

Curso sobre
INGENIERÍA Y PENSAMIENTO

Director
Javier Aracil



Fundación
EL MONTE

Sevilla, 2006

ÍNDICE

Presentación del Curso	7
<i>Javier Aracil</i>	
Ingeniería y civilización	21
<i>Vicente Ortega</i>	
Sobre lo que pensamos que pensaban los fundadores de <i>l'École centrale de travaux publics de l' an III</i> y sus inmediatos sucesores	33
<i>Javier Ordóñez</i>	
Diseño por error	55
<i>Enrique Cerdá Olmedo</i>	
Diseño y representación en la ingeniería	65
<i>Fernando Broncano</i>	
La ingeniería, motor de conocimientos científicos	107
<i>José Luis Montañés</i>	
El papel de la técnica en el conocimiento científico	123
<i>José Ferreirós</i>	
¿Es la ingeniería meramente ciencia aplicada?	145
<i>Javier Aracil</i>	
Ingeniería y Apocalipsis	167
<i>Francisco García Olmedo</i>	

PRESENTACIÓN DEL CURSO

Javier Aracil

Escuela Superior de Ingenieros

Universidad de Sevilla

Ingeniería y pensamiento

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

Sin embargo tanto la técnica, desde la antigüedad, como la ingeniería en tiempos modernos, no han gozado de la correspondiente apreciación intelectual. La técnica no ha sido, en general, objeto de una especial atracción por los pensadores; e incluso a veces se cuestiona que sea una forma de conocimiento. Cuando se han ocupado de ella, las más de las veces, lo han hecho por sus repercusiones sociales; casi nunca lo han hecho considerándola como una forma esencial, peculiar y radical del quehacer humano (hay excepciones, luego recordaremos algunas). Así, es notorio que la técnica ha sufrido una tradicional minusvaloración a lo largo de la historia. En tiempos antiguos la labor de los artesanos, de los que trabajaban con sus manos, era considerada propia de las clases serviles mientras que los hombres libres (liberados, entre otras cosas, del trabajo manual) se dedicaban a la especulación filosófica ó política. En algunos casos puede que dedicasen algún esfuerzo a resolver problemas prácticos, pero siempre considerándolos como de rango inferior a los puramente especulativos. No olvidemos que, en tiempos casi recientes, el propio Velázquez, con toda su

asentada reputación en la Corte, dedicó denodados esfuerzos a que la labor de pintor, en cuya ejecución intervienen de forma esencial las manos, fuese considerada como un arte liberal. Si esto sucedía en lo que se refiere a las bellas artes, en el dominio de las técnicas mecánicas resultaba considerablemente acentuado. Y aun en nuestros días la ingeniería, pese a su atractivo debido a la relevancia social de sus productos, no ha sido objeto de la atención intelectual que sin duda merece por su participación en el surgimiento del mundo artificial en el que se desenvuelve nuestra vida.

En el libro del filósofo americano Daniel C. Dennett *La peligrosa idea de Darwin*¹ leemos: “la ingeniería ha tenido siempre un estatus de segunda clase en el mundo intelectual [...] Las huellas fósiles de esta actitud negativa se encuentran por doquier en nuestra cultura. Por ejemplo, en mi propia disciplina, la filosofía, la subdisciplina conocida como filosofía de las ciencias tiene una historia larga y respetable; muchos de los filósofos más eminentes e influyentes de la actualidad son filósofos de la ciencia. Hay excelentes filósofos de la física, de la biología, de las matemáticas e incluso de las ciencias sociales. Pero nunca he oído hablar de nadie en el campo de la filosofía que se dedicara a la filosofía de la ingeniería, como si no hubiera bastante materia en este campo, de interés conceptual, para que un filósofo se especializara en ella. Aunque esta actitud está cambiando, cada día más y más filósofos reconocen que la ingeniería acoge en su seno algunos de los pensamientos más profundos, más bellos y más importantes nunca desarrollados”.

La radical postura de Dennett requiere algunas matizaciones. Si, en efecto, no es frecuente encontrarse con cultivadores de la filosofía de la ingeniería sí es posible hacerlo con filósofos que incluyen la técnica entre sus principales preocupaciones, aunque sea en un número muy inferior al de filósofos de la ciencia; y no se olvide que la ingeniería es la forma suprema de hacer técnica. Por ejemplo, Fernando Savater en *El valor de elegir*² dice que “la técnica es nuestra empresa más definitoriamente humana”. Un poco más adelante se lee “la técnica [...] configura la relación polémica específicamente humana entre ‘libertad’ y ‘destino’”. Para acabar con “la técnica ofrece [...] un conjunto de prótesis libremente elegidas e inventadas para resistirse al menos parcialmente a nuestro

¹ pp. 300-301, editado por Galaxia Gutemberg, 1999.

² Editado por Ariel, 2003.

destino”. Estas prótesis forman el mundo artificial en el que hoy se desenvuelve nuestra vida y del que nosotros mismos somos componentes significados.

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

Lo natural y lo artificial

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

Nosotros mismos somos seres artificiales. Sobrevivimos a muchas enfermedades (ante las que lo “natural” sería que sucumbiésemos si su gravedad lo determinase) y alcanzamos una edad, en promedio, impensable para nuestros antepasados. Nuestra propia calidad de vida depende en gran medida de los fármacos que alivian nuestras dolencias. Nuestra alimentación está basada en productos mayoritariamente artificiales. Tanto los cereales, que forman la base de nuestra alimentación, como los animales que nos aportan proteínas (con la posible excepción de algunos productos del mar que forman una fracción muy pequeña de nuestra alimentación) son el resultado de una selección artificial llevada a cabo por los seres humanos³. Mediante esta selección han sobrevivido aquellos individuos más productivos para nuestra especie y no aquellos mejor adaptados para perpetuarse en la naturaleza, como había sucedido a lo largo de toda la evolución biológica.

