

El ingeniero científico o casa con dos puertas malas de guardar

Javier Aracil

*Escuela Técnica Superior de Ingenieros
Universidad de Sevilla*

*Camino de los Descubrimientos, s/n
41092-Sevilla, España (e-mail: aracil@esi.us.es)*

Resumen

En este artículo se analiza el sentido de la locución ingeniero científico, a partir de una discusión de la especificidad de la ingeniería y de su método. Se parte del papel fundamental jugado por la técnica en la génesis del género humano, así como del de la ingeniería en la de la civilización. A continuación se analiza el método del ingeniero, y se comentan las aportaciones de Simon, Vaughn Koen y Vincenti a la caracterización de ese método, y asimismo las peculiaridades de los conocimientos propios de la ingeniería. Una vez enunciados los rasgos peculiares del ingeniero en relación con los del científico, se está en disposición de analizar el posible significado de qué es un ingeniero científico. Se incluyen además comentarios relativos a algunos casos concretos pertenecientes al ámbito de la ingeniería de control. *Copyright © 2011 CEA.*

Palabras Clave: Técnica, ingeniería, ciencia, método del ingeniero, ingeniería de control.

1. EL HOMBRE Y LA TÉCNICA

La aparición del hombre sobre la Tierra es indisociable de la técnica. En el largo proceso mediante el cual una rama de primates se convierte primero en homínidos y luego en humanos, la técnica juega un papel esencial. Como es bien sabido, la evolución biológica sólo permite la pervivencia de los mejor dotados para sobrevivir, y eso es lo que sucedió con los homínidos y los primitivos humanos que empezaron a desarrollar actividades técnicas. Aparte de las modificaciones morfológicas, lo que marca la transición de los homínidos a los humanos es precisamente la aparición de la técnica. De ella nos valemos para tratar de doblegar nuestro destino, y sin ella no seríamos como somos. Lo que nos ha hecho humanos ha sido precisamente la técnica.

El hombre surge cuando unos primates adoptan la posición bípeda y con ello liberan las extremidades superiores, permitiendo que se desarrollen las manos, que se han convertido en el instrumento esencial para hacer cosas y modificar el mundo, por muy imperceptible que fuese esa transformación en los tiempos ancestrales. El desarrollo alcanzado por el pulgar oponible confiere a las manos unas posibilidades insólitas en el mundo animal (el hombre es el único primate que puede usar un encendedor). Con la aparición de las herramientas se produce también el incremento del cerebro. De este modo la técnica surge de una compleja coordinación entre manos y mente que produce cosas de las que no nos había dotado de forma espontánea la naturaleza.

Así pues, no hay hombre sin técnica. A los fósiles de los homínidos más remotos que se han encontrado se asocian rasgos humanos si a su alrededor han aparecido también productos resultado de alguna forma de intervención humana sobre el entorno natural.

Pero, pese a la trascendencia del hecho técnico, sin embargo en los medios intelectuales ello no ha tenido, en general, un reconocimiento adecuado. Entre los filósofos la consideración de la técnica sólo ha alcanzado un lugar secundario con relación a otras actividades humanas, especialmente la ciencia (la filosofía de la ciencia posee una madurez y una elaboración muy superiores a la de la técnica). Hay no obstante excepciones y algunos pensadores se han ocupado de analizar el papel de ese modo fundamental del quehacer humano. En ese sentido destaca el análisis fenomenológico de las herramientas, y por tanto de la técnica, que realiza Martín Heidegger (1889-1976). En nuestra lengua sobresale el recomendable ensayo *Meditación de la técnica* de José Ortega y Gasset (1883-1955). Otras aportaciones recientes son las de Peter Kroes (Kroes y Meijers (2000)), entre otros.

Por otra parte, es notable que nuestra especie haya recibido precisamente la denominación de *Homo sapiens*, frente a otras posibilidades como sería la de *Homo faber*. Esta última resulta más consistente con la significación de lo técnico que se acaba de resaltar. La razón de esta adopción es que procede de un hombre de ciencia, Carl von Línneo (1707-1778), quien, aceptando la anterior denominación para su propia especie, quiso destacar el carácter definitorio del ser humano como alguien que se caracteriza por cultivar el saber; frente a los que, como Benjamín Franklin (1706-1790), hubiesen preferido que se distinguiese al hombre por su carácter de productor, de alguien que hace cosas pretendidamente útiles, con las que ha sido capaz de modificar el mundo en el que vive, creando una sobrenaturaleza artificial que es dominante en el entorno en el que hoy se desenvuelve nuestra vida.

Interesa resaltar estas cuestiones, pues en nuestro tiempo parece olvidarse, cuando se habla de la ingeniería, que sus raíces se remontan a los primeros pasos que dieron nuestros remotos

antepasados para la transformación del mundo natural que se encontraron, en el artificial en el que hoy vivimos; y que para ello no necesitaron más que una elevada dosis de pragmatismo. El mismo pragmatismo que necesita hoy en día un ingeniero, aunque en la actualidad ese pragmatismo debe estar sustentado sobre el conocimiento científico, o de otra naturaleza, resultado de la experiencia acumulada a lo largo de la historia. Una consecuencia obvia de lo anterior es que, al menos en el tiempo, la técnica antecede a la ciencia sin posible discusión.

2. TÉCNICA E INGENIERÍA

La ingeniería es la forma más elaborada de la técnica. Esa mayor elaboración se asocia con los objetivos pretendidos y con los medios, tanto intelectuales como materiales, empleados para alcanzarlos. Así, si nos remontamos a la prehistoria y consideramos la construcción de dólmenes tendremos que convenir que la organización de recursos humanos y materiales para construir esos portentosos monumentos requerían el concurso de un ingenio y una capacidad de organización que, para aquella época, acaso no tengan mucho que envidiar a las empleadas en las modernas construcciones de nuestras ciudades.

2.1 *Los orígenes mecánicos de la ingeniería*

En las antiguas civilizaciones los artefactos militares y las construcciones arquitectónicas, y otras obras públicas, ocupan un lugar destacado en la creación del mundo artificial. En aquellos tiempos aún no se distinguía entre lo que hoy llamamos ingenieros y arquitectos, por lo que estos dos grupos se atribuyen la paternidad de esas obras. Con independencia de estos debates, más o menos gremialistas, lo cierto es que se trata de realizaciones de carácter monumental que constituyen formas elaboradas del quehacer técnico (no se olvide que arte y técnica tienen raíces etimológicas comunes –*ars* del latín y *tecné* del griego, con el mismo significado–, y que arquitecto deriva de ‘primer o principal técnico’).

