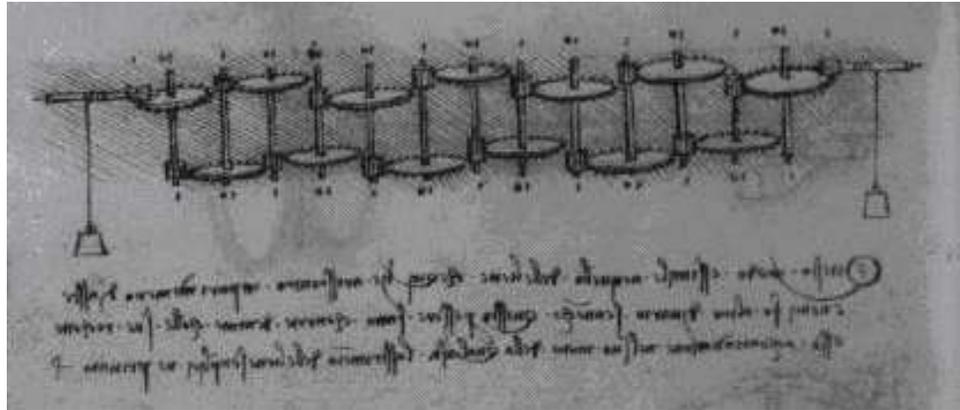
las formas más diversas, y siempre pendiente de los detalles más nimios, ideó accesorios que aumentarían las comodidades del invento: escaleras para subir mejor al aparato, amortiguadores... El revestimiento había de ser de tafetán, endurecido con engrudo reforzado con una funda reticular de apretada malla.

Sumido en esta borrachera de inventos, su cuadernillo de apuntes, fiel reflejo de su alma, nos muestra a un Leonardo estudioso y envidioso del vuelo de los pájaros, pero filósofo al mismo tiempo. En una ocasión escribe con tono doctoral La última página, que parece un corte transversal de su incansable cerebro, recoge dos dibujos: una corriente de agua y la forma de represarla y un mecanismo para levantar un árbol formidable, y debajo, una serie de anotaciones propias de su diario. Y a renglón seguido estas líneas en las que se ha querido ver la prueba de que los vuelos de Leonardo fueron reales, no un sueño o una fantasía poética: “el gran pájaro emprenderá su vuelo desde la espalda del cisne [la colina del Cisne en Florencia] y su fama correrá de boca en boca de un extremo a otro del mundo” [26].

La máquina de sumar

Vale la pena mencionar otro aspecto del genio de Leonardo. El doctor Roberto Guatelli fue un experto en Leonardo da Vinci reconocido mundialmente y había construido incontables réplicas de sus diseños, con la ayuda de sus cuatro ayudantes incluido su hijastro Joe Mirabella. Poco después del descubrimiento de los cuadernos de Madrid, en 1967, fue a examinar la copia que tenía la universidad de Massachusetts y encontró la imagen de una calculadora similar a una que había visto en el Códice Atlántico.

Usando los dos esquemas, el doctor Guatelli construyó una réplica en 1968, la cual fue usada en una exposición de la IBM. En la explicación de la réplica se dice que es un aparato para hacer cálculos, una versión primitiva de la calculadora actual. El mecanismo de Leonardo mantiene una relación constante de diez a uno en cada una de sus trece ruedas para registrar dígitos. Por cada



revolución del primer manubrio, la rueda de las unidades gira levemente para registrar un nuevo dígito entre 0 y 9. Consistente con la relación diez a uno, la décima revolución del primer manubrio hace que la rueda de las unidades complete su primera revolución y registre cero, lo que a su vez hace girar la rueda de las decenas de 0 a 1. Cada rueda adicional que marca las centenas, los miles, etc., opera en la misma proporción. Al bosquejo de Leonardo se le hicieron ligeros refinamientos para dar una vista más clara de cómo cada una de las trece ruedas puede operarse independientemente y seguir conservando la relación 10/1. El diseño de Leonardo muestra pesas en los extremos para demostrar la uniformidad de la máquina.

