

MANUEL SILVA SUÁREZ, ed.

**TÉCNICA E INGENIERÍA
EN ESPAÑA**

VI

EL OCHOCIENTOS
De los lenguajes al patrimonio

Enrique Alarcón Álvarez	José Ignacio Muro Morales
Carles Alayo i Manubens	Javier Ortega Vidal
José Vicente Aznar García	Stefan Pohl Valero
Emilio Bautista Paz	Francesc Rodríguez Ortiz
Vicente Casals Costa	Amaya Sáenz Sanz
Juan Ignacio Cuadrado Iglesias	Jesús Sánchez Miñana
Leonardo Fernández Troyano	Manuel Silva Suárez
Alberto Fraile de Lerma	Mercedes Tatjer Mir
Cecilio Garriga Escribano	Fernando Vea Muniesa
Josefina Gómez de Mendoza	M. ^a Ángeles Velamazán Gimeno
Guillermo Lusa Monforte	Patricia Zulueta Pérez
Javier Manterola Armisén	

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA
INSTITUCIÓN «FERNANDO EL CATÓLICO»
PRENSAS UNIVERSITARIAS DE ZARAGOZA

Publicación número 3.111
de la
Institución «Fernando el Católico»
(Excma. Diputación de Zaragoza)
Plaza de España, 2 · 50071 Zaragoza (España)
Tels.: [34] 976 288878/79 · Fax [34] 976 288869
ifc@dpz.es
<http://ifc.dpz.es>

© Los autores, 2011.

© De la presente edición, Real Academia de Ingeniería, Institución «Fernando el Católico»,
Prensas Universitarias de Zaragoza, 2011.

Cubierta: La motorización es una característica esencial de la Revolución Industrial. Se
presentan motores de tres tipos, todos diseñados y contruidos en el siglo XIX:
Máquina de vapor semifuja vertical de Alexander Hermanos; motor horizontal de
gas de tipo Otto, protegido por patente de invención, de Joaquín Torres; y dina-
mo *Gramme* L5 construida por la Sociedad Española de Electricidad. Estos tres
tipos de motores coexistían en el cambio de siglo.

Contracubierta: Dibujos en la patente depositada por los ingenieros militares Eusebio
Molera Bros y Juan Cebrián Cervera el 20 de junio de 1880 en los Estados Unidos.
Residentes en California, trabajaron en muy diversos temas. Esta patente con-
cierne a una mejora para los microscopios.

ISBN: 978-84-7820-814-2 (obra completa)

ISBN: 978-84-9911-151-3 (volumen VI)

Depósito Legal: Z-3688-2011

Corrección ortotipográfica: Ana Bescós y Laura Ayala

Digitalización: María Regina Ramón, AHOEPM, Bibl. ETSICCP de Madrid y Fons Històric
de la ETSEI de Barcelona

Tratamiento digital: Manuel Silva Suárez

Maquetación: Littera

Impresión: INO Reproducciones, Zaragoza

IMPRESO EN ESPAÑA - UNIÓN EUROPEA

La teoría de máquinas y mecanismos: desarrollo y difusión de una nueva ciencia

Juan Ignacio Cuadrado Iglesias
Universidad Politécnica de Valencia

Emilio Bautista Paz
Universidad Politécnica de Madrid

Los últimos años del siglo XVIII es época de cambios acelerados, de transformaciones sociales, políticas y técnicas. En la Francia revolucionaria de fin de la centuria se crea una institución llamada a jugar un papel crucial en el nacimiento de la nueva ciencia de las máquinas: la *École Polytechnique*. En ella se forman muchos de los protagonistas del desarrollo inicial de la nueva rama del saber, que nace como ciencia de la ingeniería, con la utilidad como objetivo principal. Una consecuencia inmediata es que sus fundadores son *savants-ingénieurs-professeurs*. Se trata de profesionales preocupados por el conocimiento científico, urgidos por la necesidad de mejorar la sociedad a través del perfeccionamiento de los procesos industriales, con vocación de transmitir los conocimientos a los diferentes estamentos profesionales de una forma inteligible. Estos rasgos van a caracterizar de manera determinante el desarrollo de la nueva disciplina.

Trataremos de identificar los hitos fundamentales y los personajes principales asociados a su desarrollo a lo largo del siglo XIX, a lo que dedicaremos las dos primeras secciones del capítulo; en la tercera se abordan los procesos de difusión de dicho conocimiento en nuestro país. ¿Fue importante la aportación de los españoles en el inicio? Desde el punto de vista de la difusión, ¿puede considerarse que España fue un país atrasado? ¿Cómo se produjo la difusión y qué personas fueron protagonistas? Trataremos de dar contestación a estas preguntas, sabiendo que la respuesta proporcionada no puede considerarse ni completa ni definitiva. Una búsqueda más amplia y detallada de fuentes de información permitirá en el futuro trazar esta historia de manera más extensa y rigurosa.

I

LA CIENCIA DE LAS MÁQUINAS Y SU LENGUAJE

Como toda ciencia, la de las máquinas posee sus propias claves de entendimiento, su propio lenguaje conceptual. Analizar su evolución consiste, en gran medida, en recorrer los conceptos que utiliza desde su génesis.

Las máquinas han sido objeto de estudio desde la más remota antigüedad, pero hasta los comienzos del siglo XIX no se capta la necesidad de crear un cuerpo conceptual específico que agrupe los conocimientos dispersos existentes, los estructure y facilite la generación de otros nuevos. Este proceso se desarrolla a lo largo del siglo XIX. En la centuria siguiente, la disciplina sigue evolucionando y alcanza resultados creativos importantísimos, pero las bases conceptuales ya estaban puestas en el Ochocientos.

Desde la perspectiva actual, una máquina es un sistema complejo en el que pueden confluir diversas tecnologías (mecánica, eléctrica, electrónica, automática...). Sin embargo, durante casi todo el XIX se trató de algo esencialmente mecánico. Por tanto, la mayor parte de los conceptos utilizados se derivan de la mecánica, o, para ser más precisos, de las mecánicas (mecánica del sólido rígido y deformable, elasticidad y resistencia de materiales, mecánica de fluidos). El primer concepto que se ha de fijar es el de máquina.

En el año 1875, Franz Reuleaux (1829-1905)¹, profesor de la Königlichem Gewerbe-Akademie de Berlín, publica una obra esencial, *Theoretische Kinematik*. En ella el autor define una máquina como «una combinación de cuerpos resistentes dispuestos de manera que obliguen a las fuerzas de la naturaleza a realizar un trabajo mediante unos movimientos determinados». De este concepto se derivan tres cuestiones clave:

- La máquina es un sistema que posee cierta utilidad: es creada para realizar una función.
- Lo anterior se realiza merced a la combinación de un conjunto de sólidos que están unidos entre sí, de modo que existe entre ellos la posibilidad de desplazamientos relativos, pudiéndose de este modo transmitir y transformar fuerzas y movimientos.
- Para que los sólidos puedan ejercer su función transmisora es necesario que posean resistencia a la deformación y a la rotura.

Para estudiar cada uno de estos aspectos, Reuleaux distingue cuatro partes:

- La **ciencia general de las máquinas**, que considera su universalidad y las trata desde un punto de vista descriptivo: qué ingenios existen y cómo están formados. Su estudio y su clasificación se llevan a cabo con un procedimiento teleológico, demostrando que la disposición de sus diferentes órganos está supeditada a la forma en la que realizan su trabajo útil.
- La **teoría de máquinas**, que analiza las fuerzas sensibles que entran en juego en su funcionamiento y los movimientos que de él resultan para deducir las consecuencias relativas al mejor modo de utilización.

¹ Estudió en el Polytechnikum Karlsruhe, institución creada a semejanza de la École Polytechnique en 1825.

- La **ciencia de la construcción de las máquinas**, que estudia las propiedades que deben otorgarse a los cuerpos que las componen, y de una manera muy especial su resistencia, de modo que los cuerpos mantengan su forma cuando están sometidos a acciones tanto sensibles (accionamientos) como latentes (desgastes y rozamientos).
- La **teoría de mecanismos**, que considera los movimientos que se producen en las máquinas como consecuencia de las restricciones geométricas que introducen las uniones entre sus elementos. Se trata de un análisis puramente cinemático, es decir, no tiene en cuenta las acciones aplicadas sobre la máquina.

Reuleaux sintetiza de forma magistral todos los aspectos bajo los que se pueden estudiar las máquinas. Tal como afirma, las cuatro ramas interactúan continuamente de manera que solo en conjunto pueden dotar al diseñador de soluciones completas a sus problemas. Dicho conjunto es lo que viene a constituir la nueva disciplina, que conforme avanza el siglo XIX gana en identidad y se difunde, pero a la vez se hace más compleja y especializada. Relatar esta historia en detalle sería ir más allá del alcance de este capítulo, en el que daremos solo un pequeño esbozo que sirva para enmarcar su difusión en nuestro país.

II

EL DESARROLLO DE LA CIENCIA DE LAS MÁQUINAS

La reflexión sobre las máquinas se convierte a lo largo del siglo XIX en un área de conocimiento cada vez más coherente y diferenciada. Recoge aportaciones de las ramas científicas afines y las dirige a aplicaciones prácticas, pero además plantea líneas teóricas específicas.

Hasta alcanzar la mitad del siglo, las instituciones académicas francesas tienen un papel significativo en el comienzo de este proceso y en su desarrollo. Las necesidades del Estado, por una parte, y las de la naciente industria, por otra, dan lugar a una diferenciación en los procesos formativos, en los cuales pueden vislumbrarse tres tendencias que van a tener consecuencias sobre los contenidos de los cursos de máquinas y sobre el progreso de la disciplina:

- En la primera mitad del siglo XIX, el nacimiento y el desarrollo de la ciencia de las máquinas está ligado a ingenieros que se han educado en la *École Polytechnique*, puesta en marcha en 1794. La formación va dirigida esencialmente a los cuadros técnicos de la Administración y posee un perfil muy científico.
- El mismo año que la *École Polytechnique*, se crea el *Conservatoire des Arts et Métiers*. Su objetivo es difundir las innovaciones técnicas en la industria. Con el tiempo, el establecimiento incluye entre sus objetivos la educación de los cuadros medios de los talleres en las técnicas de diseño y construcción de

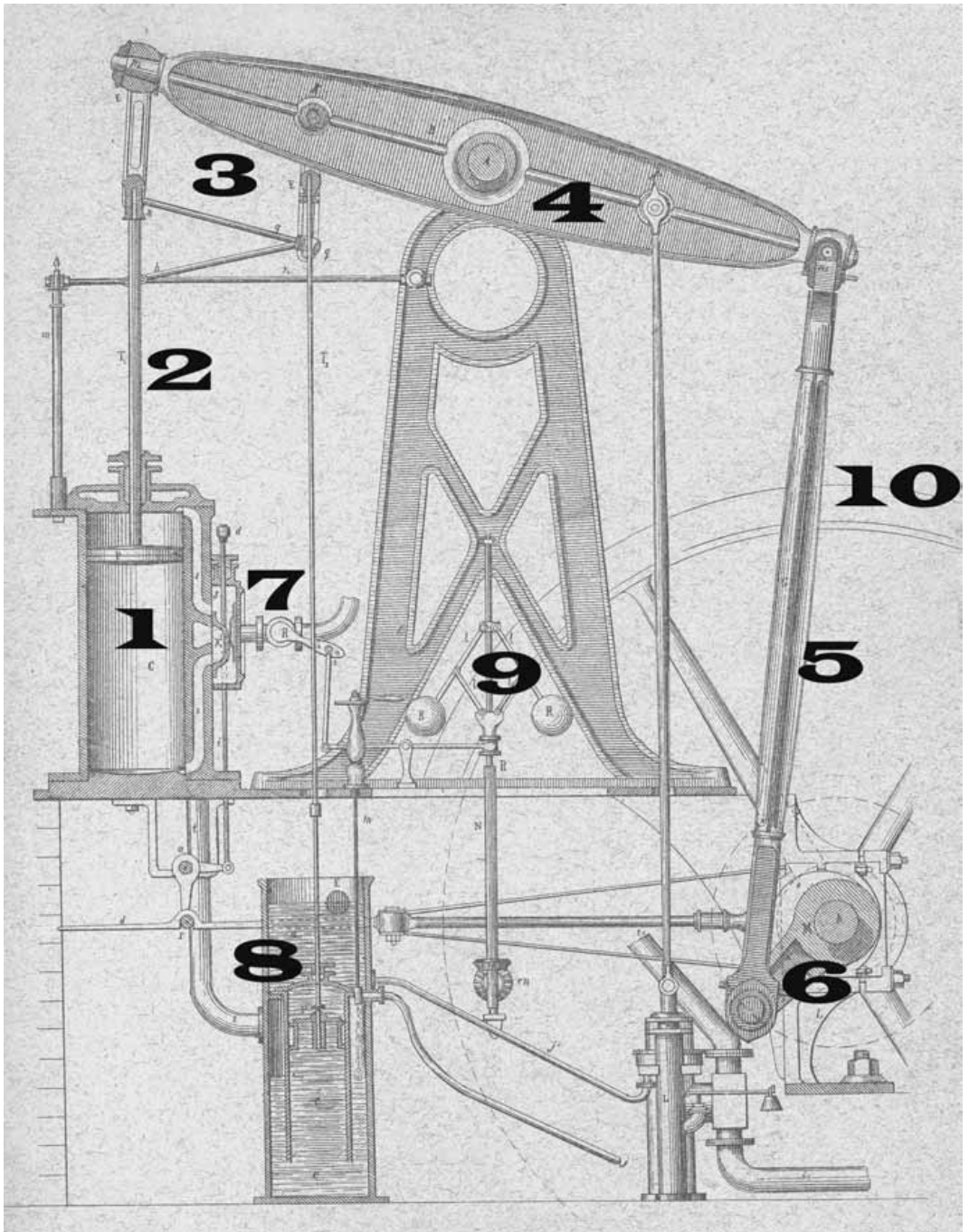
11.1. Máquina de vapor de doble efecto, en Franz Reuleaux, Tratado general de mecánica (1895): Partiendo de esta lámina, que muestra un bien conocido ejemplo, se explican los problemas abordados por la ciencia de las máquinas.

La máquina de vapor es un motor, un ingenio que transforma energía térmica en mecánica. Para ello dispone de un cilindro (1), en el que se introduce vapor de agua que alternativamente genera presión en las dos caras de un émbolo y hace que este se mueva hacia arriba y hacia abajo en movimientos de traslación rectilínea. El desplazamiento del émbolo se transmite a través de una varilla (2) mediante un mecanismo (3) hasta un balancín (4). A través de una biela (5), el otro extremo del balancín está conectado a una manivela (6) que va unida al eje de salida. Para controlar su funcionamiento, se dispone de diversos elementos auxiliares encargados de la alimentación del vapor al cilindro (7), de su condensación (8) y de la regulación del movimiento (9, regulador centrífugo, y 10, volante de inercia).

La máquina de vapor de doble efecto genera y transmite fuerzas verticales a través del émbolo, tanto en el movimiento de subida como en el de bajada. Ello obliga a cambiar la cadena de transmisión entre émbolo y balancín que existe en las máquinas de simple efecto, que solo producen fuerza en el movimiento descendente, por una varilla rígida que pueda transmitir fuerzas a tracción y a compresión. Debido a que no se produce energía mecánica de forma continua, el funcionamiento de la máquina es poco regular, existiendo variaciones de velocidad de rotación en el eje de salida en cada ciclo de trabajo. Para mejorar la regularidad, se introduce en la máquina un volante de inercia, dispositivo que permite acumular energía cinética cuando la máquina está en aceleración y restituirla cuando está decelerando. Los dos problemas planteados, el de la configuración de la máquina para obtener un mayor rendimiento y el de la introducción de elementos que regularicen la transmisión de la energía forman parte de la **teoría de máquinas**.

La varilla que conecta el émbolo con el balancín posee un movimiento de traslación rectilíneo, pero los puntos de este último se mueven en trayectorias circulares. Esta conexión exige un mecanismo intermedio que acople ambos tipos de movimiento, en el que, gracias a las longitudes de las varillas que lo componen, el punto de conexión del cuadrilátero con la varilla del émbolo realice una trayectoria casi rectilínea. Las primeras máquinas de vapor fueron utilizadas para el accionamiento de bombas alternativas para el achique del agua en las minas; por lo tanto, los movimientos de entrada y salida de la máquina eran de traslación rectilínea. Con el tiempo, empezaron a utilizarse en el accionamiento de otras máquinas que empleaban sobre todo movimientos rotatorios. Por esa razón se introduce en el diseño una nueva configuración del mecanismo (balancín, biela, manivela) que permite obtener un movimiento de rotación continua en el eje de salida. Estas dos cuestiones, el diseño de dispositivos en los que algunos de sus puntos sigan trayectorias determinadas y el de la selección de sus elementos para transformar un cierto movimiento de entrada en otro de salida, son tratadas a través de los métodos de la **teoría de mecanismos**.

El dimensionamiento de los elementos que forman parte de la máquina exige, en primer lugar, una selección de los materiales con los que van a ser construidos y la aplicación de criterios de fallo mediante planteamientos que derivan de la teoría de la elasticidad y de la resistencia de materiales. La selección de los materiales y la forma de los elementos viene también determinada por la capacidad de fabricarlos. Un elemento clave para la mejora del rendimiento en las máquinas de vapor fue la posibilidad de construir cilindros con elevada precisión, para evitar las fugas de vapor entre las dos cámaras, gracias a un buen ajuste cilindro-émbolo. La selección de materiales y procesos de fabricación, así como el dimensionamiento de los elementos de la máquina es cuestión tratada en la **construcción de máquinas**.



máquinas. Dado el tipo de alumnado, la enseñanza es muy básica y evita al máximo la utilización de herramientas matemáticas complejas.