El caso es que en el mundo antiguo, además de grandes construcciones (templos, pirámides, canales de irrigación, calzadas, fortificaciones, murallas, máquinas de asedio, etcétera), se encuentran también obras como los ingeniosos mecanismos de los ingenieros helenísticos, entre los que destacan Arquímedes y Heron de Alejandría, cuyas realizaciones muestran un sorprendente aroma de modernidad. Especial mención merece el mecanismo de Antiquitera (Freeth y otros (2006)), de una elaboración tan sorprendente que desborda cuanto se suponía que pudiera ser producido en el mundo antiguo. Deben también mencionarse aquí las embarcaciones, para cuya realización se aplicaron prodigiosas técnicas.

Durante la Edad Media algunos artesanos distinguidos se hacían llamar ingenieros como signo de prestigio. Hasta el Renacimiento, las funciones que cumplen los que ya en esa época se empezaban a denominar regularmente ingenieros son las correspondientes a ingenios militares o bien de construcción de obras públicas. En el mundo de la técnica las máquinas que habían alcanzado mayor elaboración eran los relojes mecánicos con mecanismo de escape, aunque también se pueden destacar las ruedas hidráulicas empleadas en molinos y norias, así como alguna maquinaria textil.

En todo ese largo período, la técnica se lleva a cabo sin el concurso de un conocimiento básico que permita una comprensión compatible con la ciencia del funcionamiento conseguido

para los productos de la técnica, más allá de la constatación pragmática de que la máquina funciona de acuerdo con los objetivos previstos. Un caso notable en este sentido es el de Leonardo da Vinci (1452-1519) quien concibió máquinas de una sorprendente complejidad pero que, las más de las veces, no pudo llevar a la práctica o resultaron irrealizables por carecer del conocimiento de las propiedades físicas de los elementos que integraban esas máquinas.

No obstante, para la concepción de edificios, ingenios y barcos se empleaban todos los conocimientos disponibles en cada época, especialmente los geométricos, que permitían calcular el ensamblaje de las piezas y aplicar procedimientos de una exquisita racionalidad en su construcción. El secreto para llevar a cabo los cálculos precisos de los tamaños de las piezas radica en la geometría. El propio Galileo Galilei (1564-1642), por boca de Salviati, aconseja a los filósofos, en los primeros párrafos de sus diálogos sobre dos nuevas ciencias (Galilei (1976), p. 67), que frecuenten los arsenales de Venecia y aprendan allí del modo de pensar de los constructores de máquinas y barcos.

En la formación del ingeniero hasta mediados del siglo XVIII están presentes componentes de arte. De hecho, en el plan de estudios de la École des Ponts et Chaussées de Rodolphe Perronet (1708-1794), la Escuela de ingenieros más reputada en la Europa de su momento, la formación artística tenía un papel destacado. Sin embargo, en 1793, se crea, por la Revolución francesa, la École Polytechnique de París en la que se pretende formar a un ingeniero que sea más científico que artista. De hecho, en esta Escuela se dedicaban los dos primeros años exclusivamente a la formación científica, inaugurando una tradición que acabaría por asentarse durante más de dos siglos. Lo notable es que la secuencia, primero formación científica y después aplicaciones técnicas, que acaso pudiera ser una opción aceptable bajo una perspectiva didáctica, acabó por convertirse en un dogma según el cual las aplicaciones eran meramente consecuencias de la ciencia, sin tener ninguna especial entidad intelectual propia.

2.2 *Aparecen la electricidad y la información*

La evolución histórica de la ingeniería aparece dominada por realizaciones de tipo mecánico –sea de máquinas o de construcciones– hasta el siglo XIX. En toda la historia de la ingeniería, desde la antigüedad hasta el siglo XVIII, la máquina trata de suplir al músculo en las labores que éste realiza. A principios del XIX hace su aparición la electricidad que estaba llamada a cambiar el curso posterior de la ingeniería, lo mismo que la química que también florece a lo largo de ese siglo, y ambas comparten el ser técnicas no evidentes. Aquí nos interesa sobre todo la electricidad, que permite la transmisión tanto de energía como de información. Con las aplicaciones asociadas a estas dos formas de transmisión se produce un vuelco en las posibilidades del mundo artificial que estaba propiciando la ingeniería.

En el mismo momento que se estaba asentando la Revolución industrial de la mano de la máquina de vapor, en los años treinta del siglo XIX, aparece la telegrafía y con ella la posibilidad de transmitir información a distancia, de forma radicalmente diferente y superior a como se había hecho hasta entonces, mediante señales ópticas o acústicas. Ya en el siglo XX el ingeniero y matemático Claude Shannon (1916-2001) estableció una equivalencia entre elementales conmutaciones

en circuitos eléctricos y las leyes de la lógica. Con ello quedaba abierta la vía hacia las modernas máquinas de procesamiento de información, una de las grandes, sino la mayor, de las innovaciones que aporta el siglo pasado en el ámbito de la técnica.

Al hablar del advenimiento de la información en el dominio de la ingeniería moderna es inevitable mencionar, aunque sea colateralmente, que el propio concepto de información irrumpe también en la ciencia básica. Los seres vivos no se pueden comprender sin el concurso de ese concepto. Estos seres no sólo intercambian materia y energía con el entorno, sino también información. El código genético ilustra palpablemente la relación íntima entre la información y la esencia misma de la vida. De hecho, la vida puede definirse como la capacidad de utilizar energía para mantener estructuras codificadas mediante la información. Gracias a esta última los seres vivos se comportan como islotes antientrópicos (Wiener (1961)).

Aquí interesa destacar que la información también interviene de forma esencial en el funcionamiento de las máquinas. Es sabido que este funcionamiento es el resultado de la acción recíproca entre las partes que la forman. En esa interacción se ha tendido tradicionalmente a considerar únicamente los intercambios de materia y energía. Sin embargo, una máquina, para su propio gobierno, requiere la intervención fundamental de la información. En efecto, el control automático se basa en la estructura de realimentación, uno de los conceptos más fecundos nacidos de la ingeniería, y que se ha adoptado en todos los dominios del conocimiento (Albertos y Mareels (2010)). Este concepto tiene sus raíces en un principio muy intuitivo que consiste en aprovechar, para gobernar un sistema –sea una máquina o un proceso de otra naturaleza–, la información obtenida sobre su comportamiento¹. La realimentación, en su forma más simple, consiste en que cuando se actúa sobre un determinado sistema, esta actuación es función de la discrepancia entre el comportamiento que se quiere para ese sistema y el que realmente tiene. Esto último se obtiene mediante medidas sobre el mencionado sistema que aportan información sobre su estado en cada momento. Este principio es universal y se aplica a todas nuestras formas de actuación, incluso las más elementales, y confiere un carácter aparentemente teleológico –orientado a un objetivo– al comportamiento del sistema que la incorpora (Rosenbrock (1990)). Se trata, por tanto, de un mecanismo que genera un comportamiento por el que el sistema es “succionado” a la posición de equilibrio, y no simplemente “empujado” como sucede en la interpretación de los mecanismos normales (se puede incluso decir que en un mecanismo realimentado se conjugan la causa final y la eficiente, recordando la clasificación de las causas de Aristóteles). La ingeniería de control automático, surgida en torno al concepto de realimentación, aporta una muestra evidente de las peculiaridades del método del ingeniero (Aracil (2002)).