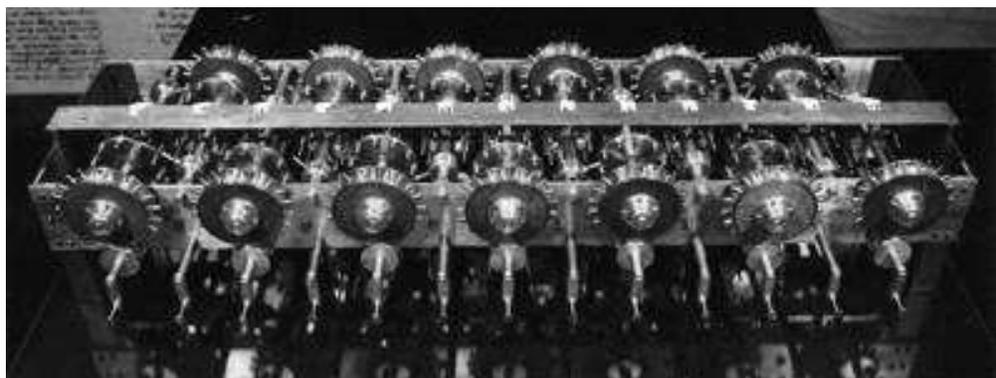
Sin embargo, la réplica provocó gran controversia, pues algunos profesores argumentaban que el dibujo de Leonardo no era de una calculadora sino de una máquina de proporciones. Una revo-

lución del primer eje ocasionaría 10 revoluciones en el segundo eje y 10^{13} en el último. Tal máquina no podría construirse debido a la enorme fricción que se produciría. Se decía que el doctor Guatelli “había usado su propia intuición e imaginación para ir más allá de lo establecido por Leonardo”. La votación quedó empatada, sin embargo la IBM retiró la controvertida réplica de la exhibición.

El doctor Guatelli murió en setiembre de 1993 a la edad de ochenta y nueve años. El paradero de la réplica se desconoce, posiblemente esté en una bodega de la IBM. Joseph Mirabella todavía tiene su taller en Nueva York, con muchas réplicas a mano [27].

Conclusión

La alegría que supone redescubrir ideas y hallazgos modernos en los dibujos de Leonardo no debe inducirnos al error de considerarlo descubridor



original de todo, el inventor por antonomasia, pues muchas de sus ideas eran conocidas desde mucho antes. Hay que comprender que el logro de un artista es un fin en sí mismo y de valor permanente a pesar de los cambios en estilos y gustos con el tiempo. El logro de un ingeniero, por el contrario, es meramente una contribución al flujo de logros, en los cuales la identidad de las obras individuales es eclipsada por todas las circunstancias naturales de la vida social. Los que están al principio de las cosas atraerán menos la atención que quienes las llevan a la aplicación práctica. Así Leonardo echó los cimientos de nuevas ciencias experimentales; se alejó del mero empirismo hacia conceptos de la ciencia de la mecánica aplicada aptos para la aplicación general en el mundo industrial, en ese sentido fue el primer ingeniero moderno.

Leonardo tuvo menos influjo porque sus escritos no tuvieron la suficiente difusión y algunos se perdieron. ¿Qué hubiera pasado si Galileo y Kepler los hubieran conocido?

Cuenta la leyenda que Leonardo murió preguntando si algunos de sus bocetos se había llevado a la ejecución. Aunque los historiadores dudan de la veracidad de este relato, lo cierto es que ese pensamiento aparece escrito en sus cuadernos, reflejando cuánto le pesaba no haber logrado más [28].

Es cierto que, de la maquinaria esquematizada en sus notas, las características más novedosas eran demasiado avanzadas para la técnica de su tiempo. Sin embargo, muchos de sus inventos fueron puestos en práctica por Leonardo y sus seguidores, de modo que aun sin sus manuscritos estos aparatos ejercieron una poderosa influencia en su tiempo. De acuerdo con Usher, la influencia de Leonardo es claramente perceptible durante el siglo siguiente a su muerte, directa o indirectamente [29].

Leonardo se merece la fama en nuestra profesión no tanto por ser un ingeniero practicante sino por ser un profeta del futuro de la ingeniería y mientras más se estudia su legado más se comprende esa dimensión genial del gran florentino [30].