- La educación de los cuadros técnicos superiores para la industria es el objetivo de la *École Centrale des Arts et Manufactures*, creada en 1829. Se pretende formar ingenieros generalistas, convertidos en verdaderos «médicos de las fábricas», que integren todos los saberes y sus aplicaciones en una nueva mecánica industrial.

La mayor parte de los personajes asociados a la creación del nuevo saber han adquirido una sólida formación teórica en la *Polytechnique*, pero simultáneamente han sido profesores en otras instituciones. Todos tratan de superar la distancia existente entre los planteamientos teóricos y los problemas reales a los que se enfrentan los constructores y los usuarios de las máquinas en las fábricas. Ello exige un esfuerzo de simplificación de planteamientos matemáticos y un ajuste experimental a sus condiciones reales de funcionamiento.

II.1. *La teoría de máquinas*

En 1810 André Guenyeveu (1782-1861)² publica un *Essai sur la science des machines*, en el que señala:

La Mécanique ou la science de l'équilibre et du mouvement a fait de très-grands progrès dans ces derniers temps ; elle est devenue, entre les mains de M. de Lagrange, le modèle de toutes les autres sciences, puisque cet illustre géomètre a donné des formules qui comprennent tous les cas possibles, et ramènent ainsi tous les problèmes à de simples questions d'analyse mathématique. Cependant, la théorie des machines, c'est-à-dire, la connaissance de leurs effets, l'art de les appliquer et de les construire, n'a point encore été perfectionnée, et les beaux travaux des géomètres n'ont encore exercé aucune influence sensible sur cette partie aussi intéressante qu'utile, des sciences physico-mathématiques [...] ; celui qui construit des machines est rarement assez versé dans les mathématiques pour en faire des applications souvent très-difficiles et très-déliques ; le géomètre, au contraire, ignore le plus souvent les détails et tout ce qui influe sur le bon effet des machines ; et tous les deux sont d'ailleurs promptement dégoûtés d'un travail pénible, dont les résultats ne sont jamais bien satisfaisants.

La théorie des machines doit donc faire une science à part : l'expérience et l'observation en fourniront les bases, et le raisonnement, aidé de l'analyse mathématique, en déduira les lois générales et particulières de leur équilibre et de leur mouvement ; elle doit présenter des formules qui contiennent toutes leurs propriétés mécaniques, et à l'aide desquelles on puisse prévoir et calculer leurs effets dans tous les cas.

En palabras de d'Alembert en su prefacio al *Traité de dynamique* de 1743, hay dos tipos de ciencias: «las que se apoyan sobre los principios físicos, es decir, sobre verdades de experiencia, o incluso de simples hipótesis, y las que tratan del cálculo de magnitudes y propiedades generales del espacio, es decir, el Álgebra, la Geometría y

² Alumno de la *École Polytechnique* de la promoción de 1800 y profesor de Metalurgia en la *École des Mines de París* de 1822 a 1840.

la Mecánica, que pueden contemplarse como marcadas por el sello de la evidencia». La mecánica racional corresponde al segundo caso señalado. Estudia el movimiento de los cuerpos materiales y deduce, a partir de hipótesis muy simplificadas sobre la constitución de los mismos (por ejemplo, la de la su indeformabilidad o la de ausencia de rozamientos), las leyes matemáticas que rigen su movimiento. Guenyveau contempla una teoría de máquinas, emancipada de la mecánica racional, en la que la experiencia sea el punto de partida para la obtención de las leyes generales que afectan al equilibrio y al movimiento de estos ingenios. Dicha experiencia debe permitir la introducción de las propiedades mecánicas de las máquinas reales (por ejemplo, la deformabilidad de los sólidos y la presencia de rozamientos).

II.1.1. Las máquinas en movimiento

La primera complejidad procede del concepto de máquina como sistema mecánico en movimiento. Desde la más remota antigüedad, los tratados de mecánica han estado interesados por las máquinas en reposo, es decir, en condiciones de equilibrio estático. Estudian únicamente las denominadas *máquinas simples* (palanca³, cuña⁴, plano inclinado, polea⁵ y tornillo). Hay algo de incompleto o de limitado en este planteamiento. Guenyveau dice a propósito de dicha situación:

Le calcul des machines considérées dans l'état d'équilibre, est, ainsi qu'on peut le présumer, beaucoup plus simple et plus facile que lorsqu'elles sont supposées en mouvement [...] c'est aussi à ce cas que s'arrêtent la plupart de ceux qui ont besoin de juger de l'effet des machines; et lorsqu'ils commettent des erreurs considérables, c'est presque toujours en étendant aux machines en mouvement, et par des suppositions plus ou moins éloignées de la vérité, les résultats qu'ils ont obtenus pour le cas d'équilibre.

Un personaje muy importante para el comienzo del desarrollo de la teoría de máquinas es Lazare-Nicolas-Marguerite Carnot (1753-1823). En abril de 1777 la Academia Real de Ciencias francesa convoca un concurso a resolver en 1779. Gira en torno a la teoría de las máquinas simples, teniendo en cuenta el rozamiento y la rigidez de las cuerdas, y se exige que las leyes que representen el efecto de dichos fenómenos sean deducidas a partir de nuevas experiencias, el todo aplicable en la marina a máquinas del tipo poleas, cabrestantes⁶ y planos inclinados. En su primera edición, el premio queda desierto y en la segunda, en 1781, Carnot presenta una memoria que, aunque no obtiene el premio, consigue una mención de honor. Se trata del origen de su *Essai sur les machines en général*, publicado en 1786, y vuelto a editar con modificaciones en 1803 bajo el título *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouve-*

³ Máquina compuesta por una barra que puede girar libremente alrededor de un punto fijo.

⁴ Pieza de sección triangular utilizada para calzar, levantar pesos, fijar y separar.

⁵ Rueda alrededor de la cual pasa una cuerda o un cable y que suele emplearse para elevar pesos.

⁶ Rodillo giratorio en el que se enrolla una cuerda o cable y se utiliza normalmente para arrastrar cargas.

ment. La primera cuestión destacable de este autor es su deseo de elaborar una teoría general de las máquinas:

cet Essai n'a pour objet que les Machines en général ; chacune d'elles a ses propriétés particulières: il ne s'agit ici que de celles qui sont communes à toutes; ces propriétés, quoique assez nombreuses, sont en quelque sorte toutes comprises dans une même loi fort simple : c'est cette loi qu'on s'est proposé de rechercher, de démontrer & de développer, en envisageant toujours les Machines sous le point de vue le plus général & le plus direct.

II.1.2. La transmisión de energía

El planteamiento exclusivamente estático aplicado a las máquinas impide percibir lo que verdaderamente hay en juego. Los tratados de mecánica clásicos, al analizar las máquinas simples, no falsean la realidad, pero pueden ser interpretados de forma incorrecta, como de hecho sucede. Gracias a los dispositivos mecánicos, pequeñas fuerzas pueden equilibrar otras de gran magnitud, lo que la gente poco instruida puede entender como una capacidad cuasi mágica de las máquinas para multiplicar sus efectos.

Sin embargo, lo que está en juego en una máquina no es solo el equilibrio de fuerzas, sino la capacidad para mover dichas fuerzas. Lazare Carnot señala que el problema es también y sobre todo un problema energético. Repite así el viejo principio de la dinámica: en las máquinas en movimiento se pierde en tiempo o en velocidad lo que se gana en fuerza. Hasta ese momento, el problema de las máquinas había sido tratado siempre como una cuestión de equilibrio de fuerzas, considerando las que permiten que estas permanezcan en reposo o en movimiento. A propósito de la famosa frase de Arquímedes «Dadme un punto de apoyo y levantaré el mundo», dice:

Si il eût été question de faire naître un mouvement effectif, alors Archimede auroit été obligé de le tirer tout entier de son propre fond ; aussi n'auroit il pu être que très-petit, même après plusieurs années.

La máquina no es solo un problema de equilibrio de fuerzas: es también un problema de movimientos y de energías. Además, es un medio de transmisión de energía, y en dicha transmisión se producen pérdidas, de modo que la entrante no coincide con la saliente. A partir de un planteamiento general, Carnot establece las condiciones para que se produzca el máximo aprovechamiento de la energía transmitida; es decir, plantea un problema de optimización:

On trouvera encore parmi ces réflexions une des plus intéressantes propriétés des Machines, qui, je crois, n'a pas encore été remarquée ; c'est que pour leur faire produire le plus grand effet possible il faut nécessairement qu'il n'arrive aucune percussion, c'est-à-dire, que le mouvement doit toujours changer par degrés insensibles.

Lo que viene a decir es que el máximo aprovechamiento de una fuerza se produce cuando su dirección coincide con la del desplazamiento del sólido sobre el que incide. Detrás del planteamiento de Carnot subyace un concepto fundamental para la

teoría de máquinas, el de trabajo, que él denomina *momento de actividad de una potencia* y que será desarrollado más adelante.

II.1.3. Las partes de la máquina

Entre los años 1818 y 1821 Giuseppe Antonio Borgnis (1781-1863) publica su *Traité complète de mécanique appliquée aux arts*, tratado en nueve volúmenes que contiene una de las mayores recopilaciones de máquinas de la época clasificadas por ámbito de aplicación. Su propuesta de clasificación de los mecanismos basada en la función a desempeñar es de la mayor importancia para la teoría de máquinas.

El primero de los volúmenes está dedicado a la composición de las máquinas. Borgnis propone dividir sus órganos, según la función que desempeñan, en

- *receptores*, destinados a recibir la acción inmediata de los agentes motores⁷;
- *comunicadores*, cuya función es transmitir el movimiento;
- *modificadores*, que varían la velocidad de los diversos móviles;
- *soportes*, que sirven de centro de rotación o de apoyo a los órganos móviles;
- *reguladores*⁸, que corrigen las irregularidades de los movimientos;
- *operadores*, que producen el efecto final.

Estas denominaciones son recogidas en la mayor parte de los tratados de máquinas posteriores. El problema de la optimización en la transmisión de la energía es de especial relevancia en los órganos receptores y dará lugar, con el tiempo, a una teoría de motores en sus dos versiones principales, la hidráulica y la de las máquinas de vapor, que hacia el final del siglo incorporará la de los motores de combustión interna y la de los motores eléctricos.

II.1.4. La comparación entre los efectos de las máquinas: el trabajo

Si la obra de Lazare Carnot se publica en 1786, sus ideas no tienen continuidad hasta Gaspard-Gustave Coriolis (1792-1843)⁹, quien en 1829 publica *Du calcul de l'effet des machines*. El título ampliado del libro indica claramente su objetivo: *Consideraciones sobre el empleo de los motores y su evaluación, para servir de introducción al estudio especial de las máquinas*. En su introducción señala lo siguiente:

Je me suis proposé dans cet Ouvrage de présenter toutes les considérations générales qui tendent à éclairer les questions sur l'économie de ce qu'on appelle communément la force ou la puissance mécanique, et de donner des moyens de reconnaître facile-

⁷ Por ejemplo, en el caso de que el agente motor sea el agua, los principales receptores son los diferentes tipos de ruedas y turbinas hidráulicas.

⁸ Sistemas que actúan sobre la alimentación de energía de una máquina con el fin de ajustarla a la requerida en cada instante.

⁹ Perteneció a la promoción de 1808 de la École Polytechnique. Fue profesor de Mecánica General en 1829 y de Mecánica Aplicada de 1832 a 1837 en la École Centrale des Arts et Manufactures, así como director de estudios en la École Polytechnique en 1838.

ment quels sont les avantages et les inconvénients de certaines dispositions dans la construction d'une machine. [...]

J'ai employé dans cet Ouvrage quelques dénominations nouvelles : je désigne par le nom de travail la quantité qu'on appelle assez communément *puissance mécanique*, *quantité d'action* ou *effet dynamique*.

Coriolis establece la existencia de dos tipos de fuerzas: las motrices, que van en la dirección del movimiento, y las resistentes, que se oponen a este. La fuerza aplicada a lo largo de un desplazamiento produce un cambio de la velocidad de un sólido calculable a través de la variación de la fuerza viva¹⁰. Para la magnitud *fuerza por desplazamiento* escoge la palabra *trabajo*:

On attache en effet au mot *travail*, dans ce sens, l'idée d'un effort exercé et d'un chemin parcouru simultanément : car on ne dirait pas qu'il y a un travail produit, lorsqu'il y a seulement une force appliquée à un point immobile, comme dans une machine en équilibre ; on n'appliquerait pas non plus l'expression de travail à un déplacement opéré sans aucune résistance vaincue.

El trabajo sirve para comparar el efecto de las máquinas, conjuntos de cuerpos en movimiento dispuestos de manera que forman una especie de canal por donde se transmite la energía. En esa transmisión se producen pérdidas debido al rozamiento, a la elasticidad de los cuerpos, a los choques, etc., por lo que el trabajo disponible a la salida es menor que el introducido. En consecuencia, el rendimiento de la máquina depende de su diseño.

El autor enuncia la ecuación de las fuerzas vivas, transformándola en el principio fundamental de la transmisión del trabajo:

Dans tout système de corps en mouvement, la différence entre la somme des quantités de travail dues aux forces mouvantes et la somme des quantités de travail dues aux forces résistantes, pendant un certain temps, est égale à la variation de la somme des forces vives de toutes les masses du système pendant le même temps.

Este principio se va a convertir en una herramienta esencial para el cálculo de la variación de la velocidad de la máquina en función de las fuerzas aplicadas y para establecer las condiciones bajo las cuales las máquinas cíclicas¹¹ funcionan en régimen permanente¹².

¹⁰ Según la propuesta de Leibniz (1646-1716), los cuerpos animados de movimiento tienen capacidad de realizar un efecto dependiente del cuadrado de la velocidad que poseen. Por ejemplo, si arrojamus un cuerpo hacia arriba, la altura alcanzada dependerá del cuadrado de la velocidad a la que se lance. La *fuerza viva*, producto de la masa de un cuerpo por el cuadrado de su velocidad, es igual al doble de la actualmente denominada energía cinética. En contraposición, la *fuerza muerta* es la que no produce ningún movimiento, por ejemplo la gravedad aplicada a un cuerpo que reposa en un plano horizontal.

¹¹ Las que repiten sus posiciones en ciclos sucesivos (gran parte de las máquinas).

¹² La velocidad de la máquina permanece constante en cada posición en los sucesivos ciclos.

II.1.5. La moneda mecánica

Claude-Louis-Marie-Henri Navier (1785-1836)¹³ publica en 1819 una nueva edición de un célebre tratado de Belidor del siglo XVIII añadiendo un conjunto de notas de entre las cuales queremos destacar la titulada «Sur les principes du calcul et de l'établissement des machines et sur les moteurs». En ella incorpora una dimensión económica al concepto de trabajo:

La comparaison de diverses machines, pour le négociant et le capitaliste, se fait d'avoir une unité naturellement d'après la quantité de travail qu'elles exécutent, et le prix de ce travail. [...]

Supposons en effet une personne qui possède un moulin à blé, et qui désirerait, au moyen de quelques changements dans son mécanisme, en faire un moulin à scier. Elle ne pourrait juger de l'avantage ou du désavantage de cette opération, qu'autant qu'elle saurait évaluer, d'après la quantité de farine produite par son moulin, la quantité de bois qu'il serait dans le cas de débiter. [...] Cet exemple suffit pour montrer la nécessité d'établir une sorte de monnaie mécanique, si l'on peut s'exprimer ainsi, avec laquelle on puisse estimer les quantités de travail employées pour effectuer toute espèce de fabrication. [...] Le genre de travail le plus propre à servir à l'évaluation de tous les autres est l'élévation verticale des corps pesants.

II.1.6. La complejidad del mundo real: la mecánica aplicada

Los tratados de Jean-Victor Poncelet (1788-1867)¹⁴, particularmente su *Traité de mécanique appliquée aux machines* en sus sucesivas reediciones, suponen la culminación académica de las diferentes aportaciones realizadas a lo largo de la primera mitad del siglo XIX en torno a la teoría de máquinas. En la introducción a su *Mécanique industrielle* Poncelet regresa al debate entre mecánica racional y mecánica aplicada:

Enfin n'avoue-t-on pas, tous les jours, qu'un espace immense sépare la Mécanique, telle qu'on l'enseigne dans nos écoles, de ses applications mêmes les plus usuelles et les plus simples? Là c'est la compressibilité ou la flexibilité naturelles des corps; ici c'est leur inertie, ce sont les résistances, de toute espèce, qu'ils opposent au mouvement et à l'action des forces, qui viennent, si non démentir complètement, du moins modifier tellement les déductions théoriques que les résultats diffèrent souvent du simple au quadruple ou au quintuple.

Poncelet apuesta por un tipo de enseñanza para sus jóvenes alumnos

appuyée de données positives et de chiffres exacts, nourrie de principes d'une application immédiate dans les arts, une instruction telle enfin qu'elle puisse porter des fruits dès les premiers pas de l'élève dans l'étude.

¹³ Alumno de la promoción de 1802 de la École Polytechnique, profesor de 1819 a 1835 del curso de Mecánica Aplicada en la École Nationale des Ponts et Chaussées y de Mecánica en la École Polytechnique.

¹⁴ De la promoción de 1807 de la École Polytechnique, fue profesor de Mecánica en la École d'Artillerie et du Génie de Metz en 1825 y de Mecánica Aplicada en la Facultad de Ciencias de la Universidad de París entre 1837 y 1848. De 1848 a 1850 fue director de la École Polytechnique.