3. EL MÉTODO DEL INGENIERO

Resulta imposible definir al ingeniero por lo *que* hace, ya que las actividades que cubre en sus distintas especialidades son muy variadas: telecomunicaciones, obras públicas, industria, agricultura, montes, minas, aeronáutica, por citar algunas de

las más conocidas. Es *cómo* lo hace lo que marca la identidad de un ingeniero; es decir, es el método lo que lo define. Sin embargo, este método es difícil de precisar por ser el resultado de la conjunción de capacidades creativas, conocimientos y habilidades, todos ellos delicados de concretar. En todo caso, es algo que se aprende con el ejercicio de la profesión, pero que requiere que se sienten adecuadamente las bases en las Escuelas en las que se forman los ingenieros. Esto lo han hecho razonablemente bien las Escuelas tradicionales, pero es un reto para las de nueva creación.

En este apartado se van a comentar algunas aportaciones que ayudan a caracterizar el escurridizo método del ingeniero. Ello, claro está, sin ninguna pretensión de exhaustividad. Así, se va a hablar de las propuestas de Simon, Vaughn Koen y Vincenti con relación a ese método. Estos autores, a partir de su experiencia en diferentes campos de actividad, han realizado propuestas que permiten caracterizar un método que por sus raíces pragmáticas escapa a todo intento de reducción. Los párrafos que siguen pretenden únicamente esbozar algunos aspectos de las propuestas de estos autores, cuyas aportaciones no son fáciles de resumir sin caer en la trivialización. El lector interesado deberá recurrir a las obras referenciadas para una mejor comprensión del alcance de las propuestas de esos autores.

Herbert Simon (1916-2001) es un autor que se ha ocupado de una amplia variedad de cuestiones. En 1978 le fue concedido el Premio Nobel de Economía por su investigación pionera en el proceso de adopción de decisiones en las organizaciones económicas. Recibió también, en 1975, el Premio Turing de la ACM, junto con Allen Newell (1927-1992), por sus contribuciones básicas a la inteligencia artificial. Es autor de un libro sobre las ciencias de lo artificial en el que se exponen ideas de gran interés para la caracterización del método del ingeniero (Simon (1996)).

Distingue Simon entre racionalidad sustantiva u objetiva, y racionalidad acotada o procedimental. La primera es la que se aplica cuando se posee una descripción exhaustiva del objeto de estudio. Es la que aspiran a aplicar los científicos. Mientras que la segunda es aquella que parte de que la información de la que se dispone y que se puede procesar es limitada, y por tanto, con ella sólo podemos aspirar a encontrar soluciones que resulten satisfactorias, pero no la solución óptima a la que aspira el científico. Esta segunda forma de racionalidad es la que aplican corrientemente los ingenieros –así como otros profesionales, como los economistas, los médicos y tantos otros– que afrontan problemas de los que se tiene una descripción incompleta o aproximada y unos objetivos que no están formulados con precisión y exactitud, aunque sí se sabe bien lo que se quiere –que es lo que sucede normalmente en ingeniería–. El ingeniero aspira a que la solución que aporta a un problema funcione satisfactoriamente de acuerdo con los objetivos que han motivado su actuación. Para ilustrar la diferencia entre estos dos modos de racionalidad, Simon recurre a la distinción entre optimización y satisfacción, como objetivo para evaluar la solución de un problema.

Otro autor con aportaciones notables, aunque un tanto provocadoras, es Billy Vaughn Koen, ingeniero nuclear, autor de un libro sobre el método del ingeniero que ha sido objeto de amplias controversias (Koen (2003)). Postula Vaughn Koen que el método de la ingeniería es la estrategia para producir el mejor cambio en una situación dada de la que se tiene un conocimiento incompleto, a partir de los recursos disponibles.

¹ Sin olvidar que el propio uso de la realimentación ya es en sí una muestra de ingenio. Aunque esta estructura se encuentre en el mundo natural, por ejemplo, en los procesos homeostáticos de los seres vivos, no ha sido objeto de un estudio sistemático hasta que los especialistas en control se han ocupado de ella, y han alertado sobre su ubicuidad y relevancia (Wiener (1961)).

Complementa la caracterización del método con la introducción del concepto de heurísticas (o heurísticos) que son aquellas reglas o conceptos que forman el estado del arte de una rama de la ingeniería y cuya fundamentación reside exclusivamente en el éxito que se ha tenido cuando se han empleado con anterioridad. Dice Vaughn Koen que una de esas heurísticas aconseja aplicar el conocimiento científico, siempre que esté disponible.

Por último, conviene mencionar la aportación de Walter Vincenti (1917-), ingeniero aeronáutico, que ha escrito un libro en el que reúne sus reflexiones tras una larga experiencia profesional (Vincenti (1990)). El libro es prolijo en detalles, pues analiza casos concretos en los que se ha visto involucrado y extiende su experiencia al conjunto de la ingeniería. Acaso un buen resumen de sus ideas se tenga en la figura 1, extraída de su libro, y en la que se ilustran las distintas formas de conocimiento del científico y del ingeniero. En esta figura, en su parte izquierda se representa el conocimiento generado por los científicos, cuyo objetivo fundamental es saciar el afán de saber, de conocer cómo es el mundo, cuáles son los principios que regulan su composición y su funcionamiento; mientras que la columna de la derecha se refiere al conocimiento generado por los ingenieros cuyo objetivo primordial es contribuir a hacer cosas (artefactos) dotadas de alguna utilidad; y a cuyo fin están subordinados todos los conocimientos que genera y utiliza el ingeniero.