Referencias

1. Sanz de Cepeda, E., *Leonardo da Vinci*, Reus, Madrid, 1944, p. 92.
2. White, Michael, *Leonardo. El primer científico*, Plaza & Janés, Barcelona, 2002, p. 103.
3. Usher, Abbot Payson, *A History of Mechanical Inventions*, Dover Publications Inc. New York, 1982, p. 212.
4. Sprague de Camp, L. *The Ancient Engineers*, Barnes & Noble, New York, 1993, p. 362.
5. Baci, M., *Leonardo*, Diseuropa, Barcelona, 1966, p. 23.
6. Bérence, Fred, *Leonardo de Vinci, obrero de la inteligencia*, Gandesa, México, 1954, p. 71.
7. Vallentin, Antonina, *Leonardo da Vinci. La trágica búsqueda de la perfección*, Losada, Buenos Aires, 1951, p. 23.
8. Calvi, Gerolamo, *Leonardo da Vinci*, Morcelliana, Brescia, 1936, p. 44.
9. Echeverri, Jorge Ángel, *Mito y realidad en Leonardo de Vinci*, Universidad de Santiago, Santiago, 1963, p. 32.
10. Solmi, Edmondo, *Scritti vinciani*, Soc. Editrice La Voce, Florencia, 1924, p. 67.
11. Friedenthal, Richard, *Leonardo da Vinci*, Salvat, Barcelona, 1987, p. 36.
12. Debolini, Francesca, *Leonardo*, Sociedad Editorial Electa, Madrid, 1999, p. 40.
13. Doeser, Linda, *La vida y obras de Leonardo da Vinci*, El Sello Editorial Ltda., Madrid, 1997, p. 113.
14. Mauclair, Camilo, *Leonardo de Vinci*, Editorial Schapire, Buenos Aires, 1943, p. 111.
15. Reti, Ladislao, "The Two Unpublished Manuscripts of Leonardo da Vinci in the Biblioteca Nacional of Madrid", *Burlington Magazine*, 110:10-24, January/February 1968, February 1969, pp. 111-191.
16. <http://www.museoscienza.org/leonardo>, 2003.
17. Foley, Vernard y Werner Soedel, "Contribución de Leonardo a la mecánica teórica", *Investigación y Ciencia*, N.º 122, Nov., 1986, p. 84.
18. Dibner, Bern, "Leonardo: Prophet of Automation", *Leonardo da Vinci Technologist*, Ladislao Reti and Bern Dibner (eds.), Burndy Library, Norwalk, Connecticut, 1969, p. 37.
19. Dugas, René, *A History of Mechanics*, Dover Publications Inc. New York, 1988, p. 72.

20. Masters, Roger D., *Fortune is a River; Leonardo da Vinci and Niccolo Machiavelli's Magnificent Dream*, Plume, New York, 1999, p. 83.
21. *Leonardo da Vinci - Engineer and Architect*, The Montreal Museum of Fine Arts, Montreal, 1987.
22. Foley, Vernard y Werner Soedel, "Contribución de Leonardo a la mecánica teórica", *Investigación y Ciencia*, N.º 122, Nov., 1986, p. 84.
23. Vinci, Leonardo da, *Cuadernos de Notas*, Edimat Libros, Madrid, 1999 p. 265.
24. Reti, Ladislao, "Leonardo da Vinci the Technologist: The Problem of Prime Movers", *Leonardo da Vinci Technologist*, Ladislao Reti and Bern Dibner (eds.), Burndy Library, Norwalk, Connecticut, 1969, p. 63.
25. <http://galileo.imss.firenze.it/news/mostra/6/e66.html>, 2003.
26. Friedenthal, Richard, *Op. cit.*
27. Kaplan, Erez, "The Controversial Replica of Leonardo da Vinci's Adding Machine" http://www.dotpoint.com/xnumber/pic_leonardo_calc.htm.
28. Foley, Vernard, "Leonardo y la invención de la llave de rueda", *Investigación y Ciencia*, Marzo, 1998, p. 76.
29. Usher, Abbot Payson, *Op. cit.*
30. Kirby, Richard Shelton *et al.*, *Engineering in History*, Dover Publications Inc. New York, 1990, p. 124.