La preocupación de Poncelet por la aplicabilidad de los conocimientos confiere riqueza de detalles a su tratado, tanto en los problemas planteados como en las soluciones adoptadas. Por enumerar solo algunos, destacamos los siguientes: la necesidad de tener en cuenta en ciertos casos la deformación de los órganos; la separación del estudio del efecto útil en los órganos receptores y en las herramientas; el estudio del arranque, del régimen uniforme y del régimen transitorio; la regularización del movimiento y los volantes de inercia¹⁵; los criterios de implantación de las máquinas; un amplio estudio sobre los reguladores; un tratamiento detallado de los diferentes elementos que sirven para transmitir el movimiento con una relación de transmisión dada: ruedas de fricción¹⁶, correas, cadenas, engranajes¹⁷ y levas; un estudio detallado de las resistencias pasivas en las máquinas donde aparecen analizados quince tipos de casos diferentes que se emplean comúnmente; un estudio de los fenómenos de choque aplicado en diversas situaciones.

II.1.7. La mecánica experimental

La nueva mecánica quiere aproximarse a la realidad, y para ello necesita medirla. Por ejemplo, para poder analizar las condiciones de movimiento, para poder evaluar las pérdidas de energía, para poder valorar el rendimiento, deben estimarse las resistencias pasivas, los rozamientos.

La biografía de Charles-Augustin Coulomb (1736-1806) posee en sus comienzos un paralelismo notable con la de Carnot. Formado en la École Royale du Génie de Mézières, en la que fue alumno de Bossut, se presentó al mismo concurso de la Academia de las Ciencias, pero en este caso y en su segunda edición fue el ganador con la memoria titulada *Théorie des machines simples*.

Para desarrollar los modelos que permitan evaluar los rozamientos entre dos cuerpos en contacto a punto de deslizar (capítulo primero) y con deslizamiento relativo (capítulo segundo), Coulomb realiza un conjunto de experiencias en las que va variando los materiales en contacto, la extensión de sus superficies, la presión entre las mismas y el tiempo transcurrido desde que se ponen en contacto. Sus resultados, que son utilizados a lo largo del siglo para poder evaluar los rozamientos, quedan en gran medida confirmados mediante experiencias más amplias y precisas, como las contenidas en la memoria *Nouvelles expériences sur le frottement*, publicada en 1832 por Arthur Jules Morin (1795-1880)¹⁸.

El tratado de Coriolis del que hablamos anteriormente, así como otros muchos tratados de máquinas de la época, contiene tablas (dieciocho páginas, en este caso)

¹⁵ Elementos giratorios que actúan como acumuladores de energía en las máquinas.

¹⁶ Transmisión entre dos ejes por presión entre ruedas solidarias a cada uno.

¹⁷ Transmisión rígida de potencia entre dos ejes por medio de ruedas dentadas.

¹⁸ Alumno de la École Polytechnique, de la promoción de 1813. Militar, fue profesor de la École d'application de Metz y del Conservatoire Impérial des Arts et Métiers.

en las que se especifican las cantidades de trabajo dinámico necesarios para producir diversos efectos útiles, y las que producen diferentes tipos de motores. La obtención de este tipo de información lleva aparejado el empleo de diferentes aparatos de medida, también recogidos en la literatura. Un ejemplo de tratado dedicado a la descripción, el diseño y la utilización de dispositivos dinamométricos¹⁹ es la *Notice sur divers appareils dynamométriques* de Morin, publicada en su segunda edición en 1841.

II.1.8. La mecánica industrial

Pierre-Charles-François Dupin (1784-1873)²⁰, tras una serie de viajes a Gran Bretaña en los que pudo conocer de primera mano su desarrollo industrial y sobre todo experiencias concretas de formación de los jóvenes profesionales fuera del horario de trabajo, en 1819 propone la creación en el Conservatorio de una alta escuela de aplicación de los conocimientos científicos al comercio y a la industria con tres cátedras: una de Mecánica y Geometría —que ocupa el propio Dupin—, otra de Química Industrial y una tercera de Economía Industrial. La formación va dirigida a artistas (técnicos), obreros y subjefes y jefes de taller. Este tipo de alumno exige abandonar planteamientos de la mecánica muy teóricos, basados en el uso del cálculo diferencial e integral, y pasar a utilizar métodos de carácter descriptivo y datos sacados de la experiencia y de la observación, con un formalismo matemático mínimo y elemental. En la enseñanza en torno a la industria esta mecánica aplicada pasa a denominarse *mecánica industrial*, materia de gran éxito incluso en las escuelas de Ingeniería. Los tratados de los que disponemos acerca de ella, aunque tienen perfiles bastante diversos, responden en su mayoría a este nuevo planteamiento. Entre ellos queremos destacar el de Gérard-Joseph Christian —director del Conservatorio en 1816—, *Traité de mécanique industrielle*, de 1822; el de Dupin, *Géométrie et mécanique des arts et métiers et des beaux-arts* —en tres tomos, el segundo dedicado a la mecánica y el tercero a la dinámica—, publicado en 1826; y el de Poncelet, *Mécanique Industrielle*, de 1839.

II.2. La teoría de mecanismos

En 1834 André-Marie Ampère (1775-1836) publica su *Essai sur la philosophie des sciences*, y en él comenta lo siguiente:

Il faudra définir une machine, non pas comme on le fait ordinairement, un instrument à l'aide duquel on peut changer la direction et l'intensité d'une force donnée, mais bien un instrument à l'aide duquel on peut changer la direction et la vitesse d'un mouvement donné. On rend ainsi cette définition indépendante de la considération des forces qui agissent sur la machine ; considération qui ne peut servir qu'à distraire l'attention de celui qui cherche à en comprendre le mécanisme. Pour se faire une idée nette, par exemple, de l'engrenage à l'aide duquel l'aiguille des minutes d'une montre fait douze

¹⁹ Los destinados a la medida del trabajo desarrollado por una máquina.

²⁰ Alumno de la promoción de 1801 de la École Polytechnique, fue profesor de Mecánica en el Conservatoire des Arts et Métiers desde 1819 hasta 1854.

tours, tandis que l'aiguille des heures n'en fait qu'un, est-ce qu'on a besoin de s'occuper de la force qui met la montre en mouvement? L'effet de l'engrenage, en tant que ce dernier règle le rapport des vitesses des deux aiguilles, ne reste-t-il pas le même, lorsque le mouvement est dû à une force quelconque autre que celle du moteur ordinaire; quand c'est, par exemple, avec le doigt qu'on fait tourner l'aiguille des minutes?

Ampère señala un nuevo problema que los que se han dedicado a desarrollar la teoría de máquinas han pasado por alto. Sumergidos en cuestiones como la transmisión y rendimiento energético, no han tenido en cuenta que en muchas máquinas o partes de ellas el objeto fundamental del diseño es la transformación del movimiento.

Charles-Pierre Lefebvre de Laboulaye (1813-1886)²¹ es autor de uno de los primeros tratados de la nueva teoría de mecanismos. En 1848, en la lección de apertura del curso de Cinemática en la Association Polytechnique comenta lo siguiente:

Tous les traités de mécanique industrielle qui ont paru jusqu'ici traitent de la mécanique dynamique, et surtout des moyens de communiquer le plus avantageusement à un récepteur le travail engendré par les agents physiques, de diminuer les résistances qui s'opposent au mouvement, etc. Cet enseignement, utile et indispensable, est néanmoins bien insuffisant pour l'étude des machines proprement dites, et en arrivant dans les ateliers après avoir acquis les connaissances théoriques que l'on puise dans les cours les plus complets de mécanique, on est étonné de la difficulté que l'on rencontre à comprendre le mode d'action des nombreuses machines opératrices qui vous entourent.

La teoría de máquinas, tan centrada en los procesos de transmisión eficaz de la energía, ha olvidado que sus diversas aplicaciones exigen de los órganos operadores diferentes combinaciones de movimientos, y esto solo se logra mediante mecanismos que transforman los transmitidos desde los receptores a los operadores de múltiples formas. La solución a este problema le corresponde a la teoría de mecanismos.

II.2.1. La selección de mecanismos

Robert Willis (1800-1875) imparte desde 1837 lecciones de Mecanismos en la Universidad de Cambridge, y en 1841 publica un famoso tratado dedicado explícitamente a esta nueva teoría, *Principles of mechanism*. En su prefacio identifica sus objetivos:

Science that will enable us either to reduce the movements and actions of a complex engine to system, or to give answers to the questions that naturally arise upon considering such engines; for example, are the means by which the results are obtained the best that might have been employed? Or what are the various methods that might have been substituted for them?

Coincidiendo con el comienzo de la École Polytechnique, mucho antes de que Ampère definiera la cinemática y de que Laboulaye y Willis escribieran sus tratados se ha empezado a escribir la historia de la cinemática y la teoría de mecanismos.

²¹ De la promoción de 1831 de la École Polytechnique.

El problema cinemático es en primera instancia un problema de movimientos de sólidos y de trayectorias de puntos, es decir, un problema geométrico. No por casualidad la primera persona que incorpora un planteamiento cinemático al análisis de las máquinas es Monge, profesor de Geometría Descriptiva. En el curso de Máquinas que propone para la École Polytechnique plantea el estudio de sus elementos clasificados según el tipo de transformación del movimiento. El complemento bibliográfico de este novedoso curso es el libro de José María de Lanz y Agustín de Betancourt *Essai sur la composition des machines*, publicado en 1808. Con este curso y con este libro muchos consideran que tiene lugar el nacimiento de la teoría de mecanismos²².

La idea de Monge de una máquina compuesta de elementos transformadores del movimiento y la de Willis de la necesidad de buscar soluciones alternativas para diseñar una aplicación específica se abordan a través de la definición y la clasificación de los mecanismos elementales constitutivos. Las propuestas de diferentes criterios de clasificación de mecanismos y el debate sobre su mayor o menor bondad hacen correr ríos de tinta y centran de manera especial todos los tratados de mecanismos en el tramo central del siglo XIX²³.

II.2.2. La importancia de la geometría

La cinemática se define como la geometría del movimiento. En ella se estudian no solo las trayectorias de los puntos, las rotaciones y las traslaciones de los sólidos, sino también las variables cinemáticas derivadas al relacionar las posiciones ocupadas por los puntos y los sólidos con el tiempo: velocidades y aceleraciones instantáneas. Sin embargo, en algunos elementos de máquinas, su forma, es decir, su geometría, desempeña un papel importante en la transmisión del movimiento y de las fuerzas, lo que se hace especialmente evidente en el caso de los engranajes. Aunque estos vienen siendo utilizados por el hombre desde la más remota antigüedad, hasta los primeros años del siglo XVIII no se elabora una teoría que estudie la geometría de sus dientes. Philippe de La Hire (1640-1718) empieza a desarrollar la teoría de los engranajes epicicloidales y posiblemente concibe el perfil de evolvente; Charles-Étienne-Louis Camus (1699-1768) puede decirse que incluye en su *Cours de mathématique*, de 1750, el primer tratado sobre el tema; Hachette incorpora en su *Traité des machines* una teoría geométrica de los cilíndricos y cónicos.

Willis propone como criterio esencial de clasificación de los mecanismos el de los movimientos relativos entre los sólidos, de donde deriva la importancia cinemática de las relaciones de transmisión. Cuando lo aplica a los trenes epicicloidales²⁴ se

²² Un análisis de la obra de Lanz y Betancourt, en M. SILVA SUÁREZ (ed.), 2005, pp. 148-157.

²³ Un sumario de dichas propuestas, ibíd., pp. 157-159.

²⁴ Mecanismo de ruedas dentadas con el que se obtienen relaciones de transmisión precisas y elevadas, usando pocos engranajes. Se caracteriza por que algunas de las ruedas giran sobre ejes móviles.

obtiene un procedimiento nuevo de cálculo de las relaciones de transmisión en dichos trenes.

Théodore Olivier (1793-1853)²⁵ publica en 1842 la *Théorie géométrique des engrenages destinés à transmettre le mouvement de rotation entre deux axes non situés dans un même plan*, obra de síntesis y de culminación de los tratados anteriores en la que plantea el problema por dos vías: los engranajes de potencia con contacto lineal entre dientes y los de precisión con contacto puntual.

Los problemas geométrico-cinemáticos no se circunscriben a los engranajes. Entre otros muchos, el análisis del movimiento del mecanismo biela-manivela²⁶, base de las máquinas alternativas, el estudio de los mecanismos que trazan trayectorias cuasi rectilíneas²⁷ —el mecanismo de Watt²⁸ en la máquina de vapor—, la junta universal²⁹ o los mecanismos de levas³⁰ son algunos ejemplos de la aplicabilidad de la cinemática al diseño de las máquinas. Al igual que en la mecánica, a partir de una cinemática teórica se va construyendo otra aplicada, dentro de la cual se encuentra la teoría de mecanismos.

II.3. *La construcción de máquinas*

La máquina transmite y transforma fuerzas, energía y movimiento. Para ello, los elementos que la componen son en su mayor parte sólidos contruidos de ciertos materiales —madera, fundición, acero, bronce, etc.—. Como consecuencia de la transmisión de las fuerzas, los sólidos se ven sometidos a sollicitaciones —tracción, compresión, flexión, torsión— que pueden provocar su deformación excesiva o incluso su rotura. Para evitar esto, cada uno de los órganos debe ser diseñado escogiendo un material apropiado y dándole unas dimensiones adecuadas. El desarrollo a lo largo del siglo XIX de la teoría de la elasticidad y de la resistencia de materiales ha permitido avanzar en este campo, usándose sus resultados tanto en los diseños de construcciones como en los de máquinas. Esta rama de la mecánica aplicada se trata en el capítulo 8 del presente volumen. Nos ceñiremos a señalar algunas de las más importantes contribuciones al cálculo de elementos de máquinas.

Ferdinand Jakob Redtenbacher (1809-1863)³¹ es una figura primordial para la transformación científica de la ingeniería mecánica en Alemania. Aunque no fue su

²⁵ De la promoción de 1811 de la École Polytechnique, profesor de Mecánica en la École Centrale des Arts et Manufactures desde 1829 y de Geometría Descriptiva en el Conservatoire National des Arts et Métiers desde 1839.

²⁶ Mecanismo para convertir una rotación en traslación, y viceversa.

²⁷ Sobre el problema del guiado rectilíneo en la máquina de vapor, véase M. SILVA SUÁREZ (ed.), 2005, pp. 159-177.

²⁸ Mecanismo articulado para generar trayectorias aproximadamente rectilíneas.

²⁹ Conexión entre dos segmentos de un eje que permite la variación del ángulo que forman.

³⁰ Mecanismos que permiten obtener movimientos complejos a partir de un accionamiento simple.

³¹ Profesor de Mecánica y Construcción de Máquinas a partir de 1841 y director entre 1857 y 1862 del Polytechnikum Karlsruhe, tuvo como alumno a Reuleaux.

libro más completo, el que alcanzó mayor éxito nacional e internacional fue el *Resultate für den Maschinenbau*, publicado en 1848, con seis ediciones en alemán y una en francés. El título completo del libro en español es *Resultados científicos y prácticos destinados a la construcción de las máquinas*, con el que da alguna de las claves de la obra: aunar bases científicas con gran cantidad de datos y representaciones provenientes de la práctica de la construcción. El capítulo segundo está dedicado a la resistencia de materiales, y el tercero, a la construcción de elementos, con un extenso catálogo de ellos.

La mayor parte de los libros de construcción tienen una estructura semejante: sin profundizar en justificaciones teóricas extensas, se acumulan las fórmulas de aplicación del cálculo resistente a una gran variedad de elementos, fórmulas repletas de coeficientes experimentales contenidos en un gran número de tablas. Al final, este tipo de libro se transforma en *manual*, *aide-mémoire*, *handbook* o *Lehrbuch*, de gran éxito en la práctica ingenieril. Al ya mencionado de Redtenbacher, y en una línea parecida, podríamos añadir el *Aide-mémoire de mécanique pratique* de Morin, de 1838; la obra *Formules, tables et renseignements pratiques* de Claudel, de 1845; el *Lehrbuch der Ingenieur und Maschinen-mechanik* de Weisbach, de 1846; el *Aide-mémoire général et alphabétique des ingénieurs* de Richard, de 1848; el *Der Constructor* de Reuleaux, de 1861; o *Le vignole des mécaniciens* de Armengaud, de 1863, entre los de mayor éxito.

II.4. La creación de una ciencia de las máquinas y su evolución hasta el final del siglo

Como se indicó anteriormente, Franz Reuleaux, en su *Theoretische Kinematik*, marca la madurez del nuevo saber. El autor argumenta que, mientras que la mecánica general se ocupa de los efectos producidos por las fuerzas en el caso más general, la teoría de máquinas solo estudia los efectos de las fuerzas en sistemas que tienen movimientos restringidos, en los que las limitaciones de movimiento son claves. Los planteamientos generales de la mecánica no le sirven al constructor de máquinas. Para él hay que crear una disciplina nueva, específicamente adaptada a su problema. La ciencia de las máquinas se ha venido desarrollando desde hace más de medio siglo, pero con Reuleaux cobra una autonomía radical.

Una parte esencial de toda rama del conocimiento es su lenguaje. Las aportaciones de Reulaux en este sentido son fundamentales: conceptos de par cinemático y sus tipos³², barra³³, cadena cinemática³⁴, mecanismo³⁵, etc. Además, incide en la importancia para el diseño del desarrollo de métodos de síntesis.