De ahí las diferencias en la formación de unos y otros. El científico se forma para alcanzar la exactitud, la precisión y la generalidad en un dominio muy limitado de conocimiento, con el que se aísla en su gabinete o en su laboratorio, y produce resultados en forma de proposiciones que se expresan mediante enunciados o expresiones matemáticas; mientras que el otro adopta una postura mucho más pragmática en la búsqueda de soluciones efectivas y satisfactorias a problemas concretos, sin poder sustraerse a toda su complejidad, lo que hace normalmente en forma de máquinas, artefactos o sistemas. El primero es, por lo tanto, un conocimiento que gira sobre sí mismo; mientras que el segundo se “sale” del dominio del conocimiento para nutrir el mundo concreto de los objetos artificiales. En este orden de cosas conviene también recordar el papel tradicional que ha jugado la ciencia en la formación de los ingenieros en la que ha ocupado un lugar destacado al contribuir a la selección y el adiestramiento de las facultades intelectuales de los futuros ingenieros; además de por el valor en sí que la ciencia pueda tener para el ejercicio profesional de la ingeniería, aunque éste sea reducido, al menos para la inmensa mayoría de ellos.

4. LOS CONOCIMIENTOS DEL INGENIERO

Los conocimientos del ingeniero están formados por métodos que permiten sistematizar los modos de conseguir los objetivos prácticos que persigue. Estos métodos están sometidos a exigencias de rigor que no desmerecen de las de los científicos. Sin embargo, aquí procede una importante matización. Tanto en ingeniería como en ciencia se emplean representaciones matemáticas que por su propia naturaleza son, las más de las veces, aproximaciones. Pero, estas aproximaciones tienen un carácter distinto para la ciencia y para la ingeniería. Para la primera son meramente transitorias en una búsqueda persistente e interminable para eliminar o superar el carácter de tales; mientras que para la ingeniería el carácter aproximado es inherente a su propio método, ya que es el producto en correcto funcionamiento lo que sanciona la ejecutoria del ingeniero. Éste,

al aplicar una racionalidad de métodos y procedimientos, tiene un interés más laxo en la fundamentación de los conocimientos de los que se vale para el ejercicio profesional.

Los métodos empleados por los ingenieros en un cierto dominio definen el alcance de la rama de la ingeniería correspondiente, cuyo progreso metodológico se asocia al mejoramiento de esos procedimientos. No obstante, en el ejercicio de la ingeniería, no basta con el conocimiento de esos métodos: hay que recurrir a una ingeniosa conjunción de ellos para resolver los subproblemas en los que se puede descomponer el problema principal; y sobre todo, y además, hay que desarrollar una imaginativa creatividad para idear un sistema artificial. El ingeniero debe combinar habilidosamente los procedimientos disponibles para alcanzar la solución deseada, mediante una peculiar mezcla de métodos analíticos e intuición, para llegar a un objeto que presente el comportamiento artificial perseguido. Así, en ingeniería, un punto crucial es el diseño entendido como la concepción de una combinación de componentes básicos que debidamente entrelazados sean capaces de realizar la función utilitaria deseada.

Para el diseño de cualquier obra de ingeniería, los conocimientos disponibles cuando se aborda un problema, sean los que aportan las ciencias básicas o los propios métodos ingenieriles, son necesarios pero no bastan, no son suficientes para alcanzar el fin deseado; el diseño de un coche, de un avión o de un teléfono móvil no se desprende de ningún cuerpo teórico preestablecido, ya que no hay ningún método ni ninguna teoría o conjunto de ellas que los “cubra”, en el sentido que tiene este término en la teoría de la cobertura legal de Hempel. Puede que existan conocimientos previos que permitan el cálculo de alguna de sus partes, o que sugieran soluciones a algunos de los subproblemas que presenta el diseño, pero la concepción del conjunto no se desprende de ninguna disciplina teórica. Los métodos analíticos, que tanta importancia tienen en la moderna ingeniería, nunca aportan una solución completa al problema. Tienen que ser complementados con procesos creativos, por una parte, y con exhaustivos experimentos relacionados directamente con el sistema en cuestión, por otra. Todo ello hace que el diseño en ingeniería sea un proceso complejo en el que se despliegan múltiples habilidades por parte de los que lo llevan a cabo.

En los casos radicalmente innovadores de la historia de la técnica (el reloj, la imprenta, la máquina de vapor, el avión, el ordenador y un etcétera interminable) la concepción de esas máquinas fue el resultado de la aplicación de innovaciones imaginativas a artefactos que acumulaban una experiencia anterior. Pero, en ningún caso, se disponía previamente de *todo* el conocimiento necesario para concebir esas máquinas, por lo que no cabe considerarlas como mera aplicación de un conocimiento preexistente; es decir, como ciencia aplicada – como conocimiento aplicado a un caso concreto—. Ante esta afirmación posiblemente se arguya eso fue en el pasado y que en la actualidad el superior conocimiento que se tiene del mundo físico –llegando incluso a sugerir la posibilidad de desarrollar nuevos productos técnicos– ha invalidado esa proposición. Sin embargo, aquí se defiende que esto último no es el caso: que aún en nuestros días ese mejor conocimiento no es suficiente para poder considerar que la ingeniería sea meramente ciencia aplicada, ya que además se dispone de un conocimiento útil exclusivamente para la práctica –en un amplio sentido de este término–, pero que no necesariamente satisface las pretensiones de un científico profesional, que aspirará, cuando se

Figura 1. Diagrama que representa el distinto papel del conocimiento en la ciencia y en la ingeniería.

comporta genuinamente como tal, a alcanzar una explicación del fenómeno natural, correspondiente al caso que se esté considerando, mediante una teoría que lo “cubra”; es decir, de la que el problema en cuestión sea una mera aplicación, de modo que se reduzca a un ejercicio que se resuelva completamente dentro del marco de esa teoría –que será concebida por el propio científico en las formas más excelsas de hacer ciencia, o simplemente aplicada en las más habituales–. A veces incluso será el propio ingeniero el que elaborará una teoría, de la que el caso en el que está trabajando sea una aplicación concreta, alimentando así lo que se han venido en denominar ciencias de la ingeniería². Sin embargo, esto no es lo general, y ese modo de actuar sólo será usado normalmente por ingenieros que trabajen en centros de investigación –y que persiguen resultados que sean susceptibles de aparecer en las páginas de alguna de las revistas de gran prestigio en el mundo académico– como se verá en el siguiente apartado. El ingeniero, carente de un conocimiento completo respecto a aquello que está diseñando, tiene que recurrir a reglas heurísticas que evocan las ancestrales muestras de ingenio por las que nuestros antepasados remotos empezaron a crear instrumentos técnicos con los que se dieron los primeros pasos que condujeron a la actual civilización (Koen (2003)), como se ha recordado al principio este artículo.