La distinción entre lo natural y lo artificial es cuestión largamente debatida. Resultan relevantes, al respecto, las matizaciones introducidas por John Stuart

³ Todo ello sin olvidar los múltiples procesos artificiales que nos permiten conservar y distribuir los alimentos.

Mill (1806-1873) en la primera parte de su obra póstuma sobre *La Naturaleza*⁴. Distingue Mill dos usos corrientes de este término. El primero es el que empleamos cuando nos referimos a la naturaleza de tal o cual cosa. En tal caso nos referimos a la esencia y propiedades características de esa cosa; a su capacidad de producir determinados fenómenos. Por el contrario, hay otro uso según el cual la naturaleza es aquello que no ha sido objeto de modificación o intervención por el hombre. En este sentido técnica y arte se oponen a naturaleza; lo mismo que artificial a natural. Lo artificial no es sino la realidad creada intencionadamente por el hombre mediante su capacidad para planificar y transformar, ejercitando su inherente libertad y su razón productora.

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

Ciencia e ingeniería en Arquímedes

Una muestra primigenia de lo que luego será la contumaz preterición de la técnica con relación al pensamiento especulativo la tenemos en la figura de Arquímedes (h. 287 a.C., 212 a.C.) o al menos en la que nos transmite la historia corrientemente aceptada. De acuerdo con ella Arquímedes, en cuya obra se

⁴ Alianza Editorial, 1998.

combinan realizaciones de ingeniería con aportaciones a la matemática e incluso a la física, preferiría claramente estas últimas con respecto a las primeras, a las que consideraría como actividades que, por su carácter aplicado, tenían un rango utilitario y, por tanto, inferior a lo inmaculado de las matemáticas especulativas, con toda la pureza de lo incontaminado por el ejercicio de una actividad mecánica. Esta división que asigna al hombre libre las artes liberales de la especulación matemática y filosófica, mientras que las artes mecánicas son propias de las clases serviles, es una muestra de una actitud que, con altibajos, persiste a lo largo de la historia y cuyos últimos rescoldos no es difícil encontrar aún en nuestros días.

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

Como sucede con gran parte de las figuras clásicas del mundo griego, las noticias que tenemos de Arquímedes son, o bien a través de versiones y traducciones, con añadidos, de sus obras o bien por referencias, muy de segunda mano (la fuente biográfica principal es la obra de Plutarco (46-120), escrita trescientos años después de fallecido aquél) por lo que su figura aparece revestida de interpretaciones y conjeturas. Por eso cabe preguntarse si compartía

el desdén por la técnica, por los artilugios mecánicos, como pretende la versión corrientemente aceptada o si por el contrario era un mecánico, un ingeniero, que generalizaba y al hacerlo se veía abocado a hacer ciencia. En todo caso, la sobrevaloración de lo especulativo y teórico sobre lo manual y práctico estaba llamada a sobrevolar la historia de la civilización.

Aristóteles y la técnica

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

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

⁵ Aristóteles, *Ética a Nicómaco*, traducción M. Araujo y J. Marías, Universitat de València.

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

Los orígenes de los ingenieros

La historia de la ingeniería resulta un tanto insólita, especialmente si se la compara con otras profesiones semejantes, como la medicina. Aunque la técnica marca los albores de la humanidad, sin embargo la profesión de ingeniero es relativamente reciente. Incluso en la más remota antigüedad encontramos formas de ingeniería muy laboradas que requieren el concurso del esfuerzo coordinado de un número considerable de participantes que llevan a cabo un proyecto complejo que había sido concebido previamente por alguien dotado para ello. Una muestra de ello la tenemos, por ejemplo, en los dólmenes. Posteriormente, ya en período histórico, los restos arquitectónicos del mundo babilónico y egipcio ponen de manifiesto la existencia de formas de ingeniería considerablemente elaboradas. En el mundo griego la figura del ingeniero carece de autonomía (ya hemos recordado el caso de Arquímedes) y en el romano, aunque florecen valiosas obras públicas, no aparece desligado de la de arquitecto. Hemos de remontarnos a finales de la Edad Media, o más concretamente al Renacimiento, para encontrar figuras de ingenieros, ya con esa denominación, y con rasgos precursores de los que muestran los actuales.

Una figura característica del ingeniero renacentista es la de Leonardo da Vinci (1452-1519), más conocido por sus creaciones artísticas, pero que puso al servicio de las principales familias italianas de la época (los Medici, los Sforza, y los Borgia) su inagotable ingenio para la concepción de máquinas y artificios con los más diversos fines, sin excluir los militares. Es notable que la imaginación creativa de Leonardo no encontrase un sustrato de lo que hoy

conocemos como conocimiento científico de los fenómenos naturales que le permitiese canalizar sus inventos de forma efectiva. Es un ejemplo histórico de, por una parte, la autonomía creativa del ingeniero pero, por otra, de la dependencia de sus concepciones de las leyes que regulan el comportamiento de los elementos componentes de sus proyectos, que establece cauces y límites ineludibles a esa capacidad creativa.

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

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

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

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

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

Los ingenieros y la Ilustración

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

Para llevar a cabo el programa ilustrado se requerían, entre otras cosas, funcionarios especialmente preparados para la magnitud del empeño. Entre ellos

juegan un papel particularmente relevante los ingenieros. Para su formación, se crean en toda la Europa continental centros específicos: las escuelas de ingenieros. Como ya sucediera en el reinado de Felipe II, la universidad permanece ajena a estas necesidades sociales y es la iniciativa de los poderes públicos, en este caso ilustrados, la que tiene que suplirla. En la creación de escuelas de ingenieros cobra un especial protagonismo el modelo francés.