³² Cada una de las uniones entre dos sólidos que permiten un movimiento relativo definido. Por ejemplo: articulaciones, deslizaderas-guías, levas.

³³ Cada uno de los sólidos que forman el mecanismo.

³⁴ Conjunto de barras unidas mediante pares cinemáticos.

³⁵ Cadena cinemática con una barra fija, inmóvil.

Sería extraordinariamente difícil tratar de trazar en pocas líneas la evolución que se produce en la nueva disciplina a lo largo de las dos últimas décadas del siglo XIX. Solo señalaremos, y de forma breve, unos pocos aspectos que en su globalidad dan una idea de la amplitud y la complejidad de planteamientos que va adquiriendo. En cualquier caso, la acumulación de conocimientos hace necesaria una especialización, y ciertos estudios van consiguiendo su propia autonomía: los motores térmicos, las máquinas hidráulicas, las tecnologías de fabricación, la ingeniería de vehículos, la automática.

II.4.1. La teoría de máquinas y mecanismos

Desgajado del tronco común lo referente a los motores y a los operadores, queda una teoría que recoge tres aspectos esenciales de los órganos destinados a la transmisión de movimientos y fuerzas entre los motores y los operadores: la cinemática y la dinámica de mecanismos y la construcción de elementos de máquinas. Los tratados de máquinas de finales de siglo se centran en estos aspectos y dan lugar a un esquema que se ha mantenido hasta la actualidad. Un ejemplo claro de este planteamiento es el *The mechanics of machinery* de Alexander Blackie William Kennedy (1847-1928)³⁶, publicado en Londres en 1886.

II.4.2. La síntesis de mecanismos

Los métodos utilizados hasta ese momento han sido métodos de *análisis*; es decir, dado un mecanismo, se calcula el movimiento resultante a partir de un movimiento de entrada (cinemática) o de una acción aplicada (dinámica). Sin embargo, el problema del diseñador de nuevos mecanismos es el inverso: se parte de un movimiento resultante para una entrada dada y se trata de buscar mecanismos que satisfagan dicha relación. En esto consiste el problema de síntesis de mecanismos, que es bastante más complejo que el de análisis y no admite planteamientos genéricos. Un aspecto a tener en cuenta del desarrollo de los métodos de *síntesis* es el interés por parte de algunos matemáticos en la aplicación de sus conocimientos de cinemática teórica a los problemas que aparecen en el diseño de mecanismos. Un problema clásico de síntesis ha sido el de la generación de trayectorias rectilíneas o casi rectilíneas por puntos del mecanismo. Si tuviéramos que señalar de una manera particular alguna aportación relevante a este nuevo planteamiento de la teoría de mecanismos, nos quedaríamos probablemente con la obra de Ludwig Burmester (1840-1927)³⁷, y en concreto con su *Lehrbuch der Kinematik*, publicado en 1888.

³⁶ Alumno de la City London School y de la Royal School of Mines, profesor del University College de Londres de 1874 a 1889, traductor e introductor de la cinemática de Reuleaux en Inglaterra.

³⁷ Profesor de Geometría en Lodz y Dresde.

II.4.3. Los nuevos métodos pedagógicos

Frente a las expresiones analíticas de mayor o menor complejidad, para facilitar la enseñanza utilizando herramientas más intuitivas y de más fácil aprendizaje comienzan a extenderse los métodos gráficos en la resolución de los problemas cinemáticos y dinámicos. Ejemplo de ello son, respectivamente, los tratados de Robert H. Smith, *Graphics or the art of calculation by drawing lines*, de 1889, y Gustav Herrmann, *Zur graphischen Statik der Maschinengetriebe*, de 1879.

Otro aspecto es la introducción de los laboratorios educativos. Una característica singular de la educación ingenieril en Estados Unidos es la temprana integración de los laboratorios de experimentación en la enseñanza. Robert Henry Thurston (1839-1903) pone en marcha en 1874, en el Stevens Institute of Technology de Nueva Jersey, el que es considerado primer laboratorio de ingeniería mecánica en una institución educativa. Abarca las siguientes cuestiones: el ensayo de materiales, la resistencia y la elasticidad, la determinación de coeficientes de fricción, los ensayos de lubricación, los ensayos de herramientas, las transmisiones y los motores. En Alemania, Alois Riedler (1850-1936), profesor de la Technische Hochschule de Berlín, lleva a cabo en 1893, por encargo del Ministerio de Educación de Prusia, una visita a los laboratorios educativos de ingeniería de Estados Unidos. El resultado principal es una reforma de los estudios técnicos en Alemania en la que también se potencia la formación basada en los laboratorios.

II.4.4. Hacia la universalización

Si hasta la mitad del siglo XIX el desarrollo de la disciplina se produce fundamentalmente en Francia, en torno a profesores y alumnos de la École Polytechnique, conforme avanza la segunda mitad, y sobre todo en las últimas décadas de la centuria, empiezan a cobrar protagonismo otros países y otras lenguas, principalmente Gran Bretaña, Alemania y Estados Unidos. Esto es solo el paso inicial para que a lo largo de la primera mitad del XX sus aportaciones se extiendan a todos los continentes. En la actualidad 44 países forman parte de manera oficial de la International Federation for the Theory of Mechanisms and Machines (IFTOMM).

III

LA CIENCIA DE LAS MÁQUINAS EN ESPAÑA

Todo lo anterior deja patente la escasa participación española en el proceso de generación de la nueva rama del saber, en línea con la carencia relativa en la creación científica y con el retraso en la industrialización, que, por otro lado, comparte España con muchos países, incluso europeos, en este período.

Sin embargo, el país sí se mantiene informado de lo que en este sentido ocurre en las instituciones avanzadas y los nuevos desarrollos se aplican con un retraso mínimo respecto a sus primeras aplicaciones. Y, consecuentemente, la difusión de los cono-

cimientos, especialmente a través de las escuelas de ingeniería, se realiza también con un retraso mínimo.

III.1. *Los protagonistas*

Queremos hacer especial mención de algunas de las personas que tuvieron mayor incidencia en la difusión de los nuevos conocimientos en España y que contribuyeron a ella con la publicación de libros y apuntes de particular relevancia en las enseñanzas ingenieriles a lo largo del siglo XIX. El orden solo está relacionado con la fecha de publicación de sus principales trabajos. Además de explicar cómo quedan contenidos en sus obras los avances de la disciplina comentados anteriormente, hemos querido añadir, cuando ha sido posible, alguna apreciación del propio protagonista o de personas próximas que nos permita acercarnos no solo a sus conocimientos, sino también a ciertos detalles de su personalidad o de su visión.

Manuel María de Azofra (1813-1879)³⁸

En el año 1838, estando en Valencia, publica *Curso industrial o lecciones de aritmética, geometría y mecánica, aplicadas a las artes*. En el discurso de apertura del libro el autor se posiciona claramente acerca de la altura de sus contenidos matemáticos:

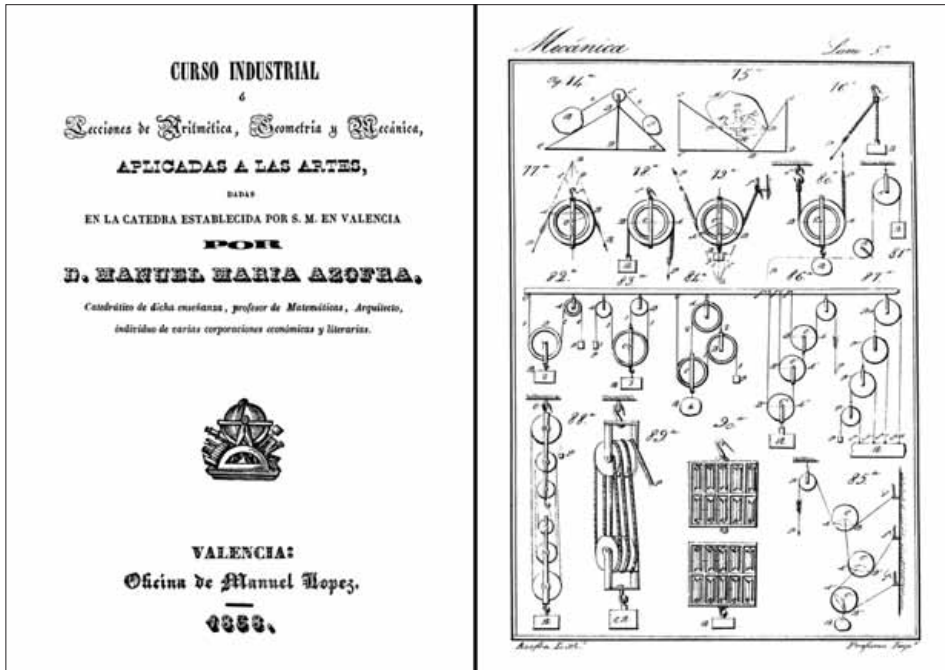
En el orden antiguo de estudiar se obligaba a recorrer todos los ramos de las Matemáticas puras y abstractas antes de comenzar ningún estudio de aplicación; y de aquí resultaba que, cansados los más con tantos estudios preliminares, eran pocos los que hacían verdaderos progresos en las ciencias. Se quería que todos fueran matemáticos profundos; como si todos estuvieran dotados de la fibra necesaria para ello; como si todos estuvieran destinados a ser sucesores de Euclides, de Arquímedes o de Newton; de aquí resultaba también, por una parte, que las clases numerosas, las que debían hacer mayores aplicaciones de estas ciencias, eran retraídas de su estudio, y por otra que como los pocos que se dedicaban a él no tenían ningún roce con las artes industriales ni hacían a ellas las aplicaciones de que son susceptibles, ni progresaban tampoco en los conocimientos científicos, que llegaban a mirar con tedio por no saber sacar de ellos las utilidades que se prometieron.

Volvemos a encontrarnos con razonamientos parecidos a los utilizados pocos años antes por Christian y Dupin en los comienzos de la mecánica industrial.

La parte correspondiente a la mecánica es un tratado elemental clásico de principios de siglo, con los tradicionales temas de análisis bajo condición estática de las máquinas simples y la visión de las fuerzas en la línea de d'Alembert y Carnot, aunque matices, por ejemplo, que «la verdadera fuerza, la medida exacta de ella, es el producto constante de dos factores variables, la masa puesta en movimiento y la velocidad comunicada»³⁹.

³⁸ Véase apunte biográfico, en M. SILVA SUÁREZ (ed.), 2007, p. 625.

³⁹ El autor parece querer utilizar el concepto de potencia, que es producto de la fuerza por la velocidad. Error conceptual típico al sustituir el término fuerza por el de masa.



11.2. Curso industrial de Manuel María de Azofra (1838): En la lámina puede observarse el planteamiento estático de diferentes configuraciones de polipastos, con diagramas vectoriales de descomposición de fuerzas, aproximación clásica al estudio de las máquinas simples en los tratados de mecánica de comienzos de siglo.

La mecánica incluye una parte estática con seis lecciones dedicadas a las máquinas de cuerdas, la palanca, el plano inclinado, las poleas, el torno⁴⁰, la rosca y la cuña. La dinámica contiene una única lección acerca del rozamiento y la rigidez de las cuerdas. En la última parte, sobre la hidrodinámica, el autor emplea una lección para hablar de motores hidráulicos, en la que introduce el concepto de trabajo tal como lo había definido Coriolis nueve años antes. Utiliza las denominaciones de Borgnis para las partes de las máquinas —*receptor*, *operador* y *partes intermedias*— e incluye el teorema de Carnot para aumentar el rendimiento del motor: «Se debe dirigir siempre que se pueda el esfuerzo del motor tangencialmente a la línea descrita por su punto de aplicación».

Asimismo, da unas reglas para el establecimiento eficaz de las máquinas:

- 1.º Disminuir los rozamientos.
- 2.º Hacer el movimiento uniforme.

⁴⁰ Máquina herramienta para el mecanizado de superficies de revolución.

- 3.º En el movimiento alternativo, hacer variar por grados la velocidad⁴¹.
- 4.º Hacer chocar los martillos y álabes por los centros de percusión.
- 5.º Dar el menor juego posible.
- 6.º Regularizar la acción de la potencia y de la resistencia por medio de volantes, moderadores, etc.

Azofra menciona los trabajos de Coulomb para medir la capacidad de trabajo del hombre por jornada. Incluye referencias muy actualizadas a los tratados de Borgnis, Poncelet, Navier, Taffe, Christian y Coriolis. En suma, el autor es perfecto conocedor de la teoría de máquinas que está desarrollándose en Francia, aunque a esta cuestión le dedica una única lección y de carácter descriptivo.

Su interés le permite estar al tanto de obras tan especiales como la de Neil Arnott *Elementos de física o de filosofía natural, general y médica*, traducida al castellano en 1837, que en alguna de sus partes constituye un verdadero tratado de biomecánica.

El médico instruido no puede prescindir de estudiar las máquinas, en especial las cuerdas y las palancas, el choque de los cuerpos, y sobre todo el equilibrio y movimiento de los fluidos para conocer la estructura del cuerpo humano cuyas dolencias debe aliviar.

Es interesante el comentario que hace en 1838 en torno a una previsible utilización de la energía eléctrica:

¿Y creemos que estos agentes [energía animada, eólica, hidráulica] sean los únicos que puede utilizar el hombre? Así se creía, y bien equivocadamente, antes de la invención de las máquinas de vapor; por lo que no debemos incurrir ya en semejante yerro. El fluido eléctrico aún no se ha utilizado del modo de que quizá sea susceptible cuando se conozca bien su fuerza y sus propiedades.

Un detalle de su discurso puede estar relacionado con el problema del absentismo de los estudiantes en las nacientes enseñanzas y sobre todo con el del abandono, con todas las consecuencias negativas para el proceso de difusión de los conocimientos que de ellos se derivan:

A pesar de todo, y aunque se tengan impresas estas lecciones, yo exhorto a una asistencia constante; en efecto, una lección escrita no puede decir tanto como una lección oral; en aquella es menester prescindir de una multitud de explicaciones y pormenores que harían la obra costosa al par que pesada, y de viva voz, y acomodado el profesor al estado de cada uno con quien habla, aumentan el convencimiento de todos; así se ve que es siempre más fácil comprender una lección de esta clase que otra escrita; y digo que la asistencia debe ser continua, porque estas ciencias son una cadena, y cada una de sus verdades los respectivos eslabones; roto uno, se acabó su enlace; y dejada una lección, es muy difícil, por no decir imposible, comprender las siguientes; de aquí resulta que, como no se comprenden, se oyen al principio con indiferencia, luego con fastidio,

⁴¹ Con esta expresión, el autor quiere señalar que el valor de las aceleraciones, de las que dependen las acciones inerciales, debe ser limitado.

y por último se abandona el estudio: estas ciencias son sencillas, y sus verdades claras y fáciles de comprender, pero es estudiándolas sucesivamente; cualesquiera salto que se dé, cualesquier hueco que se deje en ellas imposibilita comprender las demás. Por la misma razón es necesaria una atención y estudio continuados: el que no escucha mal se podrá aprovechar de lo que oye; y el que no estudia nunca sabrá nada: llévense ustedes siempre por norma que en las enseñanzas públicas no se puede aspirar a saber, sino a saber los medios de aprender, y sobre todo que solo sabrán ustedes lo que aprendan, y no lo que les enseñen, porque no todo lo que se enseña se aprende.

En 1851 se publica una real orden que dispone que los profesores del Real Instituto Industrial y de las demás escuelas industriales adopten las obras que juzguen más adecuadas de entre las que figuran una lista. Para la enseñanza elemental de Álgebra, Geometría y Mecánica aparece la obra de Azofra, profesor del mismo, lo que le asegura cierta difusión en la época. En lo que respecta a Mecánica, aparece entre las siguientes alternativas: la *Geometría y mecánica aplicadas a las artes* de Dupin, el *Curso de mecánica industrial* de Jariez y el tratado de Neil Arnott. Por el número de ejemplares que quedan en el patrimonio bibliográfico nacional, parece que el libro de Azofra fue el más difundido.

José de Odriozola y Oñativia (1786-1864)⁴²

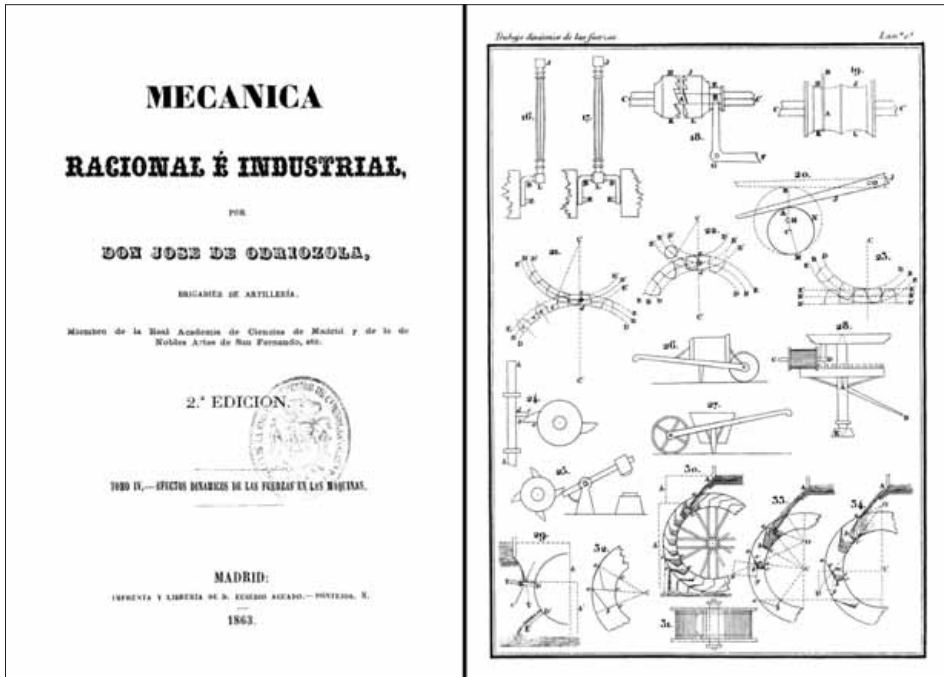
Además de diversas memorias sobre temas relacionados con armamento y balística, publica dos obras de gran difusión en la época: la primera, por la que es más conocido, es un *Curso completo de matemáticas puras* publicado en 1827. Llega a tener hasta cuatro ediciones, la última hacia 1850. La obra está dividida en cuatro tomos dedicados a aritmética y álgebra elemental, geometría elemental y trigonometría, álgebra sublime y geometría analítica, y cálculo diferencial e integral. Pero nuestro interés se centra en un tratado que se edita primero de forma separada para pasar más tarde a formar parte del cuarto tomo de un tratado de *Mecánica racional e industrial*.