Por eso la solución de cada problema de ingeniería es, en cierto sentido, incompleta: deja la sensación de si no se habría podido encontrar otra mejor. La formalización del problema, que tanta importancia ha tenido para su resolución, siempre es aproximada y, por tanto, siempre deja gravitando la posibilidad de que se olviden factores esenciales, al menos que puedan manifestarse en un momento imprevisto e inoportuno. Se están realizando importantes progresos en métodos destinados a la verificación y validación de los proyectos de ingeniería, pero estos progresos se desenvuelven en un ámbito acotado que nunca agota la posibilidad de confirmación. Más adelante se insistirá en la ineludible componente subjetiva en la evaluación de un proyecto. Por todo ello el carácter “incompleto” de la

solución alcanzada deja abierta la posibilidad de que en el futuro alguien sea lo suficientemente perspicaz para encontrar una mejor solución. Pero, en cualquier caso, el ingeniero se encuentra, en principio, satisfecho cuando el sistema funciona de acuerdo con sus pretensiones.

5. EL INGENIERO CIENTÍFICO: DUALIDAD Y COMPLEMENTARIEDAD

Una regla gramatical corrientemente aplicada dice que el adjetivo nunca debe “comerse” al sustantivo ni ponerse por encima de él. Esta regla gramatical, con todos los matices que quieran ponerse, no debe olvidarse cuando se habla de un ingeniero científico (algo análogo se puede decir también del ingeniero teórico). El ingeniero es ante todo ingeniero, lo de científico es un matiz sobre el que conviene detenerse. En este artículo se está argumentando a favor de que lo propio del ingeniero es hacer artefactos, dando a este término un sentido muy amplio que comprende aquellos objetos creados por el hombre y que forman parte del mundo artificial, que además están dotados de utilidad o que han sido concebidos con un determinado objetivo. Para imaginarlos y hacerlos es claro que el ingeniero requerirá ciertos conocimientos. Necesita saber las propiedades de los elementos y componentes que incorpora en sus concepciones; requerirá también saber sobre los métodos existentes para hacer lo que pretende; es decir, precisará disponer de un conjunto de conocimientos que le ayudarán, e incluso le serán indispensables, para hacer lo que persigue. Todo este conjunto de saberes, como ya se ha puesto de manifiesto, es necesario, pero no es suficiente. A todo ello el ingeniero debe añadir su ingenio, fraguado en su experiencia profesional, para concebir aquello que le permitirá resolver los problemas concretos para los que se requiere su intervención.

Pero es que, además, los conocimientos del ingeniero no pueden estar exclusivamente subordinados a los mismos cánones que está sometida la actividad de los científicos. En la ingeniería y en la ciencia al emplearse conceptos y métodos análogos, se puede llegar a confundir los dos campos, pero en este último caso se olvida que los cánones, a los que los dos están sometidos, son diferentes, lo que marca las diferencias entre los

² Esa denominación, sin embargo, no resulta del todo satisfactorio por la profusión con que se están empleando locuciones que empiezan con “ciencias de”.

verdaderos científicos y los genuinos ingenieros. Los científicos han desarrollado unos niveles de exigencia en su conocimiento, que aspira a la universalidad y a tener un carácter pretendidamente definitivo –aunque esto último nunca se pueda alcanzar–, que está sometido a requerimientos cognitivos de naturaleza diferente a los del ingeniero, para el que el funcionamiento satisfactorio de los artefactos que diseña, de acuerdo con los objetivos propuestos, es suficiente para poder considerar que ha alcanzado el éxito –miles, o incluso millones, de productos en correcto funcionamiento son la mejor sanción de ese éxito más allá de publicaciones en prestigiosas revistas–. El ingeniero, si se empeña en aplicar los cánones del científico a sus problemas, pierde su especificidad y se convierte en un científico, lo que es otra cosa. Todo ello sin minusvalorar en absoluto la trascendental aportación de la ciencia a la formación de una imagen científica del mundo, conocimiento que resulta de capital importancia para los ingenieros que tratan de transformarlo.

Como ha dicho Simon, el científico se ocupa de las cosas como *son*, mientras que el ingeniero lo hace de cómo *deben ser* para lograr un determinado objetivo (Simon (1996), p. 5). Algo análogo ha expresado el ingeniero aeronáutico Theodore von Karman (1881-1963): el científico describe lo que *es*; el ingeniero crea lo que *nunca ha existido*. Estas dos citas ilustran de forma patente las diferencias entre un científico y un ingeniero. Lo que no excluye que exista una frontera permeable entre unos y otros, y que una misma persona pueda ser las dos cosas: pero siempre lo será en momentos diferentes. Cuando actúe como científico su meta será conocer las propiedades de las cosas, en último extremo las del mundo natural; mientras que cuando actúa como ingeniero lo que hará es contribuir a producir el mundo artificial en el que vivimos. En consecuencia, en cada uno de los casos el canon al que se someterá será distinto. Por ello es tan diferente ser un buen científico y ser un buen ingeniero. La sociedad los distingue claramente.

Por otra parte, el ingeniero atiende a un problema concreto, a un caso particular –ha sido formado para resolver problemas específicos–. Si alcanza soluciones generalizables, tanto mejor, pero ese no es su objetivo. Mientras que el científico busca resultados generales con validez universal. Si sus resultados se aplican a casos concretos, tanto mejor, pero eso no es lo que buscaba en primera instancia. Para el ingeniero el problema o el producto priman sobre el método, justo al revés de lo que sucede con el científico (Forman (2007)).

Los científicos invocan la objetividad como una señal de identidad del método que les es propio. Sin embargo, en ingeniería no es posible desdeñar ciertos aspectos subjetivos en la evaluación de los productos, pues en último extremo suelen ser certificaciones por parte de especialistas lo que sanciona que un determinado ingenio pueda ser explotado. Aunque estas certificaciones estén sometidas a estrictos ensayos de laboratorio del producto en cuestión, esto no impide, en último extremo, que haya siempre un reducto final en el que la subjetividad de los evaluadores sea dominante.

El propio concepto de satisfactorio, que se asocia con la propuesta de Simon de una racionalidad procedimental, es intrínsecamente subjetivo. Así, la búsqueda de lo satisfactorio conlleva una intención que es un ingrediente radical de las acciones humanas. De este modo, una acción intencional utilitaria en primera instancia –y por tanto subjetiva, en la medida que pretende satisfacer las necesidades de alguien– aparece en el núcleo mismo de la ingeniería y aporta un elemento crucial para

definir su especificidad con relación a las ciencias que cultivan los científicos de la naturaleza, cuya intencionalidad posee una componente predominantemente cognitiva, en la que se aspira a que sea dominante la objetividad.