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

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

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

Como ya hemos indicado, los primeros ingenieros fueron militares. Por ejemplo, en Sevilla, una de sus realizaciones emblemáticas es la Fábrica de

Tabacos cuya arquitectura clasicista choca frontalmente con el barroquismo de los arquitectos coetáneos, aunque estos también participaron en el proyecto. Aunque no sean propiamente ingenieros, en sentido estricto, en esta época cabe destacar también las figuras de los marinos Jorge Juan y Santacilla (1713-1773) y Antonio de Ulloa (1716-1795), parte de cuya obra se desarrolló en San Fernando (Cádiz). Los dos participaron en la expedición a Perú para la medida de meridiano. En su obra se encuentran profundamente entrelazados tanto lo propiamente científico como lo técnico. El primero es autor de *Examen marítimo*⁶, un libro clásico de ingeniería naval, que fue traducido al inglés, francés e italiano.

La transición de la ingeniería militar a la civil se produce durante el último cuarto de siglo, y en ella destaca la figura del tinerfeño Agustín de Betancourt (1758-1824) que dirigió a un grupo de becarios españoles que se formaron en París, en la mencionada *École des ponts et chaussées*, enviados por el Conde de Floridablanca (1728-1808), primer secretario de Estado, para estudiar en esa Escuela con el fin de crear luego en España otra a imagen y semejanza de aquella. Trabajó en casi todos los dominios de la ingeniería. Visitó Londres y Birmingham en 1788 para estudiar la máquina de Watt de doble efecto, cuyo fundamento y operación fue capaz de descifrar al verla funcionar y difundió posteriormente por Europa, desvelando el secreto tan celosamente guardado por Watt y Boulton. Proyectó el telégrafo óptico Madrid-Cádiz. Dirigió en Aranjuez, ante la Corte el vuelo de un globo (se conserva en el Museo del Prado un cuadro de Antonio Carnicero reproduciendo la efemérides). Creó y dirigió el Real Gabinete de Máquinas, con planos y maquetas de todos los procesos y máquinas que había reunido con su equipo en sus viajes por Europa. Es el primer centro moderno de difusión de la ingeniería que se crea en España. Se exilió a Rusia cuando consideró que el ideario de la Revolución francesa estaba llamado a la derrota y allí se convirtió en un alto funcionario del zar reformador e ilustrado Alejandro I.

Otra figura notable es la del malagueño Juan López de Peñalver, perteneciente al grupo que se formó con Betancourt en París. Redactó, entre otras muchas cosas, el catálogo del Real Gabinete de Máquinas en el que se reunió todo el material coleccionado por el grupo de Betancourt en su estancia

⁶ Existe una edición facsímil realizada por el Colegio de Ingenieros Navales en 1992.

en París y con el que se propició la introducción de esos métodos en España. Es autor también de un estudio sobre la evolución del precio del trigo que se considera precursor de la moderna economía matemática. Pero, sobre todo, es una figura señera de la génesis de la industrialización española, al menos por lo que se refiere a su impulso y promoción desde la administración pública.

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

Las Escuelas de ingenieros en España

En 1802 se fundó la primera Escuela de Caminos, con sede en el Palacio del Buen Retiro y que funcionó hasta mayo de 1808. La Guerra de la Independencia (la primera guerra civil española del XIX) frustra el proyecto. Algunos de sus profesores se exilian y en particular Betancourt emigra a Rusia, como se ha dicho anteriormente. Después de algunas vicisitudes la Escuela se recrea definitivamente en 1835 y pervive hasta la actualidad. Años antes, en

1777, Carlos III encomendó a Enrique Cristóbal Storr, director de las Minas de Almaden, la organización de las enseñanzas de minería, en las que cabe ver los orígenes de los actuales ingenieros de minas. En 1835 la Escuela adquiere un perfil plenamente moderno y se traslada a Madrid.

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

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

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

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

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

Es curioso reseñar que cuando se crea la Real Academia de Ciencias en Madrid, en 1847, la minoría mayoritaria está formada por ingenieros, y si se suman ingenieros y militares son mayoría absoluta. Las facultades de ciencias no se crean en España hasta la ley Moyano en 1857, como una secesión de las facultades de filosofía. A su creación no es ajena la necesidad de formación científica básica de los ingenieros. El color de su traje académico, azul turquí, recuerda este origen (las facultades de Filosofía y Letras lo tienen azul celeste)⁷.

En las páginas que siguen se recogen las aportaciones de los profesores que impartieron el curso “Ingeniería y pensamiento” que tuvo lugar en la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, del 19 al 22 de octubre de 2004.

⁷ Véase Manuel Silva, “Uniformes y emblemas de la Ingeniería Civil Española”, Institución “Fernando el Católico”, Zaragoza, 1999.

INGENIERIA Y CIVILIZACIÓN

Vicente Ortega

Universidad Politécnica de Madrid

Introducción : Recuerdos, lecturas y preguntas

Hace años yo era un joven graduado en ingeniería que iniciaba sus pasos como profesor en la Escuela de Ingenieros de Telecomunicación de Madrid en las áreas de Electromagnetismo y Microondas. Ávido por ampliar estudios, hacer curriculum y conocer otros mundos, di con mi ilusión y con una beca del Ministerio de Educación y Ciencia en la Universidad de Stanford, California. Me gradué como “Master of Electrical Engineering” y, naturalmente, casi el ciento por cien de los créditos que cursé giraban en torno a las materias propias de las áreas mencionadas. Y digo casi, pues el profesor-tutor que autorizaba mi matriculación me recomendó que tomara algunos créditos de materias no técnicas. Y así lo hice, matriculándome en un curso breve de un programa de los considerados “minor” que se llamaba VTSS (Values, Technology, Science and Society).