En 1839 se publica la *Mecánica aplicada a las máquinas operando o Tratado teórico y experimental sobre el trabajo de las fuerzas*. En este, el autor hace referencia a *Du calcul de l'effet des machines*, libro de Coriolis de 1829, presentando un desarrollo similar. También menciona el trabajo de Lanz y Betancourt. Para separar las partes de la máquina sigue las denominaciones de Borgnis: *receptor*, *operador*. Realiza una clasificación de los mecanismos en función de los movimientos entrada-salida e ilustra la aplicación de dichos conceptos en una máquina de barrenar⁴³ cañones, en la que el motor es una máquina de vapor (movimiento rectilíneo alternativo) y la salida es el movimiento de la barrena (circular continuo).

El contenido está desarrollado en dos secciones: la primera incluye la definición del concepto de fuerza, tal como había sido planteado por Coriolis, y la aplicación del

⁴² Véase un apunte biográfico en M. SILVA SUÁREZ (ed.), 2007, p. 685.

⁴³ Para abrir agujeros cilíndricos en cuerpos sólidos.



11.3. «Efectos dinámicos de las fuerzas en las máquinas». Tomo IV de la Mecánica racional e industrial de José de Odrizola (1863): En las figuras inferiores puede observarse un análisis de la incidencia del agua en una turbina hidráulica como soporte gráfico para el estudio de la mejor disposición de los álabes con el fin de obtener el rendimiento máximo, planteamiento que corresponde a la teoría de máquinas.

principio de trabajos virtuales⁴⁴ y la conservación de las fuerzas vivas al análisis dinámico de las máquinas. La segunda, más descriptiva, recoge información sobre los diferentes tipos de motores animados —hidráulicos, eólicos y de vapor— y finaliza con una parte dedicada a los rozamientos. La novedad y el interés de la obra son obvios para el autor.

Esta obra, cuyo asunto, muy poco o nada tratado en España hasta ahora, es de notoria importancia para el porvenir dichoso de nuestra Patria, cuando el genio benéfico de la industria productiva nos guíe.

⁴⁴ El principio de los trabajos virtuales permite establecer las condiciones de equilibrio de un sistema mecánico. Por ejemplo, un mecanismo está en equilibrio bajo un conjunto de acciones (fuerzas y momentos) si la suma de los trabajos de dichas acciones al someter al mecanismo a un desplazamiento virtual (muy pequeño y compatible con las restricciones al movimiento impuestas por los pares cinemáticos) es nula.

Incluidos en el tratado de *Mecánica racional e industrial*, estos contenidos tienen una segunda edición en 1863. Este hecho y el número de ejemplares que se mantienen en el patrimonio bibliográfico nos hacen pensar que la obra cumplió la labor de difundir en España los avances producidos en Francia en torno a la teoría de máquinas, sobre todo teniendo en cuenta la poca difusión directa de la obra de Coriolis.

De hecho, también en la real orden de 1851 es incluida como obra recomendada para la Mecánica Aplicada de la enseñanza de ampliación. Aparecen como alternativas la *Introducción a la mecánica industrial* de Poncelet, las *Lecciones de mecánica dadas en el Conservatorio de París* de Morin, la *Aplicación de los principios de mecánica a las máquinas más en uso* de Taffe y otros libros especializados en máquinas de vapor y motores hidráulicos. También en este caso, el libro más difundido parece ser el de Odriozola.

Cipriano Segundo Montesino (1817-1901)⁴⁵

Pensionado en el año 1834, es enviado a la prácticamente recién creada École Centrale des Arts et Manufactures de París. En los años que allí estuvo debió de tener como profesor a Coriolis, que fue profesor de Mecánica Aplicada de 1832 a 1837. Además en 1832 se crea una cátedra dedicada a la Construcción e Implantación de Máquinas, encargada entre 1832 y 1838 al profesor Ferry, de formación metalúrgica. Posiblemente estos cursos le dieron a Montesino su formación teórica inicial, que complementó con una experiencia práctica a la que dio gran importancia.

Al hacerme cargo del curso de construcción de máquinas cuento con bastantes datos, si bien inconexos, reunidos en algunos años de práctica y sacados de los buenos talleres del extranjero en que he trabajado o que he visitado en el ejercicio de mi profesión. Cuento con una cosa esencialísima, el haber manejado por algunos años la lima y el martillo en aquellos talleres en la construcción de esas mismas máquinas y haber montado en nuestro país algunos talleres de construcción.

En el año 1851 fue encargado de la cátedra de Construcción de Máquinas en el Real Instituto Industrial y plasmó sus lecciones en unos apuntes litografiados de la asignatura en dos tomos y un atlas. Hizo una edición limitada de 14 ejemplares y se los regaló a sus alumnos, de modo que hoy se trata de una verdadera rareza bibliográfica que, por su importancia y contenidos, merecería haber sido impresa.

Hay cierto paralelismo entre su historia y la de Poncelet. Cuando este último es nombrado profesor de Mecánica Aplicada a las Máquinas en la École d'Artillerie et du Génie de Metz, después de llevar años trabajando en cuestiones de geometría, manifiesta su disgusto inicial, pero a continuación pone todo su genio en la nueva dirección y llega a convertirse en la persona más reconocida por su trabajo y sus aportaciones a la nueva teoría de máquinas. Tampoco parece que Montesino hubiese asumido la tarea de buen grado.

⁴⁵ Véase apunte biográfico en M. SILVA SUÁREZ (ed.), 2007, pp. 681-682.

Al reunirnos de nuevo para reanudar nuestras interrumpidas tareas permítanme VV. manifestarles mi sentimiento profundo por la circunstancia de tener que hacerme cargo de una nueva asignatura repitiéndose lo sucedido el año pasado, lo cual, si bien es inherente al período de transición en que se halla el establecimiento y hasta cierto punto inevitable, no deja de ser sensible para VV., no pudiendo menos de resentirse profundamente la enseñanza de estos cambios, pues por muy sabio que se quiera suponer a un profesor no le es dado conocer tan a fondo, dominar y poder enseñar con igual facilidad tres o cuatro ramos distintos del saber humano.

Quiere dejar claro a sus alumnos que sus condiciones personales y las de la propia materia no son las más adecuadas para llegar a buen puerto.

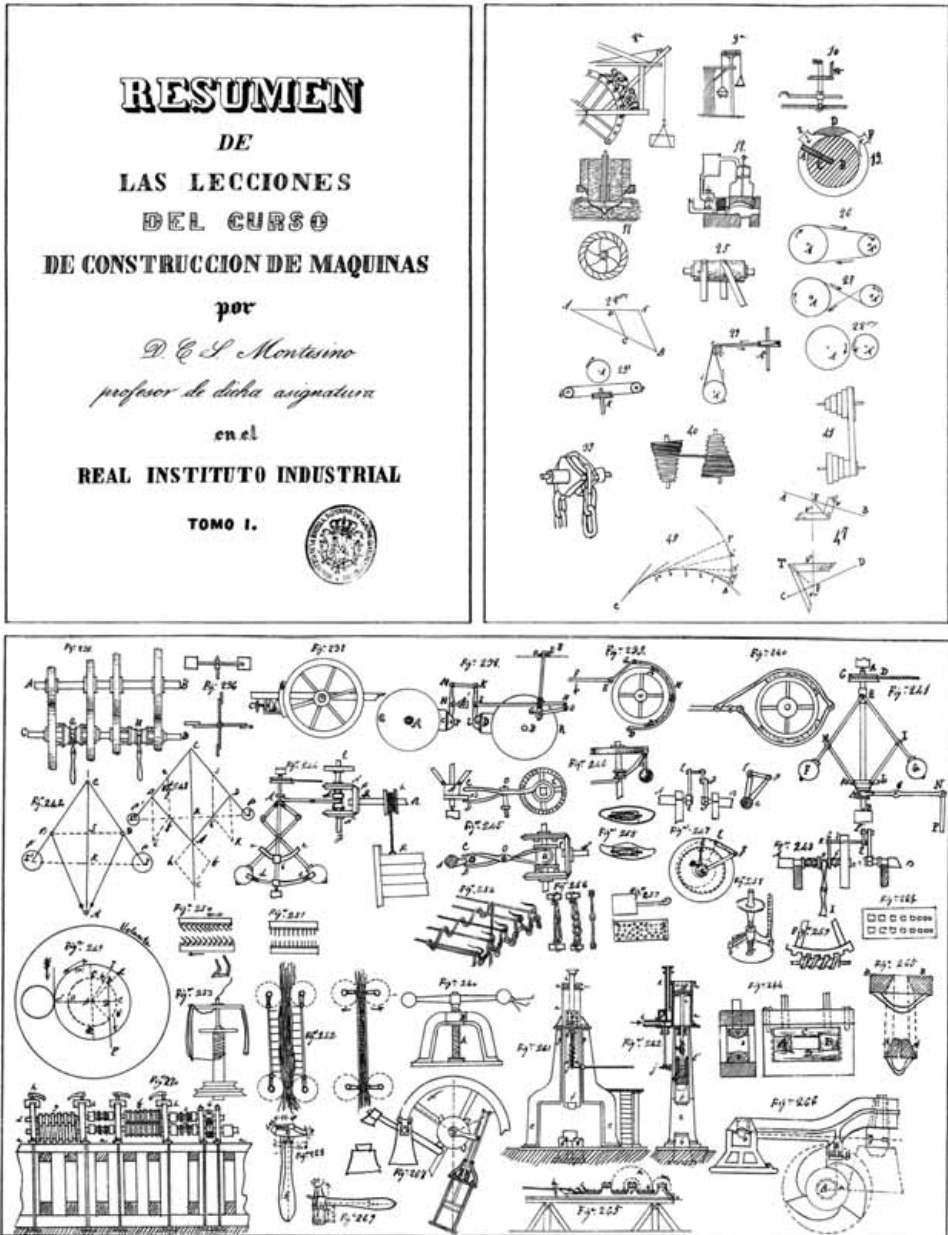
Auméntanse estas desventajas si, como ahora sucede, el profesor es de conocimientos limitados, la materia nueva en la enseñanza, no bien deslindada en su extensión y las obras de consulta pocas, o mejor dicho, ninguna metodizada, de modo que los elementos del curso han de reunirse de multiplicados orígenes y no poco ha de suplirlo la experiencia del profesor, que pretende enseñar.

Más allá del empeño puesto por Montesino y la validez de lo conseguido, trataremos de analizar la realidad que hay tras sus palabras. En la introducción que hace al *Resumen de las lecciones del Curso de Construcción de Máquinas*, enmarca sus contenidos fundamentales, separándolos de lo que denomina *mecánica dinámica* (teoría de máquinas).

El objeto de la dinámica es doble como ustedes conocen y, como toda ciencia que se ocupa de las magnitudes, puede mirarse bajo dos aspectos, el del número y el de la forma. El primero se ocupa del mejor empleo posible de la fuerza motriz, del máximo de efecto útil y de la valoración de las resistencias, constituye lo que se llama mecánica dinámica y forma parte de otro curso. El segundo trata de la dirección del movimiento, de las formas y combinaciones de los órganos destinados a producir un movimiento dado y puede llamarse mecánica geométrica, parte esencialísima del curso de construcción de máquinas.

Lo primero que sorprende es que, para no tratar en la asignatura de la mecánica dinámica, la mayor parte de la introducción la dedica a realizar una síntesis magistral del objeto y los problemas que plantea la teoría de máquinas. En el discurso de Montesino podemos rastrear a Laboulaye, Willis, Navier, Poncelet y Carnot. A pesar de ello, y en la línea de los tratados de dinámica de máquinas más antiguos, incorpora una simplificación no del todo justificada: suponer que las transmisiones suelen tener movimientos de rotación uniforme y que, en consecuencia, pueden despreciarse sus inercias en el análisis dinámico. La parte final la dedica a relacionar las cuestiones que se tratarán a lo largo del curso, e incluye una de las pocas referencias que contiene la obra, un comentario elogioso sobre el libro de Lanz y Betancourt en el que reconoce que abre la marcha en el tema de la composición de máquinas, aunque manifiesta que se trata de algo «que no se encuentra a la altura de la época».

El curso está contenido en dos tomos con diez secciones dedicadas a las siguientes cuestiones:



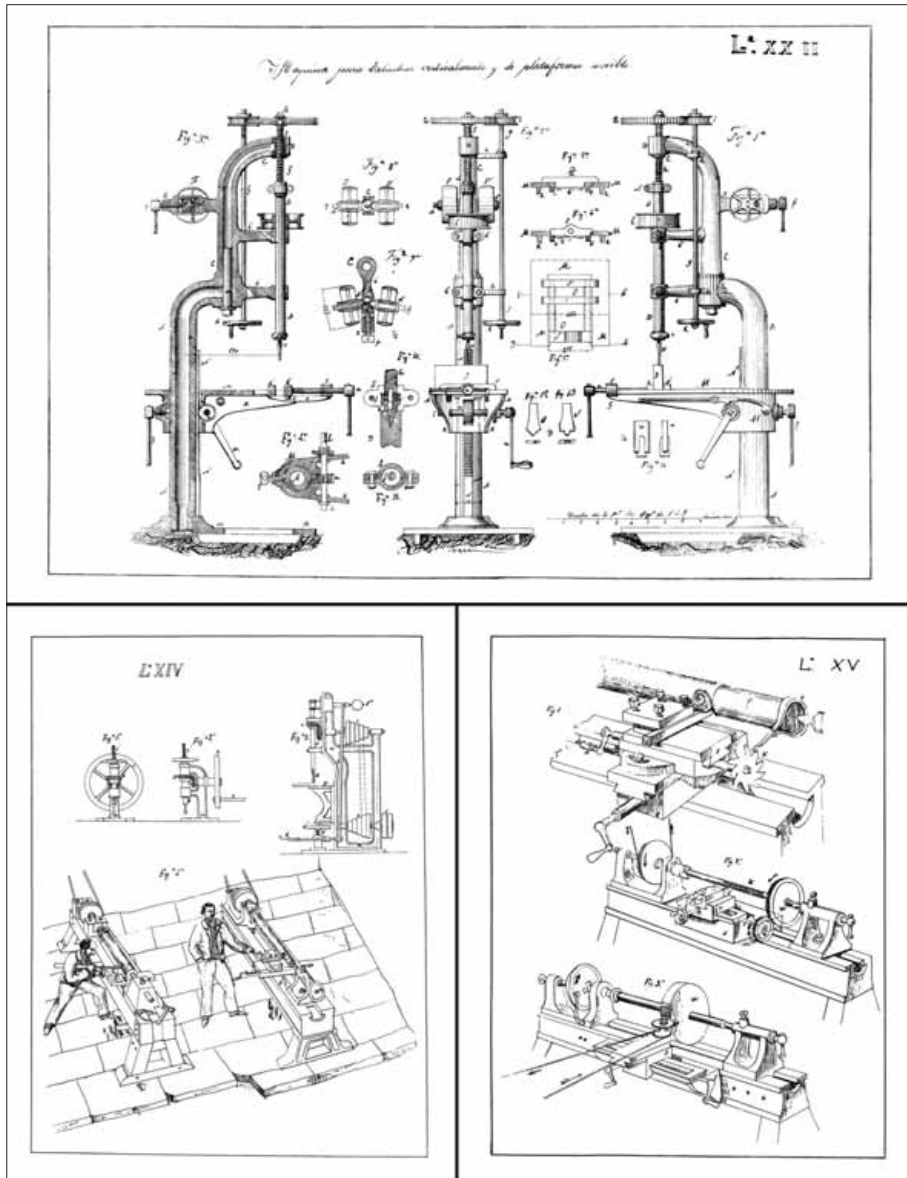
11.4. Resumen de las lecciones del curso de construcción de máquinas de Cipriano Segundo Montesino (1853): Portada del tomo primero y láminas de los apuntes litografiados de la materia, impartida en el Real Instituto Industrial. Pueden observarse mecanismos y máquinas de muy diversos tipos, entre otros: frenos, reguladores, transmisiones de engranajes, transmisiones de correas y cadenas, ruedas de fricción, prensas, grúas, etc. La figura 49 (centro abajo de la lámina en la parte superior) representa el trazado de un perfil de evolvente, empleado en el diseño y construcción de los engranajes (su uso se consolida en la época por sus cualidades mecánicas: relación de transmisión constante, independiente de la distancia entre ejes y dirección invariable de la fuerza transmitida).