De este modo, el científico pone el acento en saber, en ampliar el conocimiento sólidamente establecido sobre aquello que estudia. Por ello se afana en tener razón; mientras que el ingeniero lo pone en hacer, en producir lo que estima que producirá beneficios; es decir, trata de alcanzar el éxito, que identifica con que lo que produce funcione de acuerdo con las pretensiones que han motivado su actuación y logre una amplia aceptación social. Es la diferencia de énfasis entre *saber* y *hacer* lo que determina los distintos cánones a los que están sometidos, y lo que distingue a unos de otros³. Debe quedar claro que con saber se está pretendiendo aquí aludir a saciar la curiosidad, a tratar de comprender cómo es y funciona el mundo; mientras que hacer se refiere al producir, a hacer intencionalmente cosas artificiales que previamente no existían y de las que se pretende obtener un cierto provecho.

También conviene destacar que el vehículo natural de plasmación del saber científico, en tanto que conocimiento, es su publicación; mientras que lo que hacen los ingenieros conduce a artefactos, que también pueden dar lugar a publicaciones, pero éstas son secundarias: lo principal es el artefacto funcionando correctamente. De ahí que resulte controvertido el procedimiento de evaluación de los ingenieros que trabajan en centros de investigación⁴; por el que se ven forzados a un desdoblamiento de personalidad –o, si se quiere decir de otra manera, a un doble esfuerzo– cuando, por una parte, necesitan publicaciones para progresar en su carrera profesional; y, por otra, llevar a cabo trabajos concretos de ingeniería para estar familiarizados con las actividades propias del mundo que deben transmitir a sus estudiantes, y que deberían también ser el objetivo de sus investigaciones.

Una clara ilustración de lo que se está diciendo se tiene cuando se considera la carrera profesional de científicos e ingenieros. Para los primeros su carrera profesional se consolida al conseguir un puesto estable en un centro universitario o de investigación; mientras que para los segundos la marca de su éxito profesional es el triunfo en el proceloso mundo de la actividad empresarial. El llegar a profesor de Universidad –o a un puesto similar en un centro de investigación– es la culminación de la carrera de un científico; pero no sucede lo mismo con el ingeniero, como es bien patente cuando se observa el mundo profesional de estos últimos. Es claro que en los cánones de unos y otros, de forma más o menos implícita, están presentes estas dos formas radicalmente diferentes de enjuiciar su ejercicio profesional. Desde luego, sucede que no faltan quienes

³ Para ilustrar esta diferencia entre estos dos modos de proceder se puede citar el caso de la tecnología de “recombinación” del ADN, creada por Stanley Cohen y Herbert Boyer, con la que contribuyeron al auge de la ingeniería genética, que ha dado lugar a los transgénicos. Esta tecnología es un ejemplo en el que se ponen de manifiesto las diferencias entre científicos e ingenieros a la hora de explotar las nuevas tecnologías. La empresa Biogen fue una de las primeras en desarrollar proteínas recombinantes. Las vicisitudes de esta empresa se estudian en las escuelas de negocios como ejemplo de esa diferente actitud. Véase “De *in vivo* a *in vitro* a *in silico*: Biogen ante la avalancha de datos”, Instituto Internacional San Telmo, Sevilla.

⁴ En España, cuando esto se escribe, se está produciendo un debate sobre la necesidad de incluir un sexenio de investigación tecnológica específico para los ingenieros. Esta posibilidad tiene enormes dificultades de desarrollo. En todo caso, lo que se acaba de decir no debe considerarse como una toma de posición con relación a ese difícil problema concreto.

tratan de hacerlos compatibles pero, como se decía más arriba, cuando se dedican a una cosa están sometidos a un canon y cuando se dedican a la otra lo están a otro diferente. De ahí el subtítulo de este artículo: “Casa con dos puertas mala es de guardar”, lo que a su vez es el título de una conocida comedia de Pedro Calderón de la Barca que, por su parte, se subtitula “El galán fantasma”.

Llegados a este punto ya estamos en condiciones de volver sobre el ingeniero que da título tanto a este artículo como a este mismo apartado: el ingeniero científico; es decir, aquel ingeniero que hace ciencia sobre los objetos artificiales, para contribuir a concebirlos, calcularlos y explotarlos; que asume como labor la reflexión metódica y sistemática sobre los conocimientos propios para el progreso del mundo artificial. Normalmente, de estos ingenieros cabe esperar que organicen y sistematicen lo que se sabe en el dominio de la ingeniería que practican e incluso que mediante rigurosas inferencias lógicas, sancionadas por los correspondientes experimentos, propongan nuevos conocimientos, normalmente en forma de métodos. Su labor, por tanto, se asemeja a la del científico, y de ahí que sea correcto adjetivarlos de este modo, pero al hacerlo no debe olvidarse lo dicho con relación a la figura 1: sus contribuciones deben estar fundamentalmente orientadas para ayudar al ingeniero practicante, y no a contribuir a un mejor conocimiento de las cosas, aunque a veces sea esto último lo que sucede; lo cual incluso puede que llene de orgullo al propio ingeniero que lo consigue, pero al actuar como un científico altera las metas a las que somete su labor y queda la duda de si se comporta como un ingeniero o como un científico. En todo caso, en el complejo mundo de la ingeniería de nuestros días el ingeniero científico, siempre que asuma su papel, tiene un lugar destacado en el mundo de la ingeniería, aunque pertenezca a un grupo que sea minoritario entre los que se dedican a ese mundo; al contrario de lo que sucede en el interior del mundo académico en donde son mayoritarios, lo que produce una distorsión que conviene no olvidar.

Para terminar con este apartado procede recordar la propuesta de Michael Davis (Davis (1998), p. 15), quien formula una pregunta para establecer una neta cortadura entre un científico y un ingeniero: si se puede elegir entre hacer algo primariamente útil o generar nuevo conocimiento básico, ¿cuál de las dos opciones se prefiere? Esta pregunta se puede reformular, de forma más llana, diciendo: ¿qué se prefiere, publicar un artículo en una revista de alto impacto científico, o aportar una solución a un problema concreto en el ámbito industrial? En la respuesta que se dé a esta cuestión están implícitos las metas de unos y otros, y los cánones a los que están dispuestos a someterse para alcanzarlos.