La experiencia en la Universidad de Stanford me sirvió, lógicamente, para aumentar mis conocimientos en mis áreas de especialidad, pero me fue, también, muy útil en otros dos aspectos: por un lado, conocí un sistema educativo bastante diferente del español que me sería muy útil para mi posterior dedicación a tareas de gestión y política universitarias; por otro lado despertó mi curiosidad y mi interés por el tipo de enseñanzas que vinculan la ingeniería con la sociedad y por introducirlas en los programas de ingeniería que se cursaban en España.

De vuelta a Madrid cayó en mis manos el libro *Meditación de la técnica* de D. José Ortega y Gasset y, aparte de los acertados conceptos sobre la técnica, me impresionó aquella frase que dice: “Mi libro, ‘la rebelión de las masas’, va inspirado, entre otras cosas, por la espantosa sospecha que sinceramente sentía entonces –allá por 1927 y 1928, nótenlo ustedes, las fechas de la prosperidad– de que la magnífica, la fabulosa técnica actual corría peligro y muy bien podía

ocurrir que se nos escurriese de entre los dedos y desapareciese en mucho menos tiempo de cuanto se puede imaginar. Hoy, cinco años después, mi sospecha no ha hecho sino acrecentarse precisamente. Veán, pues, los ingenieros como, para ser ingeniero, no basta con ser ingeniero. Mientras se están ocupando de su faena particular, la historia les quita el suelo de debajo de los pies. Es preciso estar alerta y salir del propio oficio: otear bien el paisaje de la vida, que es siempre total. La facultad suprema para vivir no la da ningún oficio ni ninguna ciencia; es la sinopsis de todos los oficios y todas las ciencias, y muchas cosas además”.

Otra de las lecturas que contribuyó de forma notable a reforzar mi interés por los temas de ingeniería y sociedad fue la del libro *Técnica y civilización* de Lewis Mumford. Este libro, clásico entre la literatura especializada, plantea de forma magistral y completa las complejas relaciones existentes entre la cultura, la técnica y la sociedad, mostrando hasta que punto “antes de que pudieran afirmarse en gran escala los nuevos procedimientos industriales era necesaria una nueva orientación de los deseos, las costumbres, las ideas y las metas”, poniendo así el contrapunto al discurso en boga en los años ochenta según el cual era la tecnología la que cambiaba la sociedad. Era, pues, preciso poner en guardia a los futuros ingenieros, no fuera que, enfrascados en sus máquinas, no prestaran atención a la cultura predominante en su tiempo y en su sociedad y se les fuera el desarrollo tecnológico de las manos.

Posteriormente, encontré el libro del ingeniero civil norteamericano Samuel L. Florman titulado *The civilized engineer*, cuyo contenido es fácil de adivinar. En este libro, su autor escribe: “A medida que la ingeniería se vuelve más importante en la conformación de la sociedad, es cada vez más necesario que los ingenieros practiquemos la introspección. Mas que confiar simplemente en nuestros éxitos técnicos, debemos intensificar nuestros esfuerzos para explorar, definir y mejorar los fundamentos filosóficos de nuestra profesión”.

¿De dónde viene nuestra profesión? ¿Cuáles son sus orígenes y su evolución? ¿Cuáles son las tradiciones subyacentes y las finalidades de la ingeniería? ¿Cómo se relaciona la ingeniería con el resto de la sociedad? ¿Hacia dónde camina la ingeniería en nuestros días? ¿Cómo debe plantearse la formación del ingeniero? Estas y otras preguntas del mismo tipo no son exclusivas de la ingeniería y, algunas de ellas, formuladas de otro modo son, en definitiva, “las preguntas de la vida”. Y miren por donde, ese es el título del libro, de reciente aparición, del filósofo y profesor Fernando Savater que

introduce en uno de los capítulos del libro comentarios sobre la técnica muy parecidos a los del libro antes citado de Samuel L. Florman.

Todos estos recuerdos, lecturas y reflexiones creo que justifican la introducción en los currícula de los estudiantes de ingeniería de algún breve curso sobre “Ingeniería y Civilización”. Pero ahora, no se trata de desarrollar un curso sino de dictar una conferencia, y es por ello que he optado por ir dando saltos en el tiempo, exponiendo y comentando algunos textos y hechos significativos de diversas civilizaciones que tienen que ver con el mundo de la técnica y, por lo tanto, con la ingeniería.

El libro de los libros y la dominación de la naturaleza

“Dios creó al hombre a su imagen, a imagen de Dios los creó, macho y hembra los creó. Y Dios los bendijo diciendo: Sed prolíficos y multiplicaos, poblad la tierra y sometedla; dominad sobre los peces del mar, sobre las aves del cielo y sobre cuantos animales se mueven sobre la tierra”.

Así reza el versículo 26 del capítulo primero del Génesis, libro primero de la Biblia. Sin duda, es pretencioso recurrir al acto de creación del hombre para encontrar las raíces de la ingeniería. Todas las profesiones del hombre podrán verse igualmente reflejadas en la creación, pero, ¿por qué no la ingeniería? Según la interpretación de Ortega y Gasset en su libro ya mencionado, la técnica es la reforma de la naturaleza para lograr el bienestar del hombre. La tierra, lugar donde vive el hombre, ofrece a éste facilidades y dificultades. Existe el Sol, fuente de energía por excelencia; existe la Tierra, con sus recursos minerales y vegetales; existe el agua, imprescindible para la vida humana; existe el aire, sin el cual no habría vida vegetal ni animal; y existen otros muchos elementos que permiten la vida, el estar. Pero estos recursos no están repartidos por igual en todo el planeta, ni su aprovechamiento, allí donde existen, resulta siempre fácil. Un océano es una fuente de recursos enorme, pero si no se dispone de medios para la navegación y la pesca no sirve para nada. Si todo fueran facilidades viviríamos en el paraíso y no necesitaríamos de la técnica para ser felices. Pero, desgraciadamente, después de crearnos, Dios nos expulsó del mismo. Sin la técnica, el hombre habría quedado reducido a una especie animal que solo sobrevive si se adapta a su entorno. Pero, el hombre posee una capacidad para pensar –homo sapiens– y una capacidad para hacer –homo faber– que le lleva no

solo a querer estar sino a desear bienestar y por ello modifica el entorno para adaptarlo a sus necesidades y sus deseos.