- 1.^a Estudio de la naturaleza y las propiedades de los materiales que entran en la construcción de máquinas.
- 2.^a Receptores. Formas de sus órganos y naturaleza del movimiento producido según el modo de acción de la fuerza motriz.
- 3.^a Órganos de comunicación, de transformación del movimiento de una parte de la máquina a otra parte de la misma.
- 4.^a Órganos de las máquinas que sirven para modificar el movimiento y para disponer los elementos en un orden determinado.
- 5.^a Operadores. Órganos que sirven para vencer las resistencias y varían según la naturaleza de las resistencias y el producto que se quiere obtener.
- 6.^a Medios de ensamblar.
- 7.^a Disposiciones, formas y empleo de las diversas piezas de las máquinas.
- 8.^a Establecimiento y construcción de máquinas, tales como las del vapor, ruedas hidráulicas, malacates, grúas, etcétera.
- 9.^a Montage [sic] de las máquinas en general.
- 10.^a Organización de los talleres de construcción.

Indudablemente se trata en su conjunto de una composición bastante original. Hay secciones de teoría de mecanismos (la 3.^a y la 4.^a) y de construcción de órganos de máquinas (la 6.^a), y, junto a ellas, un muy amplio tratamiento de los órganos operadores, en lo que prácticamente constituye un pequeño tratado de tecnología de fabricación. La experiencia de taller, citada por el autor, se ve reflejada en la cantidad de datos y tablas, y sobre todo en dos aspectos poco tratados en los libros: el montaje de máquinas en la sección 9.^a y la organización de los talleres en la 10.^a

Los apuntes son parcos en referencias explícitas a otros autores. El amplio tratado sobre engranajes contiene dos a Willis y a Olivier, del que además Montesino manifiesta haber sido discípulo. En el tema de reguladores se menciona a Poncelet. Morin, director del Conservatoire Impérial des Arts et Métiers desde 1843, aparece en la parte dedicada a las uniones y en las cuestiones de resistencia de materiales. En la sección de uniones también figura el famoso constructor de molinos escocés William Fairbairn. En la de resistencia de materiales, después de señalar la introducción dada sobre dicha materia en la asignatura de Mecánica Industrial por el profesor Azofra, el autor alude a Navier. Por último, en la parte dedicada a la transmisión por correas habla de Armengaud. Como puede observarse, aunque predominan las fuentes francesas, Montesino es también buen conocedor de los trabajos publicados en Gran Bretaña, donde estuvo pensionado para ampliar estudios sobre diseño de máquinas.

Los apuntes ofrecen un tratamiento de la materia fundamentalmente descriptivo, acompañado de muchos datos, y nivel matemático elemental. En resumen, es una obra muy práctica y muy actualizada. Su estructura corresponde a la de un manual de ingeniería mecánica. Dado que se trata de los apuntes de un curso, y debido a la cantidad de materia expuesta, surge inmediatamente la cuestión de en qué medida los alumnos tenían capacidad para absorber en un curso tal cantidad de información.

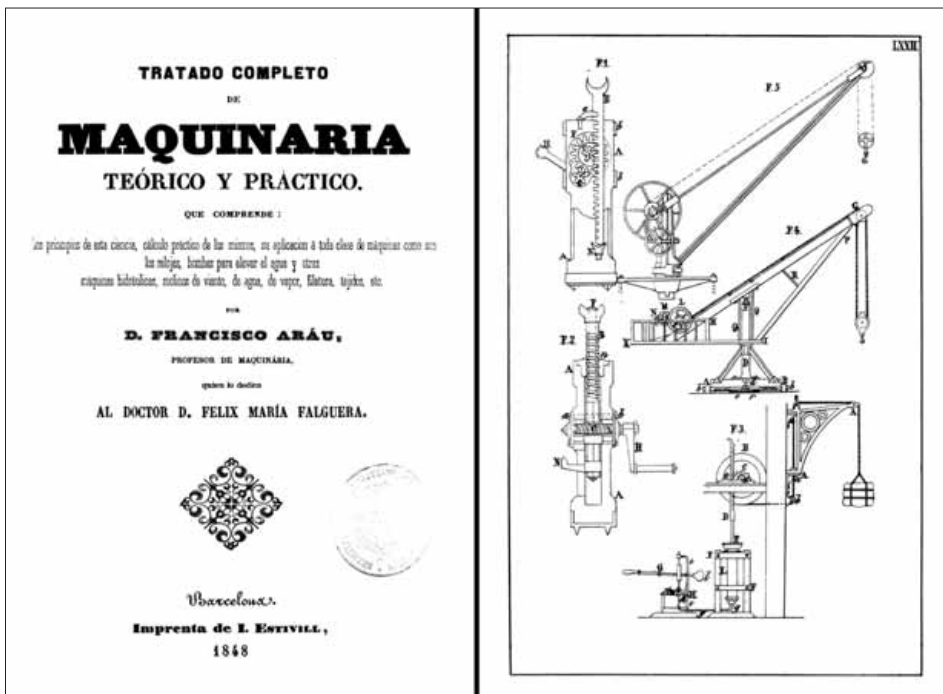


11.5. Resumen de las lecciones del curso de construcción de máquinas de Cipriano Segundo Montesino (1853): 1) Mientras que la mayor parte de los tratados no especializados utilizan fundamentalmente ejemplos de aplicaciones de la máquina de vapor y de máquinas de elevación, el interés constructor de Montesino le lleva a incorporar de forma original diversos ejemplos de máquina herramienta como la de la lámina xxii, que corresponde a un taladro; 2) La lámina xiv presenta una interesante comparación entre un torno semi-manual en el que la herramienta es manejada directamente por el operario y un torno totalmente mecánico que incluye un mecanismo regulador de la profundidad de corte; 3) La lámina xv contiene ejemplos de aplicación del torno a la fabricación de elementos muy comunes: un sinfín (fig. 2) y un engranaje (fig. 3).

Francisco Arau y Sanpons (1797-1867)

Pocas noticias tenemos de su biografía. Sin embargo, estuvo constantemente relacionado con el mundo de las máquinas. Desde el año 1828 fue maquinista de la Casa de la Caridad de Barcelona. Catedrático de Mecánica Industrial y socio fundador del Instituto Industrial de Cataluña en 1848, fue nombrado ayudante de maquinaria en la Escuela Industrial de Barcelona en 1851. Para acercarnos a su perfil humano contamos con una carta dirigida por Josep Roura, director de la Escuela, al ministro de Fomento el 1 de agosto de 1856, en la que abunda en las virtudes y limitaciones de Arau:

La Escuela elemental ha sido regentada por los Ayudantes de esta Escuela en el modo y forma que V. E. se dignó aprobar y estos buenos servidores del Estado han cumplido con sus deberes de una manera tan completa como sus fuerzas respectivas han consentido. Solamente tengo que hacer a V. E. una excepción que me es muy dolorosa porque recae en un sujeto laborioso inteligente y que se halla además en el último tercio de su vida: D. Francisco Arau, que ha dirigido algunos talleres de esta Ciudad y que sería muy apto para la dirección del que debe haber en esta Escuela, es el Ayudante a que me refiero; de alguna edad, ya no puede conservar como profesor de Matemáticas



11.6. Tratado completo de maquinaria de Francisco Arau (1848): Como tratado práctico de maquinaria, en la lámina el autor se fija en los detalles constructivos y en especial en la transmisión, que, por reducción mediante engranajes de corona sinfín o mediante cremallera, permite alzar pesos elevados.

aquel vigor, aquel carácter propio de una cátedra sin aquella frescura y lozanía en las ideas propia de una enseñanza elemental; pero este Ayudante puede ser útil para el Establecimiento; así que he dispuesto, esperando que merecerá la aprobación de V. E., que se encargue de arreglar un pequeño taller de construcción de maquinaria para el curso próximo, valiéndose de los pocos útiles que hay en la Escuela, y al disponerlo así he creído hacer un servicio a la misma porque le creo el más digno del Establecimiento para trabajos de esta naturaleza.

Traduce y anota en 1858 el *Curso completo de mecánica industrial* de Morin y es autor de un libro publicado en 1848, el *Tratado completo de maquinaria teórico y práctico*. La coincidencia de su publicación con su nombramiento para ejercer la cátedra de Maquinaria en el Instituto Industrial de Cataluña nos puede dar una idea de los contenidos de dicho curso. Los primeros capítulos están dedicados al estudio de las máquinas simples en estado de equilibrio. Llama la atención que prácticamente no aborda el problema dinámico. Al tratar los engranajes en el capítulo 6.º no estudia los perfiles de evolvente. En el 7.º da unas nociones de resistencia de materiales, mientras que en el 8.º, el más amplio de la obra, aplica estos conocimientos básicos a la descripción de diferentes máquinas. El Instituto Industrial de Cataluña tenía como objetivo la modernización tecnológica de la industria catalana y, en ese marco, la formación de profesionales de nivel medio que pudieran llevar a cabo tal tarea. El nivel del libro se ajusta a este perfil de alumno y en ese sentido sigue la línea de los tratados de mecánica industrial.

Nicolás Valdés y Fernández († 1872)⁴⁶

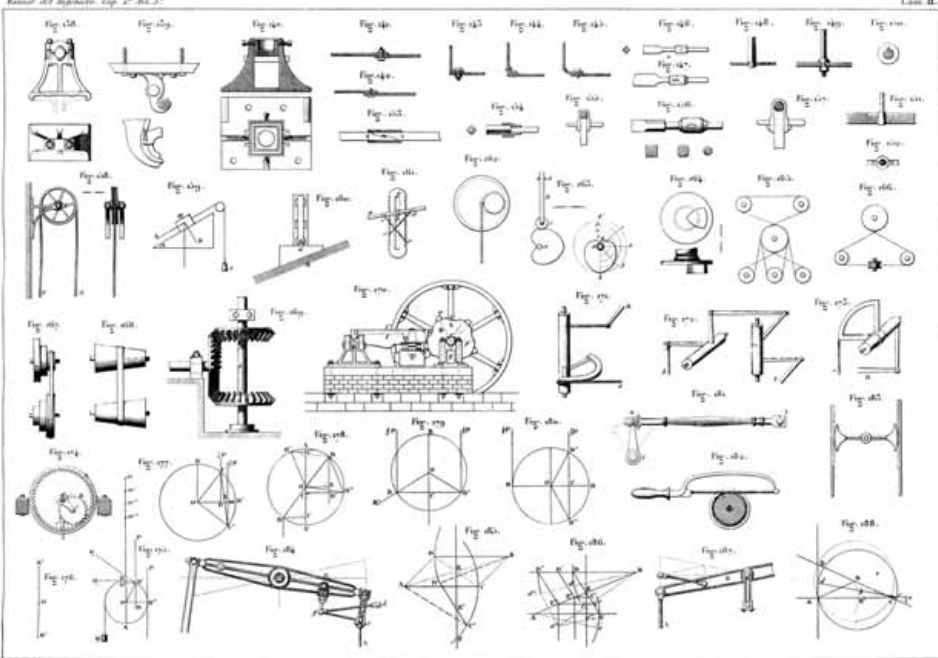
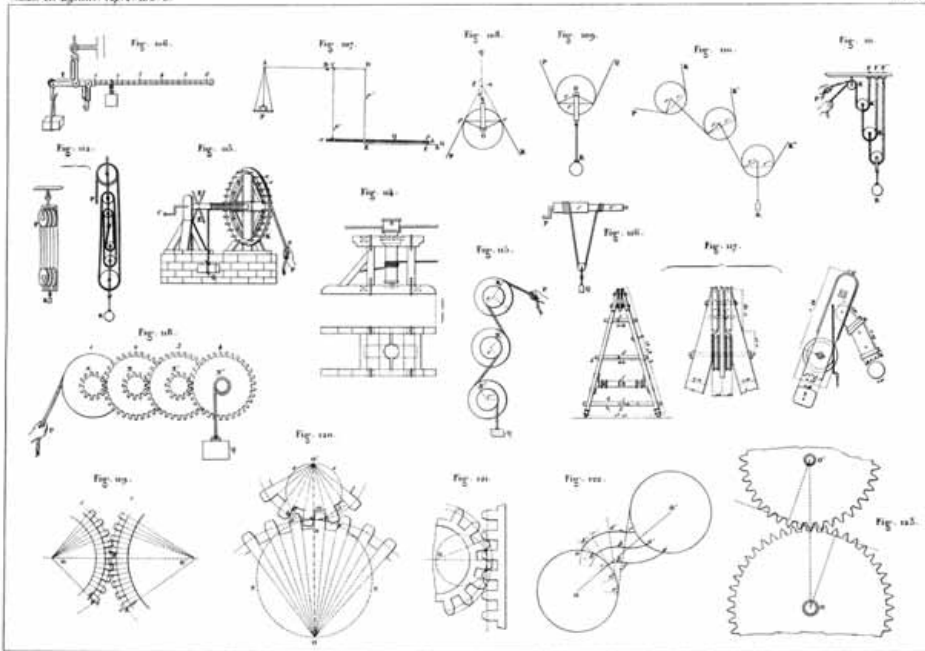
Un fenómeno curioso en el campo de las publicaciones es el de los manuales de ingeniería, los *aide-mémoire*, que proceden fundamentalmente del campo de la ingeniería militar. A juzgar por el número de ejemplares conservados y por su aparición en la relación de libros recomendados a las escuelas industriales en 1861 y 1864 para la enseñanza de las materias de Estereotomía⁴⁷, Mecánica Industrial, Construcciones Industriales, Máquinas de Vapor y Construcción de Máquinas, el *Manual del ingeniero* del coronel de ingenieros Valdés fue una obra de gran difusión y empleo. Tal como indica el autor, la profesión militar exige

un verdadero manual en que se consulten con facilidad tales o cuales principios que unos puedan haber olvidado en todo o en parte por la falta de ejercicio, y otros quieran justificar para llegar prontamente y con seguridad al fin que se proponen, sin la pérdida del tiempo generalmente empleado en registrar obras dispersas y voluminosas, que, además, no siempre es posible llevar consigo si el destino del Ingeniero exige movilidad.

Los sucesivos capítulos del libro van recorriendo los diversos campos de aplicación de la ingeniería: principios y diversos extractos generales de las matemáticas;

⁴⁶ Un apunte biográfico, en M. SILVA SUÁREZ (ed.), 2007, pp. 710-711.

⁴⁷ Arte de cortar piezas para su encaje constructivo, normalmente aplicada a la edificación en piedra y madera.



11.7. Manual del ingeniero de Nicolás Valdés (1859): Libro clásico y muy referenciado, es compendio de datos prácticos de aplicación a la ingeniería y a la arquitectura. 1) En la parte inferior de la lámina superior (lám. 9) destacan diversos dibujos relativos a cuestiones geométricas de los engranajes; 2) El interés del autor por los novedosos temas de la teoría de mecanismos, en concreto por la síntesis de mecanismos en los que algún punto trace trayectorias casi rectilíneas (mecanismos aplicados en las máquinas de vapor), se ve reflejado en las figuras de la parte inferior de la lám. 11 que corresponden al estudio de los mecanismos de Watt y de Evans.

principios de mecánica, donde se incluye una pequeña introducción dinámica, el estudio de las máquinas simples, el rozamiento y la composición general de las máquinas; movimiento y conducción de aguas; máquinas hidráulicas y eólicas; máquinas de vapor; construcciones; caminos ordinarios y de hierro; canales de navegación y riego; fuentes ascendentes o pozos artesianos; gnómica.

De las 1.300 páginas que posee el manual, no más de 50 están dedicadas a los principios de la mecánica aplicada a las máquinas, y unas 150 a las máquinas hidráulicas y de vapor. Corto bagaje para una enseñanza que comenzaba a poseer una amplia acumulación de conocimientos, aunque claramente la vocación del tratado era la de ser manual y no otra cosa.

Ricardo de Aranaz e Izaguirre (1852-1932)

La *Revista de Matemáticas Elementales* editada en Buenos Aires publica una serie de reseñas bibliográficas entre las que aparece una firmada por Otto Krauge sobre el libro *Los mecanismos* (1889) de Aranaz que dice:

Tratándose de una obra de mecánica aplicada escrita en español, este libro reviste doble importancia, y, siendo su autor español, prueba que en España no se descuidan, como algunos creen las ciencias de aplicación para el ingeniero. El hecho de ser algo raras las obras científicas que nos llegan de la madre patria nos ha impulsado a leer este libro con mucho interés. Estando escrita esta obra en nuestro idioma, facilita la lectura del asunto, a la par que nos hace conocer una serie de palabras nuevas en el tecnicismo castellano.

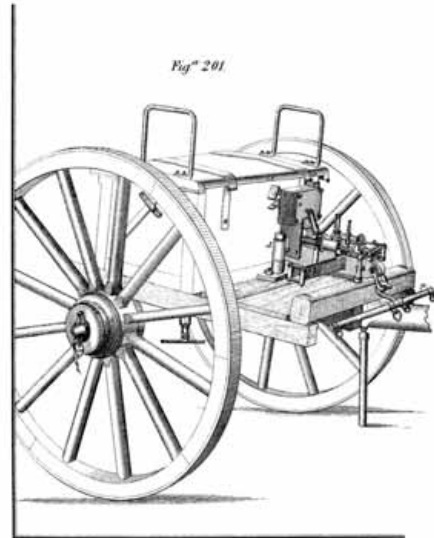
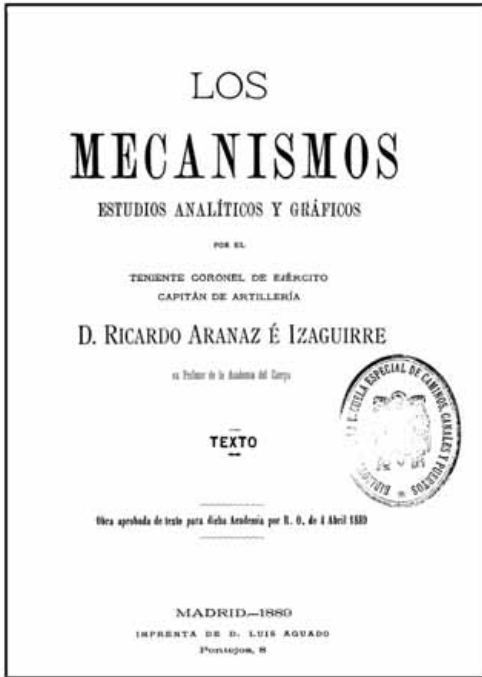
Comentario que refleja la poca productividad de nuestro país en obras científicas, de la que la obra de Aranaz es feliz excepción.