Con esta distinción se explica cómo las dos clases de profesionales han acabado dando lugar a dos campos diferenciados del quehacer humano, marcados por objetivos y cánones distintos. Por una parte, el de los ingenieros, herederos de la ancestral tradición del hombre técnico, guiados por un objetivo en el que la utilidad de lo producido, con vistas a una meta concreta y preestablecida, es dominante. Y, por otra parte, el de los científicos cuya motivación fundamental es saciar la curiosidad, reuniendo y sistematizando conocimiento con respecto al modo de comportarse todo lo que puebla el mundo, tanto el natural como el artificial.

6. LA PRIORIDAD ENTRE SABER Y HACER

Lo anterior nos sitúa de lleno frente a la debatida prioridad entre saber y hacer. Entre si para hacer algo lo primero es disponer de una teoría básica relativa al dominio en el que se pretende que se desenvuelva aquello que se pretende hacer; o si, por el contrario, el hacer cosas posee un dominio propio en el que la intuición y el tanteo desempeñan, junto con los conocimientos acumulados por la experiencia, un papel principal en esa realización. Esta cuestión se plantea con toda su crudeza cuando se cuestiona si, en las zonas de confluencia, la ciencia antecede –tanto cronológicamente como intelectual o conceptualmente– a la técnica o es lo contrario lo que sucede. Aquí se defiende que lo que ha sucedido corrientemente ha sido el segundo de los casos, pues a lo largo de la historia son incontables los casos que ilustran que eso es lo que ha ocurrido normalmente, aunque en tiempos modernos no faltan quienes crean ver que es lo primero lo que ocurre, debido a la fuerte interpenetración entre la ciencia y la ingeniería en nuestros días. Sin embargo, aún en este último caso se requieren fuertes matizaciones (Forman (2007)).

Es indudable que en los tiempos remotos, como se ha recordado al principio de este artículo, el hombre inicia su intervención en el mundo natural, con el fin de crear el artificial, a partir de su intuición y buen sentido, y de otros valores pragmáticos, sin que su acción esté subordinada a un conocimiento previo de carácter básico.

Si nos remontamos a la antigüedad, es claro que la aritmética y la geometría aparecen primero para resolver problemas de contabilidad y de medidas de los campos (geometría viene de agromensura), respectivamente. Por una parte, primero se cuentan las ovejas o los hijos, luego se abstrae el concepto de número; por otra, se crean las figuras geométricas para medir los campos o como ayuda en las construcciones arquitectónicas. De los números y de las figuras geométricas se obtienen propiedades generales que se organizan en teorías y que dan lugar a la aritmética y a la geometría.

Un caso más reciente se tiene con la aparición de las geometrías no euclídeas. Es sabido que éstas surgen en el momento que se trataba de formular una geometría intrínseca de las superficies, como consecuencia de los problemas que plantea el tratamiento de los datos cartográficos sobre la superficie terrestre, cuando se empieza a disponer de estos datos referidos a amplias regiones sobre la esfera de la Tierra. El genio de Carl Friedrich Gauss (1777-1855) da los primeros pasos en esa dirección. Paralelamente, aunque posteriormente, y por motivaciones puramente intelectuales ajenas a problemas concretos, Nikolái Lobachevski (1792-1856) y János Bolyai (1802-1860) proponen, a su vez, geometrías no euclídeas.

El desarrollo de una disciplina a partir de la generalización de casos concretos es patente en el ámbito del control automático, lo mismo que en el resto de la ramas de la ingeniería. El caso paradigmático en este orden de cosas es la máquina de vapor de Watt, sobre el que no se va a insistir aquí por ser un ejemplo muy conocido.

La teoría clásica del control, la primera teoría de los sistemas lineales realimentados, se desarrolla en los Laboratorios Bell, en los años veinte y treinta del siglo recién terminado, para estudiar un caso particular de sistema realimentado: el amplificador electrónico con realimentación negativa, concebido por Harold Black (1898-1983) para compensar las pérdidas de

señal a lo largo de una línea de transmisión. Se llega así a la formulación clásica en el dominio de la frecuencia, mediante representaciones gráficas de las funciones de transferencia. Es notable que estos métodos gráficos se desarrollan al calor de la forma de hacer matemáticas aplicadas que se empleaba cuando estos métodos se proponen, en la que la forma gráfica de resolver los problemas era dominante entre los ingenieros, al no disponerse todavía de instrumentos apropiados de cálculo electrónico —esto es algo que hay que resaltar a los estudiantes de los cursos de control, ya que acostumbrados a la precisión de los resultados numéricos, gracias al ordenador, les parecen pobres los métodos gráficos, que en nuestros días también se obtienen mediante esa máquina—. Es curioso también observar que el empleo de métodos frecuenciales está íntimamente relacionado con que los ingenieros de telecomunicaciones, como el propio Black, estuviesen familiarizados con ellos por emplearlos habitualmente para sus estudios sobre la transmisión de señales. Además, la experimentación frecuencial en sistemas eléctricos es factible y relativamente sencilla. Por lo tanto, el empleo de métodos gráficos en el dominio de la frecuencia se debe a circunstancias coyunturales relativas a un caso concreto de análisis de sistemas realimentados que fue objeto de una fecunda generalización. La teoría vendría luego a organizar esos conocimientos de forma intelectualmente satisfactoria, adecuada para su enseñanza e incluso útil para la práctica. Después se realizaría su aplicación a los servomecanismos y a otros sistemas realimentados.

El procedimiento más ampliamente empleado para regular los procesos industriales es el regulador PID. Pues bien, la idea original de las acciones derivada D e integral I es puramente heurística, resultado de tanteos (Bennett (1993), Cap. 2). En distintos lugares se había comprobado que la acción tipo D mejoraba el transitorio; mientras, en otros, que la tipo I podía llegar incluso a anular el error en régimen permanente. Cuando estos métodos estaban bien establecidos en la práctica se llegó a comprender el porqué de esos efectos, e incluso se llegaron a interpretar en el dominio de la frecuencia.

También cabe mencionar aquí la solución propuesta por Norbert Wiener (1894-1964) al problema de la dirección del cañón antiaéreo, durante la Segunda Guerra Mundial. La búsqueda de la solución a este problema inspiró a Wiener un elaborado y complejo desarrollo teórico que permitió afrontar el control óptimo de sistemas estocásticos.

Otro caso interesante de generalización a partir de un caso particular es el que proporcionan los métodos de moldeo de energía (*energy shaping*) que tan fecundos están siendo para el establecimiento de una teoría para el diseño de una clase de sistemas de control no lineales, y que fueron desarrollados originalmente por Takegaki y Arimoto (Takegaki y Arimoto (1981)) para resolver el problema concreto del control de un robot manipulador.