La reforma de la naturaleza, su dominio, están implícita en el Génesis y de ahí que, siendo algo pretencioso, me haya parecido oportuno comenzar esta excursión por los libros con el primero de ellos y el más editado.

En la Grecia clásica: aprecio y desprecio del ingeniero

Cuenta Plutarco en su libro *Vidas paralelas* que hacia el año 600 a.C. Solón, arconte de Atenas y uno de los siete sabios de Grecia, acometió algunas reformas económicas y legales y que “otorgaba honores a los artesanos por su contribución a la prosperidad de la sociedad”. Continúa Plutarco diciendo que “en aquel tiempo, el trabajo no era una desgracia ni la posesión de un negocio implicaba inferioridad social”.

Un siglo más tarde, hacia el 500 a.C., el gran trágico griego Sófocles, incluye en su obra *Antígona* la siguiente reflexión coral: “Muchas cosas existen y, con todo, nada más asombroso que el hombre. El se dirige al otro lado del espumoso mar con la ayuda del tempestuoso viento sur, bajo las rugientes olas avanzando y, a la más poderosa de las diosas, a la imperecedera Tierra, trabaja sin descanso, haciendo girar los arados año tras año, al ararla con mulos. El hombre, que es hábil, da caza, envolviéndolos con los lazos de sus redes, a la especie de los aturcidos pájaros, y a los rebaños de agrestes fieras y a la familia de los seres marinos. Por sus mañas se apodera del animal del campo que va a través de los montes y unce el yugo que rodea la cerviz al caballo de espesas crines, así como al incansable toro montaraz. Se enseñó a sí mismo el lenguaje y el alado pensamiento, así como las civilizadas maneras de comportarse, y también, fecundo en recursos, aprendió a esquivar bajo el cielo los dardos de los desapacibles hielos y los de las lluvias inclementes. Nada de lo porvenir le encuentra falto de recursos. Solo de la muerte no tiene escapatoria. De enfermedades que no tenían remedio ya ha discurrido posibles evasiones. Poseyendo una habilidad superior a la que se puede uno imaginar, la destreza para ingeniar recursos la encamina unas veces al bien y otras al mal”.

En esta extensa cita tomada del libro de Fernando Savater, entre las potencias del hombre que tanto asombro causan al coro sofocliteo, se descubren claramente aquellas que proceden de la habilidad, de la destreza y del

pensamiento, que le llevan a dominar las fuerzas y recursos de la naturaleza poniéndolas al servicio de la sociedad, como en el mandato del Génesis.

Sin embargo, en el tiempo de Platón, hacia el año 350 a.C., el asombro que se sentía por la técnica y los honores que se concedían a los artesanos cambiaron radicalmente. En un capítulo del *Gorgias*, discutiendo sobre la belleza, la justicia y el valor de la retórica, Platón pone en boca de Sócrates un juicio comparativo de un arquitecto militar con un abogado y dice: “No lo compares, pues, (el arquitecto militar) con el abogado. Si, no obstante, quisiera hablar como tú, Calicles, y ponderar su arte, te agobiaría a fuerza de razones, probándote que debes hacerte arquitecto militar y exhortándote a creer que las demás artes nada significan al lado de la suya, y estate seguro que las palabras no me faltarían. Y tú no dejarías por esto de menospreciar su arte y a él, le dirías como una injuria que no es más que un mecánico y que no querrías a su hija por nuera ni a su hijo por yerno”.

Los oficios técnicos eran considerados como algo impropio de hombres libres y como muestra de ello Jenofonte escribe: “Lo que llamamos artes mecánicas llevan un estigma social y son justamente deshonoradas en nuestras ciudades. Pues estas artes dañan el cuerpo de aquellos que las practican, conduciéndoles a una vida sedentaria y cerrada, y en algunos casos están todo el día con el fuego. Esta degeneración física produce también una degeneración del espíritu. Además, los artesanos no tienen tiempo para dedicarlo al cultivo de la amistad y de la ciudadanía. Por lo tanto, son mirados como malos ciudadanos y malos patriotas y en algunas ciudades, especialmente en tiempo de guerra, no es legal practicar trabajos mecánicos”.

La civilización griega ha tenido una influencia notable en la Europa mediterránea. ¿Hasta qué punto ha condicionado el desarrollo de la tecnología esta influencia griega? Dejemos la pregunta para curiosos y pasemos a otra época, a otra civilización.

Ora et Labora: monasterios y molinos

Señala L. Munford en la obra citada: “Las técnicas del mundo antiguo pasaron de Constantinopla y Bagdad a Sicilia y a Córdoba. Fue, sin embargo, en los monasterios de occidente en donde el deseo de orden y de poder se manifestó por primera vez después de la larga incertidumbre y sangrienta compasión que

acompañó al derrumbamiento del imperio romano. Se puede considerar a los benedictinos, la gran orden trabajadora, como quizás los fundadores originales del capitalismo moderno: su regla, indudablemente, le arrancó la maldición al trabajo y sus enérgicas empresas de ingeniería quizás le haya robado a la guerra algo de hechizo. Así pues, no estamos exagerando los hechos cuando sugerimos que los monasterios –en un momento determinado hubo 40.000 hombres bajo la regla benedictina– ayudaron a dar a la empresa humana el latido y el ritmo regulares de la máquina”.