El autor llega a ser general de división procedente del cuerpo de artillería y presidente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales entre los años 1921 y 1922. Posee un buen número de publicaciones en torno a temas de artillería y explosivos, entre los que destacan dos libros de bastante éxito, ambos impresos por primera vez en 1889 y que alcanzan su quinta edición en los años 1923 y 1924. El primero es una obra sobre perspectiva, y el segundo, que es el que a nosotros nos interesa, se titula *Los mecanismos: estudios analíticos y gráficos*.

Muchas cosas son remarcables en esta obra: hay una teoría perfectamente estructurada que abarca la cinemática y la dinámica de mecanismos. Al clásico problema de análisis añade, por primera vez de forma explícita, el de síntesis. Tomando como referencia el mencionado tratado de Herrmann sobre estática gráfica, y agregando las fuerzas pasivas en el problema de equilibrio, introduce los métodos gráficos en la enseñanza de los mecanismos y los utiliza para la resolución de los casos de equilibrio dinámico.

Como puede observarse, la estructura del libro refleja un planteamiento moderno de la materia:

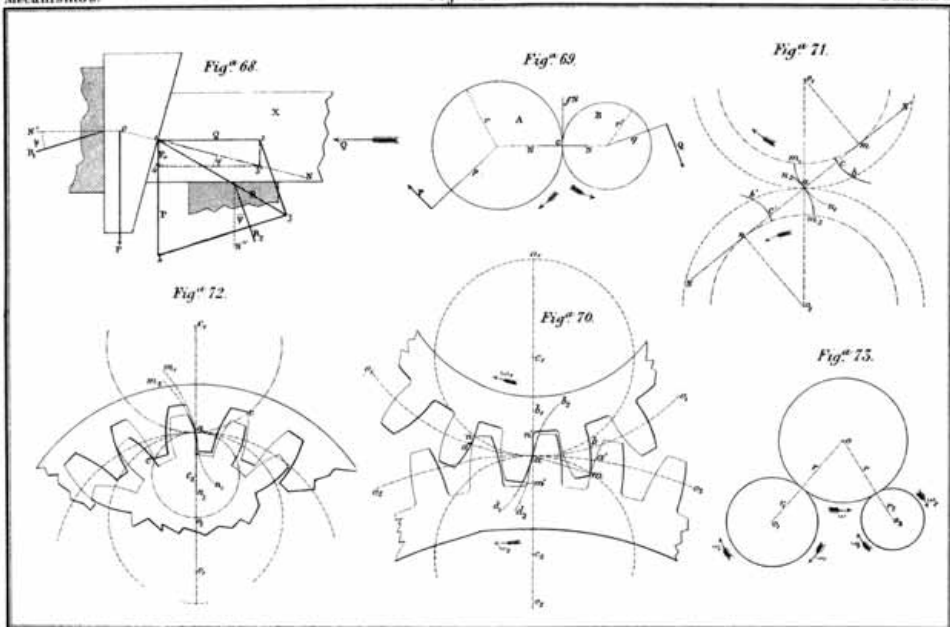
- Estudio primero. Teoría cinemática de los mecanismos.
- Estudio segundo. Teoría dinámica de los mecanismos.



Mecanismos.

Fig.^a 68 á 75.

Lámina 8.



11.8. Los mecanismos de Ricardo de Aranaz e Izaguirre (1889): 1) Portada y representación del dispositivo dinamométrico utilizado para medir la relación entre el esfuerzo de tiro y la carga en carruajes empleados en artillería, prueba del interés por las cuestiones experimentales; 2) El libro aplica la estática gráfica a la determinación de las fuerzas que aparecen en los contactos entre las diversas partes de la máquina. En la primera figura puede observarse que analiza el caso de una cuña.

- Estudio tercero. Aplicación a los órganos generales de los mecanismos.
- Estudio cuarto. Aplicación a los mecanismos de contacto.
- Estudio quinto. Aplicación a los mecanismos de biela.
- Estudio sexto. Aplicación a los mecanismos de órganos flexibles.
- Estudio séptimo. Mecanismos para establecer, interrumpir y modificar los movimientos: embragues⁴⁸, moderadores, volantes, reguladores, modificadores.
- Estudio octavo. Indicadores mecánicos: cinemáticos y dinámicos.
- Estudio noveno. Combinaciones de los diversos grupos y especies: máquinas para elevar pesos, torno de engranajes, diferencial⁴⁹, cabria⁵⁰, grúas.

El libro va acompañado de un compendio de láminas con 230 figuras, muchas de las cuales son de aplicación de los métodos gráficos ya comentados. La única objeción a este interesante tratado es que no haya incorporado los conceptos básicos de la teoría de mecanismos ya desarrollados en el momento de su publicación por Reuleaux.

**Miguel Martínez de Campos y Antón (1839-1906)⁵¹
y Vicente Garcini Pastor (1848-1919)⁵²**

En el año 1885, Martínez de Campos, hasta entonces profesor de Cálculo e Hidráulica en la Escuela de Caminos, es encargado de la asignatura de Máquinas. Diez años antes había publicado Reuleaux su tratado de cinemática. Martínez de Campos será quien introduzca algunos de sus conceptos básicos en la enseñanza de Máquinas en España: en particular, el de par geométrico (cinemático) y el de cadena cinemática.

En su aproximación, desarrolla una visión en la que combina los obstáculos puestos al movimiento relativo en los pares cinemáticos con cuestiones de *teoría de curvatura*, sobre las trayectorias de los puntos de un sólido rígido en movimiento, lo que da lugar a un desarrollo de un alto nivel teórico que, ciertamente, tiene algo de novedoso. No obstante, desde el punto de vista pedagógico-práctico, el método tenía sus problemas, más allá del esfuerzo del profesor por hacer partícipes a sus alumnos de los nuevos planteamientos y más allá de la devoción de los alumnos hacia la figura del emérito profesor. Un testimonio de ello podemos encontrarlo en las *Memorias de la Escuela de Caminos* de Machimbarrena⁵³, en las que afirma lo siguiente de la enseñanza y las clases de don Miguel:

⁴⁸ Mecanismos que posibilitan el voluntario acoplamiento-desacoplamiento de los giros de dos piezas alineadas.

⁴⁹ Mecanismo que permite transmitir una única tracción a dos ejes con velocidades diferentes.

⁵⁰ Trípode armado para manejar grandes pesos.

⁵¹ Un apunte biográfico, en M. SILVA SUÁREZ (ed.), 2007, p. 676.

⁵² Véase apunte biográfico en M. SILVA SUÁREZ (ed.), 2007, p. 656.

⁵³ V. MACHIMBARRENA, 1940.

Los alumnos oíamos asombrados sus profundas explicaciones. Hablaba, con velocidad vertiginosa, la hora y media que entonces duraban las clases orales, sin perdonar un minuto, y a duras penas logramos redactar unos apuntes muy imperfectos. Con frecuencia, le rogábamos que volviese a explicar la lección, que habíamos entendido solo a medias, y era tal su dominio de la materia que jamás repetía del mismo modo lo que nos había dicho.

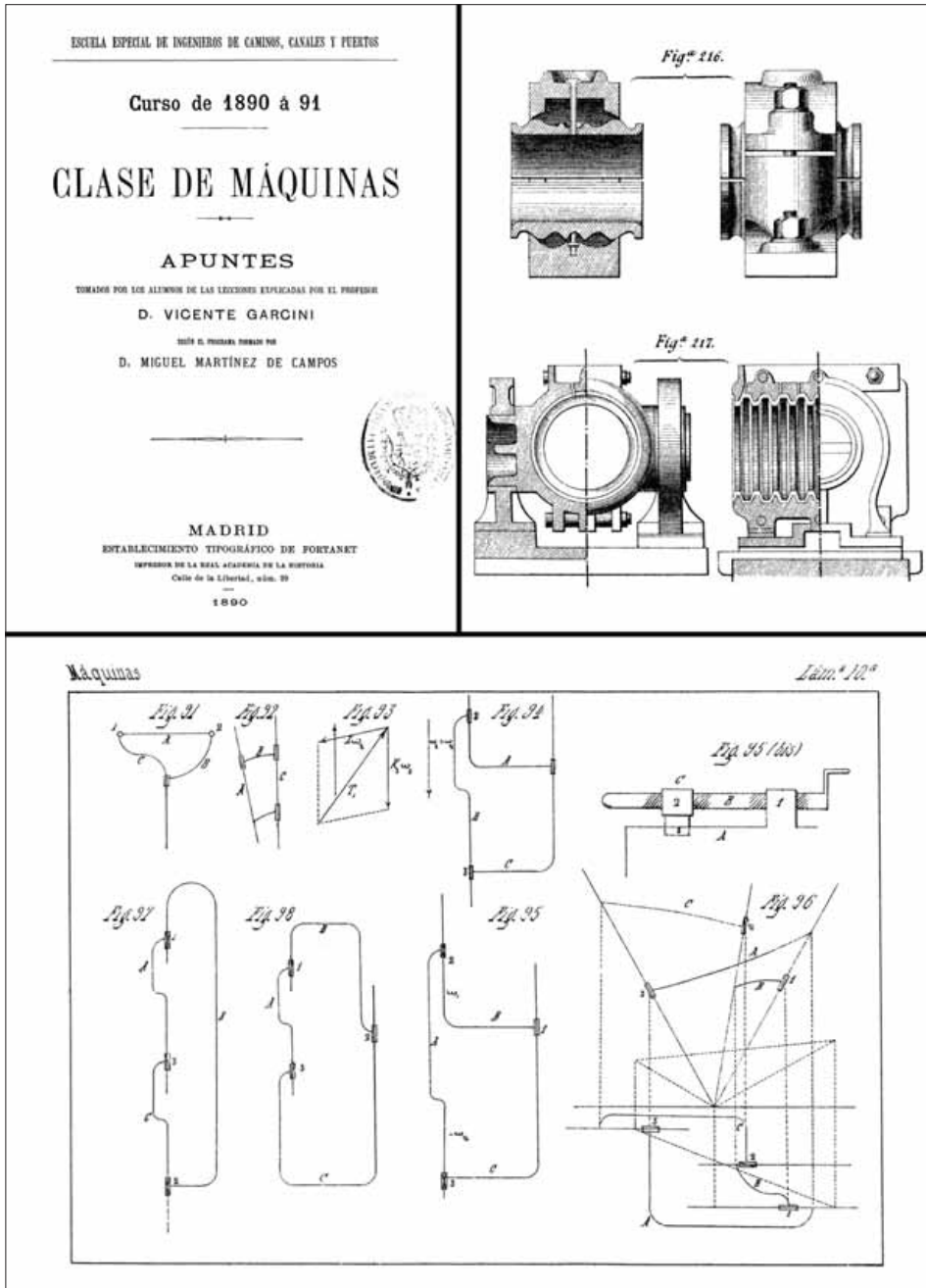
Vicente Garcini fue el encargado de recoger el testigo. En 1890 publicó unos apuntes que contenían la original aproximación de Martínez de Campos a la teoría de mecanismos.

III.2. *La formación*

Desde su comienzo, los planes de estudio dirigidos a la formación de los ingenieros de caminos e industriales recogen materias relacionadas con las máquinas. Independientemente de las vicisitudes en su formación a lo largo del siglo XIX, con o sin escuelas preparatorias, su formación global en el ámbito de la mecánica y de las máquinas se suele realizar en dos fases. Ligada a una materia de Mecánica que en la Escuela de Caminos se suele denominar *Mecánica Aplicada* y en los diversos estudios de Industriales se denomina *Mecánica Industrial*, en la primera se estudian: las máquinas simples —con un planteamiento estático—, el rozamiento y la dinámica de las máquinas en movimiento, analizando sus efectos, aplicando la ecuación del trabajo y energía. La segunda materia se denomina *Máquinas* en los estudios de Caminos, y *Construcción de Máquinas* en Industriales. En esta materia los contenidos son más diversos y claramente evolucionan. Si comparamos el programa de la asignatura de Máquinas de Caminos de 1853 con el que imparte Montesino en el Real Instituto Industrial el mismo año, se puede observar que los contenidos en el último son más amplios y recogen cuestiones no explícitamente tratadas en el primero: el estudio de la naturaleza y las propiedades de los materiales; los medios de ensamblar, las disposiciones, las formas y el empleo de las diversas piezas de las máquinas; su montaje; la organización de los talleres de construcción. Es cierto que la mayoría de estos aspectos no forman parte directamente de la ingeniería de máquinas, pero evidencian una preocupación no solo por el estudio de estas y su diseño, sino también por las cuestiones relacionadas con su fabricación, como corresponde a una visión industrial.

Confrontando los temarios de la asignatura de Máquinas en la escuela de Caminos en los años 1868 y 1886 nos encontramos con novedades importantes en la estructuración de la materia, reflejo inmediato de los cambios introducidos por los planteamientos cinemáticos de Reuleaux. Por primera vez se va a introducir dentro de la enseñanza una teoría de mecanismos propiamente dicha que queda reflejada en la parte primera de la asignatura, cuyos descriptores transcribimos a continuación:

- figuras deformables compuestas de elementos indeformables;
- movimiento de una figura indeformable, considerado independientemente del tiempo;



11.9. Apuntes de clase de Máquinas de Vicente Garcini (1890): 1) Portada y detalles de dos tipos de cojinetes, el superior de acoplamiento esférico y el inferior de un eje de rotación, cuestiones relativas a la construcción de máquinas; 2) Representación de diversos esquemas cinemáticos de mecanismos, utilizando los elementos barra y par cinemático creados por Reuleaux.

- pares geométricos;
- cadenas geométricas.

Las figuras deformables hacen referencia a los mecanismos, y los elementos indeformables, a los sólidos rígidos; por lo tanto, se está hablando de una teoría de mecanismos compuestos de sólidos rígidos. A continuación, con el movimiento de una figura indeformable independientemente del tiempo, se desarrolla la denominada *teoría de curvatura*, aplicándose, a partir del concepto de *perfil conjugado*⁵⁴, al trazado del perfil de dientes en engranajes.

Las dos partes siguientes responden a una incorporación de los conceptos básicos de la teoría de mecanismos desarrollada por Reuleaux y publicada en 1875 en su tratado de cinemática. El concepto de par geométrico como vínculo entre dos sólidos que, por su forma, determina el tipo de movimiento relativo entre ambos⁵⁵. Los clasifica en obstáculos bilaterales y unilaterales, lo que podríamos traducir como pares cinemáticos con cierre de forma o de fuerza⁵⁶. El concepto de cadena geométrica o mecanismo no es más que la combinación de sólidos y pares geométricos para conformar un conjunto que posee capacidad de movimiento relativo entre las partes. En el temario se describen múltiples casos de cadenas simples y compuestas, con especial atención en la resolución del problema cinemático del cálculo de la relación de transmisión.

Todas estas cuestiones no se abordaban en el temario de 1868, y, sin embargo, forman la primera parte del de 1886. Es más, siguen estando presentes y amplían su importancia en el de 1906. De aquí derivan dos cuestiones importantes. La primera, el mayor peso que va cobrando la teoría de mecanismos respecto a la teoría de máquinas y de su construcción en la última cuarta parte del siglo XIX, peso que irá creciendo incluso a lo largo de la primera mitad del XX; la segunda, el corto período de tiempo que transcurre entre la generación de conceptos (Reuleaux, 1875) y su difusión en los programas de las asignaturas (1886): en una década, los alumnos de las asignaturas de Máquinas han podido acceder a los nuevos conocimientos generados.

⁵⁴ Forma que posee el perfil de los dientes de un engranaje para que la relación de transmisión, o relación de velocidades, sea constante, independientemente de la posición relativa de ambas ruedas. Esta es una propiedad esencial en la construcción de la mayor parte de las ruedas de engranaje.

⁵⁵ Por ejemplo, la geometría de una bisagra, un eje cilíndrico metido en un agujero de la misma forma, determina el movimiento de la puerta respecto al marco, un movimiento de rotación plano.

⁵⁶ El ejemplo de la bisagra corresponde a un *cierre de forma*, ya que el movimiento relativo entre marco y puerta viene determinado exclusivamente por la forma de las partes de la bisagra; sin embargo, la rodadura de una rueda de bicicleta respecto al suelo no está determinada únicamente por la forma de la rueda, sino que es necesaria una fuerza que mantenga unida la rueda con el suelo, que en la mayor parte de los casos será el peso de la bicicleta y del ciclista.