Mención especial merece la solución aportada por Karl Åström (1934-) al problema del control de las máquinas de fabricar papel, en lo que sería una de las primeras aplicaciones registradas del control mediante computador de un proceso industrial. Cuando Åström describe cómo afrontó el problema de obtener un modelo matemático de esas máquinas afirma que lo primero que hizo fue recurrir a las leyes naturales que regulan la interacción entre los componentes del sistema, con lo que se encontró con un sistema de diecisiete ecuaciones diferenciales de primer orden que producía unos resultados poco satisfac-

torios cuando se comparaban con los que generaba el propio proceso (Wittenmark y Rantzer (1999), p. 12). Entonces se le ocurrió la idea de construir el modelo matemático directamente —en tiempo real— a partir de las medidas registradas del mismo proceso, empleando para ello herramientas suministradas por el análisis estocástico de series temporales —en último extremo, una aplicación más o menos elaborada del método de mínimos cuadrados— (Åström (1967)). Con este procedimiento obtuvo un modelo adecuado que permitió controlar las máquinas de fabricar papel y abrió con ello una vía para el control de procesos mediante computador que ha llegado hasta nuestros días.

El modelo empleado por Åström es lo que los físicos teóricos llaman, con cierto desdén, un modelo fenomenológico, del que dicen que se limita únicamente a servir de instrumento efectivo para resumir y predecir observaciones; lo que se encuentra en las antípodas de la pretensión de reflejar fielmente lo que realmente sucede más allá de los fenómenos o apariencias superficiales, que es a lo que deben aspirar los modelos propiamente científicos, según esos teóricos. El modelo de Åström se comporta como una “caja negra”, que representa únicamente las relaciones entre la entrada y la salida del sistema, sin necesidad de postular ningún mecanismo interno que justifique ese comportamiento. Sin embargo, sirve de base para el diseño de un sistema de control que funciona correctamente y proporciona un resultado satisfactorio. Se tiene así una categórica ilustración de la diferencia entre la ciencia, que aspira a desvelar el conocimiento profundo de las cosas, y la técnica que se limita a manejarlas de acuerdo con los objetivos perseguidos, diferencia a la que tantas veces se ha aludido en páginas anteriores.

Hay casos en los que se podrá argumentar en sentido contrario: que ha sido un resultado teórico obtenido con papel y lápiz, y por motivaciones puramente intelectuales —o para sustentar una carrera académica—, el que ha servido para resolver problemas prácticos concretos. Quizá uno de los casos que puedan alegarse en este sentido sea el filtro de Kalman. Aunque incluso en este caso se puede invocar que ese filtro no es más que una implementación recurrente del método de mínimos cuadrados aplicado a sistemas dinámicos (método que, a su vez, fue propuesto por Gauss para estimar la posición de una estrella a partir de las diferentes medidas astronómicas) y también que este filtro, en su formulación lineal, es el mismo que el de Wiener, aunque el de Kalman esté formulado en el espacio de estados.

Hay muchos más casos a los que se podría aludir pero la existencia de un solo contraejemplo invalida la difundida afirmación de que la técnica, y en consecuencia la ingeniería, sea meramente ciencia aplicada, siguiendo la estela de la Escuela Politécnica de París antes mencionada. Aún en el caso de que un determinado resultado científico haya podido inspirar un producto ingenieril, el tránsito desde esa idea inspiradora a la realización efectiva de un producto susceptible de explotación industrial requiere unos conocimientos y habilidades específicos que pertenecen al ámbito propio de la ingeniería. En este punto se puede citar el caso de la energía termonuclear de fusión, cuyos principios físicos básicos se conocen desde los años cincuenta del siglo que hemos dejado atrás (Lawson (1957)), pero que aún se carece de una tecnología adecuada para su explotación a gran escala con rendimiento energético positivo.

Las ideas expuestas en este artículo están desarrolladas con mayor detenimiento en (Aracil (2010)).

AGRADECIMIENTOS

Texto basado en la conferencia pronunciada en el Acto Inaugural de las XXXI Jornadas de Automática, Jaén, 8-10 septiembre 2010, organizadas por CEA. El autor agradece los comentarios de Pedro Albertos, Francisco Gordillo, Alfredo Navarro y Manuel Silva a un borrador del texto que aquí se incluye.

REFERENCIAS

- Albertos, Pedro y Iven Mareels (2010). *Feedback and Control for Everyone*. Springer.
- Aracil, Javier (2002). *Cybernetics and Systems*. Chap. Control Engineering at the Beginning of a Century, pp. 897–902. Vol. 2. Austrian Society for Cybernetic Studies.
- Aracil, Javier (2010). *Fundamentos, método e historia de la ingeniería. Una mirada al mundo de los ingenieros*. Síntesis.
- Åström, K.J. (1967). Computer control of a paper machine—an application of linear stochastic control theory. *IBM Journal of research and development* **11**(4), 389–405.
- Bennett, Stuart (1993). *A history of control engineering*. Peter Peregrinus.
- Davis, M. (1998). *Thinking like an Engineer*. Oxford University Press.
- Forman, Paul (2007). The primacy of science in modernity, of technology in postmodernity, and of ideology in the history of technology. *History and Technology* **23**(1), 1–152.
- Freeth, T. y otros (2006). Decoding the ancient greek astronomical calculator known as the antikythera mechanism. *Nature* **444**(1), 587–591.
- Galilei, Galileo (1976). *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*. Editora Nacional, Madrid.
- Koen, Billy Vaughn (2003). *Discussion of the Method*. Oxford University Press.
- Kroes, P. y A. Meijers (2000). *The empirical turn in the Philosophy of Technology*. Elsevier.
- Lawson, J.D. (1957). Some criteria for a power producing thermonuclear reactor. *Proc. Phys. Soc.* **B70**, 6–10.
- Rosenbrock, H. (1990). *Machines with a purpose*. Oxford University Press.
- Simon, H. (1996). *The Sciences of the Artificial*. The MIT Press. Versión española *Las ciencias de lo artificial*, Comares, 2006.
- Takegaki, M. y S. Arimoto (1981). A new feedback method for dynamic control of manipulators. *ASME J. Dyn. Syst. Meas. Cont.* **102**, 119–125.
- Vincenti, Walter G. (1990). *What Engineers Know and How They Know It.* The Johns Hopkins University Press.
- Wiener, N. (1961). *Cybernetics. Control and Communication in the Animal and the Machine*. The MIT Press.
- Wittenmark, B. y A. Rantzer (1999). *The Åström Symposium on control*. Studentlitteratur.