La rutina impuesta por las horas canónicas, antes de que existiera el reloj mecánico, y la organización del trabajo en torno al molino hacían del monasterio el prelude de la factoría o fábrica del siglo XVIII, cuando la máquina de vapor sustituyó a la rueda hidráulica.

La importancia del monasterio y del molino queda reflejada de una forma bella en una descripción realizada en el gran monasterio de Claraval, en Francia, hacia el siglo VI D.C. Reza así: “Pero la parte del río que entra en la abadía, tanto como lo permite el muro choca primero con fuerza contra el molino, donde se agita tumultuosa ocupada, tanto de moler el grano bajo la presión de la muela, como en mover el fino tamiz que separa la harina del salvado. Inmediatamente después, el río se encuentra ya en la siguiente casa, llena la marmita y se rinde al fuego con el fin de preparar una bebida para los monjes. Justo al lado del molino de grano lo reclaman los batanes. Puesto que moliendo ya ha dispuesto la comida para los hermanos ahora le piden que piense en sus vestidos. Tampoco replica y no rechaza hacer lo que se le pide. Levanta y hunde alternadamente los pesados pisonos y martillos y les ahorra mucho esfuerzo. ¡Dios misericordioso! ¡Qué consuelo concedes a tus humildes siervos para que no les oprima la excesiva desolación! ¡Cuánto sufrimiento alivias a tus hijos y cuanto los liberas del exceso de trabajo! ¡Cuántos caballos agotan sus fuerzas, cuántos hombres fatigan sus brazos mientras que este río amigo, al que debemos la ropa y el alimento, nos realiza estas tareas sin nuestra intervención! Sustituye nuestras fatigas por las suyas y después de su pesada carga al día solo espera una única recompensa: el permiso para poder seguir corriendo libre después de haber cumplido todo lo exigido. Mientras hace girar cada vez más aprisa las muchas y veloces ruedas, se derrama espumoso. Casi podría decirse que el mismo se muele, se ablanda. Después, sin embargo, penetra en la tenería, donde emplea tanto esfuerzo y dedicación como antes en la confección de los zapatos de los

hermanos, a continuación se reparte en muchos brazos pequeños y se apresura servicial a realizar las numerosas tareas diferentes, busca por todos sitios a los que necesitan sus servicios, ya sea tamizar, colar, girar o triturar, o bien, regar, lavar o moler, siempre brida su ayuda y nunca la rehusa. Por último, para ganarse el total agradecimiento, se lleva la basura y lo deja todo limpio a su paso”.

Humanismo y guerra: el ingeniero militar y el civil

Mientras que las aguas de los ríos movían los molinos y el razonamiento iba desplazando a los mitos y a las creencias, la pólvora, el cañón y los mosquetes revolucionan las artes militares y tienen una gran influencia en el nacimiento de la ingeniería militar, precursora de la civil. Por un lado, obliga a un nuevo tipo de construcciones y fortalezas; por otro, a la fabricación de artefactos cada vez más precisos que requieren cálculos detallados. Artefactos que requieren el uso de metales en lugar de madera y que requieren a su vez la explotación sistemática de las minas y el desarrollo de técnicas de fundición. Metales y fundición que se utilizan, no solo para fabricar armas sino, también, para fabricar planchas y tipos móviles para el que sería el gran invento del Renacimiento: la imprenta. La guerra, el arte militar, la defensa, etc., de cualquier forma que se denomine, forma parte de nuestra civilización y el desarrollo de la técnica y de la ingeniería han estado siempre vinculados a la guerra. Y entre los arquetipos del Renacimiento, vinculados a la ingeniería, una figura sobresale con carácter propio: Leonardo da Vinci.

Nada de lo que pueda considerarse típico de un ingeniero escapa de la actividad de Leonardo: fortalezas, carros armados, estudios sobre el movimiento, proyectos de máquinas voladoras, publicación de escritos y libros, etc. Nada le era ajeno, ni las artes plásticas, ni la literatura. Ni siquiera la contradicción propia de un hombre que calificó a la guerra como locura bestial y que dejó escritos en defensa de la vida humana y, sin embargo, construyó tantos artefactos bélicos. L. Munford sintetiza esta situación cuando escribe: “Incluso el mayor problema de la vida de Leonardo, la persistente lucha entre el ingeniero y el artista, simbolizó la mayor parte de las contradicciones inherentes a la nueva civilización, a medida que se desarrollo hacia la explotación faústica del ego particular y de su satisfacción mediante el poder financiero, militar e industrial”.

Cité de pasada la imprenta de tipos móviles como el gran invento del Renacimiento. Imprenta y papel hacen posible la fabricación en serie del libro impreso, formidable instrumento para que la ciencia, la técnica, la filosofía, la literatura, etc., en fin, la “información almacenada” salga de los monasterios y se difunda por otras capas sociales.

En 1456 se imprimió el primer libro: *La Biblia de las cuarenta y dos líneas* al que siguió en 1472 el primer libro impreso de ingeniería: *Elencus et index rerum militarium* de Roberto Valturio, al que seguirían una pléyade de libros técnicos como *De re militari* (1476), *De re aedificatoria* (1478) y *De re metallica* de George Agrícola, considerado como el primer tratado de ingeniería minera.

Así pues, en un hecho decisivo para la civilización, como fue la publicación de los primeros libros impresos, la literatura técnica, los primitivos libros de ingeniería, estuvieron presentes en lugar destacado.