III.3. Las referencias bibliográficas

Un apartado importante para conocer la difusión de la disciplina en España es la bibliografía recomendada, así como los fondos bibliográficos existentes⁵⁷. En diversos documentos han quedado referencias de la literatura recomendada, por ejemplo para las escuelas industriales, incluido el Real Instituto Industrial:

- En 1851, para la enseñanza elemental de Mecánica, el *Curso industrial* de Azofra, la *Geometría y mecánica aplicada a las artes* de Dupin, el *Curso elemental de mecánica* de Jariez y los *Elementos de mecánica* de Kater.
- También en 1851, para la enseñanza de ampliación de Mecánica Aplicada, la *Introducción a la mecánica industrial* de Poncelet, las *Lecciones de mecánica dadas en el Conservatorio de París* de Morin, las *Aplicaciones de los principios de la mecánica a las máquinas* de Taffe, la *Mecánica aplicada a las máquinas operando* de Odriozola.
- En 1861 y 1864, para la enseñanza de Ingeniería Industrial Superior, en Mecánica Industrial, el *Manual del ingeniero* de Valdés, la *Introducción a la mecánica industrial* de Poncelet, las *Aplicaciones de los principios de la mecánica a las máquinas* de Taffe; para la Construcción de Máquinas, el *Manual del ingeniero* de Valdés.
- En 1886, en la asignatura de Máquinas de la Escuela de Caminos, el *Tratado de mecanismos* de Haton como obra de referencia; de consulta, la *Mecánica y máquinas* de Bresse, la *Mecánica y máquinas* de Debauve, la *Estática gráfica de los mecanismos* de Herrmann, la *Cinemática* de Laboulaye, la *Mecánica aplicada a las máquinas* de Poncelet, el tratado de cinemática y el *Constructor* de Reuleaux.

Si atendemos a los fondos del patrimonio bibliográfico nacional que se conservan, los libros de mayor éxito son el *Cours de mécanique et machines professé à l'École Polytechnique* de Bour, el *Manual del ingeniero* de Valdés, el *Cours de machines* de Callon, el *Cours de mécanique appliquée aux machines* de Boulvin y *Los mecanismos: estudios analíticos y gráficos* de Aranaz, casi todos ellos de la segunda mitad del siglo XIX. Entre los anteriores destacan el *Curso industrial* de Azofra y la *Geometría y mecánica de las artes y oficios y de las bellas artes* de Dupin. Como puede observarse, no se encuentran entre los más disponibles autores de la talla de Coriolis, Poncelet o Morin, y destaca además, sobre todo en la segunda mitad del XIX, la escasez de tratados en inglés y alemán. Parece haber una dificultad de manejo de estas lenguas, ya que los pocos tratados que existen son traducciones al francés, lo que evidencia cierta barrera idiomática para la difusión de los conocimientos.

⁵⁷ M. FORONDA Y GÓMEZ, 1948; *Catálogos de la Biblioteca de la Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, 1859, 1864, 1875, 1883 y 1896.

IV

CONCLUSIONES

El recorrido efectuado ha permitido, a modo de bosquejo, trazar las líneas de avance que confluyen en los años setenta del XIX en la configuración de la ciencia de las máquinas. Esta es disciplina que continúa evolucionando en lo que resta de siglo, para dar nacimiento a nuevos campos de conocimiento y de aplicación específicos, y universalizarse desde el punto de vista geográfico.

El tratado de Lanz y Betancourt constituye la única aportación española relevante a la nueva rama del saber más allá de nuestras fronteras en el XIX. De amplia difusión en el extranjero, mantiene su vigencia con sucesivas reediciones a lo largo de la primera mitad de la centuria. Adicionalmente, es destacable el esfuerzo de un conjunto de profesores hispanos, alguno, como Cipriano Segundo Montesino, formado en los centros donde se estaba desarrollando el nuevo conocimiento. Con un saber claramente actualizado, contribuyeron a la divulgación en España de lo que se estaba haciendo en otros países, esencialmente en Francia. Los planes de estudio, los programas y los apuntes recogen una preocupación por difundir la disciplina a un nivel similar al de las instituciones de enseñanza técnica de los países de nuestro entorno. No obstante, la preocupación por incorporar la formación de carácter práctico que, a finales de la centuria empieza a evidenciarse en países como Estados Unidos y Alemania, no llega de manera clara a España hasta comenzado el siglo XX.

Se puede concluir que, si bien España no tuvo un papel protagonista, tampoco fue ajena a la incorporación y a la propagación de los nuevos conocimientos en la formación de los ingenieros. Otra cuestión diferente es la de medir las consecuencias del efecto difusor en la creación de un potente sector de construcción de bienes de equipo, pero eso va más allá del alcance de este capítulo.

Agradecimientos. Quisiéramos agradecer las facilidades dadas por la E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos, la E.T.S.I. Industriales y la E.T.S.I. de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid para la consulta de sus valiosos fondos bibliográficos. Extendemos de manera especial nuestro reconocimiento al personal de sus bibliotecas.

TRATADOS DE REFERENCIA

- 1763 BOSSUT, Ch.: *Traité élémentaire de mécanique et de dynamique. Appliqué principalement aux mouvements des machines*, Charleville, Pierre Thesin.
- 1772 BOSSUT, Ch.: *Traité élémentaire de mécanique statique*, París, Claude-Antoine Jombert.
- 1781 COULOMB, C.: *Théorie des machines simples*, París, Moutard.
- 1786 CARNOT, L.: *Essai sur les machines en général*, Dijon, Defay. Nueva edición, *Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement*, París, Bachelier, 1803.

- 1795 EVANS, O.: *The young mill-wright & miller's guide*, Filadelfia, Evans.
- 1808 BUCHANAN, R.: *Teeth of wheels comprehending principles, and their application in practice to millwork and other machinery*, Londres, William Savage.
- 1808 LANZ, J. M., y A. BETANCOURT: *Essai sur la composition des machines*, París, L'Imprimerie Impériale.
- 1810 GUENYVEAU, A.: *Essai sur la science des machines*, Lyon, J.B. Kindelém.
- 1811 HACHETTE, J.-N.-P.: *Traité élémentaire des machines*, París, J. Klostermann.
- 1814 BUCHANAN, R.: *Essay on the shafts of mills containing their description and use, with the kinds of stress to which they are subject and an inquiry into their stiffness, strength, durability and proportion*, Londres, William Savage.
- 1818-1821 BORGNIS, J.-A.: *Traité complète de mécanique appliquée aux arts*, París, Bachelier. Vol. 1: *Composition des machines*. Vol. 2: *Mouvements des fardeaux*. Vol. 3: *Des machines employées dans les constructions diverses*. Vol. 4: *Des machines hydrauliques*. Vol. 5: *Des machines d'agriculture*. Vol. 6: *Des machines employées dans diverses fabrications*. Vol. 7: *Des machines qui servent à confectionner les étoffes*. Vol. 8: *Des machines imitatives et des machines théâtrales*. Vol. 9: *Théorie de la mécanique usuelle*.
- 1822-1825 CHRISTIAN, G. J.: *Traité de mécanique industrielle ou exposé de la science de la mécanique déduite de l'expérience et de l'observation*, París, Bachelier. Traducido por Francisco Arau y Sanpons: *Tratado de mecánica industrial*, Barcelona, Ignacio Estivill, 1849.
- 1825-1826 DUPIN, C.: *Géométrie et mécanique des arts et métiers et des beaux-arts*, París, Bachelier. T. 1: *Géométrie*. T. 2: *Mécanique*. T. 3: *Dynamie*. Traducido por Juan López de Peñalver: *Geometría y mecánica de las artes y oficios y de las bellas artes*, Madrid, Imprenta de Don José del Collado, 1830.
- 1829 CORIOLIS, G.-G.: *Du calcul de l'effet des machines ou considérations sur l'emploi des moteurs et sur leur évaluation*, París, Carilian-Goeury.
- 1832 MORIN, A.-J.: *Nouvelles expériences sur le frottement faites à Metz en 1831*, París, Bachelier.
- 1834 AMPÈRE, A.-M.: *Essai sur la philosophie des sciences ou exposition analytique d'une classification naturelle de toutes les connaissances humaines*, París, Bachelier.
- 1837 MORIN, A.-J.: *Aide-mémoire de mécanique pratique*, Metz / París, Mme. Thil, L. Mathias.
- 1838 AZOFRA, M. M.: *Curso industrial o lecciones de aritmética, geometría y mecánica, aplicadas a las artes*, Valencia, Oficina de Manuel López.
- 1838 NAVIER, C.-L.-M.-H.: *Résumé des leçons données à l'École des Ponts et Chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines*, París, imprimerie et fonderie de Fain. P. 3: *Leçons sur l'établissement des machines*.
- 1839 ODRIOZOLA, J.: *Mecánica aplicada a las máquinas operando*, Madrid, Imprenta del Colegio de Sordo-mudos.

- 1839 PONCELET, J.-V.: *Mécanique industrielle exposant les différentes méthodes pour déterminer et mesurer les forces motrices ainsi que le travail mécanique des forces*, Bruselas, Melina, Cans et compagnie.
- 1841 MORIN, A.: *Notice sur divers appareils dynamométriques*, París, Crapelet.
- 1841 WILLIS, R.: *Principles of mechanisms*, Londres, John W. Parker, West Strand.
- 1842 OLIVIER, T.: *Théorie géométrique des engrenages*, París, Bachelier.
- 1845 CLAUDEL, J.: *Formules, tables et renseignements pratiques*, París, Fain et Thunot.
- 1845 PONCELET, J.-V.: *Traité de mécanique appliquée aux machines*, Lieja, Librairie scientifique et industrielle de A. Leroux.
- 1846 MORIN, A.: *Notions fondamentales de mécanique et données d'expérience*, París, Librairie scientifique-industrielle de L. Mathias. Traducido por Francisco Arau y Sanpons: *Curso completo de mecánica industrial*, Barcelona, Librería nacional y extranjera de Salvador Manero, 1858.
- 1847 JARIEZ, J.: *Cours élémentaire de mécanique industrielle*, París, Mathias.
- 1848 ARAU, F.: *Tratado completo de maquinaria teórico y práctico*, Barcelona, Imprenta de I. Estivill.
- 1848 REDTENBACHER, F.: *Resultate für den Maschinenbau*, Mannheim, Friedrich Basermann.
- 1848 RICHARD, T.: *Aide-mémoire général et alphabétique des ingénieurs*, París, J. Dumaine.
- 1851 DELAUNAY, C.: *Cours élémentaire de mécanique théorique et appliquée*, París, Victor Masson. Traducido por José Canalejas y Casas: *Curso elemental de mecánica teórica y aplicada*, Madrid, Bailly-Bailliere, 1864.
- 1853 MONTESINO, C. S.: *Resumen de las lecciones del curso de construcción de máquinas*, Madrid.
- 1854 LABOULAYE, C.: *Traité de cinématique ou théorie des mécanismes*, París, Librairie Lacroix-Comon.
- 1855 ARAU, F.: *El maquinista práctico*, Barcelona, Administración y Redacción del Plus Ultra.
- 1859 VALDÉS, N.: *Manual del ingeniero*, París, J. Dumaine.
- 1861 REULEAUX, F.: *Der Constructor*, Braunschweig, Friedrich Vieweg und Sohn.
- 1863 ARMENGAUD, A.: *Le vignole des mécaniciens*, París, A. Morel et Cie.
- 1864 HATON, J.-N.: *Traité des mécanismes renfermant la théorie géométrique des organes et celle des résistances passives*, París, Gauthier-Villars.
- 1865-1874 BOUR, E.: *Cours de mécanique et machines professé à l'École Polytechnique*, París, Gauthier-Villars. Fasc. 1: *Cinématique*. Fasc. 2: *Statique*. Fasc. 3: *Dynamique et hydraulique*.
- 1869 RANKINE, W. J. M.: *A manual of machinery and millwork*, Londres, Charles Griffin and Company.
- 1871 BROWN, H. T.: *Five hundred and seven mechanical movements*, Nueva York, Brown, Coombs & C^o.

- 1875 GRASHOF, F.: *Theoretische maschinenlehre*, Leipzig, Leopold Voss.
- 1875 REULEAUX, F.: *Theoretische Kinematik. Grundzüge einer Theorie des Maschinenwesens*, Braunschweig, Friedrich Vieweg und Sohn. Publicada en español bajo la dirección de Francisco Nacente Soler en *Tratado general de mecánica*, Barcelona, J. Romá, 1886.
- 1879 HERRMANN, G.: *Zur graphischen Statik der Maschinengetriebe*, Braunschweig, Vieweg.
- 1886 KENNEDY, A. B. W.: *Mechanics of machinery*, Londres, Macmillan and C^o.
- 1888 BURMESTER, L.: *Lehrbuch der Kinematik*, Leipzig, Arthur Felix.
- 1889 ARANAZ, R.: *Los mecanismos*, Madrid, Imprenta de D. Luis Aguado.
- 1889 SMITH, R. H.: *Graphics or the art of calculation by drawing lines*, Londres, Longmans, Green and C^o.
- 1890 GARCINI, V.: *Clase de máquinas*, Madrid, Establecimiento tipográfico de Fortanet.
- 1890 UNWIN, W. C.: *The elements of machine design*, Londres, Longmans, Green and C^o. P. 1: *General principles, fastenings, and transmissive machinery*. P. 2: *Chiefly on engine details*.
- 1898 JONES, F. R.: *Machine design*, Nueva York, John Wiley & Sons. P. 1: *Kinematics of machinery*. P. 2: *Form, strength and proportions of parts*.
- 1899 BARR, J. H.: *Kinematics of machinery: a brief treatise on constrained motions of machine elements*, Nueva York, John Wiley & Sons.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO J. M.^a: *La ingeniería industrial española en el siglo XIX*, Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, 1961, 2.^a ed.
- y K. CHATZIS: «L'enseignement de la mécanique appliquée en France au début du XX^e siècle», *Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, 46, 1998, pp. 29-46.
- CANO PAVÓN, J. M.: *Estado, enseñanza industrial y capital humano en la España isabelina (1833-1868): esfuerzos y fracasos*, Málaga, Imprenta Montes, 2001.
- Catálogo de la Biblioteca de la Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, Madrid, Imprenta Nacional, 1859, 1864, 1875, 1883 y 1896.
- CHASLES, M.: *Exposé historique concernant le cours de machines dans l'enseignement de l'École Polytechnique*, París, Imprimerie Gauthier-Villars, 1880.
- CHATZIS, K.: «L'enseignement des machines au CNAM (1839-1915). Une mécanique sans mathématique?», *Cahiers d'Histoire et de Philosophie des Sciences*, 46, 1998, pp. 13-28.
- COMBES, C., E. PHILLIPS y E. COLLIGNON: *Exposé de la situation de la mécanique appliquée*, París, Imprimerie Impériale, 1867.
- CUADRADO, J. I., y M. CECCARELLI: «El nacimiento de la teoría de máquinas y Betancourt», en M. Silva Suárez (ed.): *Técnica e ingeniería en España*, vol. III: *El Siglo de las Luces. De la industria al ámbito agroforestal*, Zaragoza, Real Academia de Inge-

- nería / Institución «Fernando el Católico» / Prensas Universitarias de Zaragoza, 2005, pp. 131-181.
- DUPONT, J.: «Le cours de machines de l'École Polytechnique, de sa création jusqu'en 1850», *Sabix*, 25, 2000, pp. 1-35.
- FORONDA Y GÓMEZ, M.: *Ensayo de una bibliografía de los ingenieros industriales*, Madrid, Estades, 1948.
- GRELON, A.: «La naissance de l'enseignement supérieur industriel en France», *Quaderns d'Història de l'Enginyeria*, 1, 1996, pp. 40-60.
- KOETSIER, T.: «Lazare Carnot's theory of machines and the background of Ampère's introduction of the word *kinematics*», en *Proceedings of 13th National Conference on Mechanisms and Machines*, Bangalore, 2007, pp. 29-35.
- «Ludwig Burmester (1840-1927)», en M. Ceccarelli (ed.): *Distinguished figures in mechanism and machine science*, parte 2, Dordrecht / Heidelberg / Londres / Nueva York, Springer, 2010, pp. 43-64.
- MACHIMBARRENA, V.: *Memorias de la Escuela de Caminos*, Madrid, Tipografía Artística, 1940.
- MOON, F. C.: «Franz Reuleaux. Contributions to 19th century kinematics and theory of machines», *Applied Mechanics Reviews*, 56, 2003, pp. 261-286.
- OLIVEIRA, A. R. E.: «The contribution of Coulomb to applied mechanics», en M. Ceccarelli (ed.): *International Symposium on History of Machines and Mechanisms*, Dordrecht / Boston, Kluwer, 2004, pp. 217-226.
- *A evolução do conceito físico de trabalho no contexto das máquinas*, tesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- SÉRIS, J.-P.: *Machine et communication*, París, Vrin, 1987.
- SILVA SUÁREZ, M. (ed.): *Técnica e ingeniería en España*, vol. III: *El Siglo de la Luces. De la industria al ámbito agroforestal*, Zaragoza, Real Academia de Ingeniería / Institución «Fernando el Católico» / Prensas Universitarias de Zaragoza, 2005.
- (ed.): *Técnica e ingeniería en España*, vol. V: *El Ochocientos. Profesiones e instituciones civiles*, Zaragoza, Real Academia de Ingeniería / Institución «Fernando el Católico» / Prensas Universitarias de Zaragoza, 2007.
- WAUER, J., K. MAUERSBERGER y F. C. MOON: «Ferdinand Jakob Redtenbacher (1809-1863)», en M. Ceccarelli (ed.): *Distinguished figures in mechanism and machine science*, parte 2, Dordrecht / Heidelberg / Londres / Nueva York, Springer, 2010, pp. 217-245.