Poco a poco, la técnica científica va invadiendo áreas distintas de la militar, como acabamos de citar en el caso de la minería. Recordando nuestro viejo y maravilloso molino medieval, en pleno siglo XVII, G.A.Böckler, autodenominado arquitecto e ingeniero, escribe en el libro *Tratado de las artes mecánicas de la industria del agua y los molinos* (1661) lo siguiente: “Entre los inventos más extraordinarios y útiles regalados por Dios todopoderoso al género humano, el noble arte de la mecánica no es el más pequeño. Para este arte son necesarios una aguda reflexión, el arte, el esfuerzo y la habilidad de los ingenieros, así llamados por su ingenioso entendimiento”. Böckler deriva, pues, la palabra ingeniero de la facultad mental del ingenio. Sin embargo, esta última palabra se usó mucho aplicada a artefactos bélicos. “Ingenieur” en frances, “ingeniere” en italiano, e “ingeniero” en castellano tienen la raíz “ingenium”, pero “engineer” en ingles la tiene de “engine” que es motor o máquina. ¿Será ingeniero el que tiene ingenio o el que hace ingenios? No estoy capacitado para esta discusión etimológica pero si para señalar la valoración tan diferente que hace Böckler de la importancia de las artes mecánicas de la que hacían Platón o Jenofonte.

Ciencia experimental e ingeniería moderna

En el Renacimiento se hace común un nuevo modo de pensar, un nuevo modo de sentir la naturaleza. Esta existía para ser explorada, conquistada, imitada y, finalmente, entendida. A caballo entre los siglos XVI y XVII se

desarrolla la nueva ciencia o ciencia experimental que tanta importancia tendría para el posterior desarrollo de la tecnología.

Un filósofo heterodoxo, Francis Bacon (1561-1626), marca una ruptura entre los sistemas filosóficos y científicos precedentes haciendo una crítica fuerte y ácida de la filosofía griega. En su obra *Novum Organum* proclama: “El hombre, servidor e interprete de la naturaleza, ni obra ni entiende más que en proporción de sus descubrimientos experimentales y racionales sobre las leyes de esta naturaleza; fuera de ahí, nada sabe ni nada puede”. Máxima, sin duda, exagerada, que proclama la primacía del experimento frente al argumento. Como botón de muestra de su desprecio por la filosofía griega bastan frases como estas: “La filosofía, corrompida por la superstición e invadida por la teología es el peor de los azotes y el más temible para los sistemas en conjunto o para sus diversas partes. La filosofía sofística es batalladora, aprisiona al espíritu en sus lazos; pero esa otra filosofía, hinchada de imaginación y que se asemeja a la poesía engaña mucho más al espíritu. Se encuentran en Grecia ejemplos palpables de ese género de filosofía, particularmente en Pitágoras, en el que la superstición es de las más grandes y groseras; en Platón y su escuela, en la que es a la vez más manifiesta y peligrosa”.

Francis Bacon, en su utopía *Nueva Atlántida* describe “La casa de Salomón”, una sociedad donde se enseñará y se investigará sobre artefactos, máquinas, agricultura, técnica y ciencia experimental. Pocos años después de la muerte de Bacon la Casa de Salomón se convertiría en la “Royal Society of London for Improving Natuatural Knowledge”(1662) en la que tenían prohibida su entrada los filósofos como Platón y Aristóteles.

Francis Bacon ha sido considerado por algunos pensadores como el profeta de la Revolución Industrial y filósofo de la tecnología.

Revolución Industrial e Ilustración

En la Historia que me enseñaron en el bachillerato, el siglo XVIII era el siglo de la Ilustración y de la Revolución Francesa, hechos que van unidos a etapas importantes de la civilización. Poca o ninguna importancia se la daba a otra revolución: la Industrial. Sin embargo, no es casual que ocurrieran durante épocas coincidentes pues ambos fenómenos, Ilustración y Revolución Industrial, son consecuencia de esa nueva forma de pensar, de esa nueva forma de hacer que

se inició en el Renacimiento y que culmina en los siglos XVIII y XIX. Uno de los libros más importantes de la época es *L'Encyclopédie ou Dictionnaire Raisonné des Sciences, des arts et des Métiers*, publicada entre 1751 y 1772 por D. Diderot y J.L.R. d'Alambert. Es considerada como la primera enciclopedia moderna y en ella, junto con capítulos dedicados a la filosofía, a la música, a la literatura, y a la religión, juega un papel muy importante los dedicados a las ciencias aplicadas y a los oficios, es decir, a la ingeniería. El título es significativo a este respecto aunque La Enciclopedia haya pasado a la historia fundamentalmente como instrumento de lucha ideológica.

Y no es casual tampoco que durante el último tercio de este siglo se fundaran las primeras “Escuelas de Ingeniería”, entre ellas la de Minas de Madrid en el año 1777.

Del entronque e influencia de la ingeniería y la civilización en esta época pueden servir como ejemplo las citas de dos libros de ilustres filósofos. La primera es de F. Engels, quien en 1845 en *La situación de la clase laboral en Inglaterra* escribe: “La historia de la clase obrera en Inglaterra comienza en la segunda mitad del siglo pasado con la invención de la máquina de vapor y de las máquinas destinadas a trabajar el algodón. Sabemos que estos inventos desencadenaron una revolución industrial que simultáneamente transformó la sociedad burguesa en su conjunto y de la que solamente ahora comienza a entender la importancia que tiene para la historia del mundo... Es por ello que Inglaterra es la tierra elegida en donde se desarrolla el proletariado”. En este texto, Engels compara y relaciona dos manifestaciones de la Revolución Industrial: la máquina de vapor y el desarrollo del proletariado industrial.

De la importancia de quienes diseñaban y construían las máquinas de vapor habla también Augusto Comte, filósofo positivista, considerado como el fundador de la moderna Sociología, cuando escribe en 1825 en su *cuarto Ensayo*: “Es fácil reconocer en el cuerpo científico un cierto número de ingenieros distintos de los hombres de ciencia propiamente dichos. Esta importante clase nació necesariamente cuando la teoría y la práctica, que salieron de puntos distantes, se acercaron lo suficiente para darse la mano. Esto es lo que hace que su estatus propio esté aún poco definido... El establecimiento de la clase de ingenieros es de la mayor importancia porque esta clase constituirá, sin duda, el instrumento de coalición directo y necesario entre los hombres de ciencia y los industriales por medio de los cuales puede empezar el nuevo orden social”.

Sociedad de la información y sabiduría

Comte profetizaba un nuevo orden social en el cual la ingeniería tendría un papel relevante. Demos otro salto en el tiempo y coloquémonos en nuestros días. En el año 1978 James Martin publicó un libro: *La Sociedad interconectada*, en el que, con veinte años de anticipación y una exactitud sorprendente, predijo la tan mencionada “Sociedad de la Información”. Poco después, en 1982, el Club de Roma publicó uno de sus informes titulado “Microelectrónica y sociedad: para bien o para mal” de G. Friedrich y A. Schaff. Uno de sus párrafos reza así: “El informe se ocupa de un fenómeno de reciente aparición que ya está ejerciendo una profunda influencia en nuestras vidas y que las afectará aún más en el futuro próximo. Nos referimos a las nuevas tecnologías basadas en la microelectrónica, que mediante la miniaturización, automatización, computerización y robotización, transformará de manera radical nuestras vidas, incidiendo en casi todas sus facetas: trabajo, hogar, política, ciencia y paz”. Una referencia más sobre la influencia de la tecnología en la sociedad y por lo tanto en la civilización.

Las innovaciones tecnológicas son, en sí mismas, poderosos medios para mejorar el bienestar del hombre, para hacerlo más libre, más feliz. Ocurre, sin embargo, como señalaba Max Weber, que los medios pueden convertirse en fines subvirtiendo el necesario orden de prioridades de la acción humana, llevándonos al determinismo tecnológico que, basado en la realidad cierta de la conveniencia e inevitabilidad del desarrollo técnico, limita los fines, los confunde con los medios e ignora las consecuencias. Buscando rótulos con los que denominar al siglo XX, un ingeniero y empresario notable, Simón Ramo, en su libro *What is wrong with our technological society and how to fix it* ha propuesto llamarlo el siglo de la desadaptación, puesto que el enorme crecimiento de la tecnología no ha ido acompañado por un progreso social parecido. ¿Será, quizás, que los ingenieros no nos ocupamos más que de nuestra tarea particular y no oteamos bien el paisaje de la vida? ¿Será, quizás, que los ingenieros no aprecian la importancia de la tecnología y lo hacen solamente de su uso oportunista?

Volviendo a la “Sociedad de la información” permítanme acabar la conferencia con una cita de un filósofo y otra de un poeta, profesiones que, afortunadamente, no se han puesto la denominación de científicas y que, sin

embargo entrañan altas cotas de sabiduría y belleza. El filósofo vuelve a ser Fernando Savater que escribe en el diario *El País*: “La suposición de que lo racional es estar bien informado es uno de los problemas de nuestra época, en la que se considera que tener acceso a mucha información va a desarrollar la razón. La información es útil precisamente para quien tiene una razón desarrollada. No es lo mismo información que conocimiento. El conocimiento es reflexión sobre la información, capacidad de discernimiento y discriminación respecto a la información que se tiene, capacidad de jerarquizar, de ordenar, de maximizar la información. Todo es información menos el conocimiento que nos permite aprovecharla”.

Y el poeta es T.S. Elliot, quien en su poema “Two choresus from the rock” incluye estos versos, a los que se les podría poner música de Bob Dylan:

Where is the life we have lost in living?

Where is the wisdom we have lost in knowledge?

Where is the knowledge we have lost in information?

Where is the information we have lost in data?

Busquemos la sabiduría también desde la ingeniería.

**SOBRE LO QUE PENSAMOS QUE PENSABAN LOS FUNDADORES
DE L'ÉCOLE CENTRALE DE TRAVAUX PUBLICS DE L'AN III
Y SUS INMEDIATOS SUCESOES**

Javier Ordóñez

UAM

Son buenos tiempos para reflexionar sobre la ingeniería. No porque tengamos las ideas claras sino tal vez por todo lo contrario. Se nos ha enredado demasiado la cuestión de las relaciones entre la ciencia y la tecnología, tanto que se ha convertido en una maraña epistémica que creemos resolver generando todavía más galimatías semánticos de los que nos ha proporcionado la historia. Al hacerlo, seguimos manteniendo que tirando de nuestros pelos podríamos llegar a la Luna, como si fuéramos nuevos barones de Munchhausen¹. Lo que sigue no es un intento de resolver el problema, ni de hacer topografía filosófica para encontrar las fronteras entre ambos reinos, ni convencer a nadie de que sería un buen negocio unirlos para hacer una república mayor desde la que la ciencia y la tecnología, de la mano de los filósofos, llegara a adquirir más poder político. Nada de eso es la intención de este escrito, que previamente fue conferencia en Sevilla, en otoño de 2004. Es obvio decir que el problema es directamente inabordable. Primero, porque las ciencias y las tecnologías han construido sus identidades a través de vicisitudes históricas de itinerarios tortuosos de modo que muchas de las discusiones actuales, aunque se defiendan su originalidad, son el eco de otras discusiones anteriores. Segundo porque las diferencias entre ciencia y tecnología varían según el contexto desde el que se analicen. La diferencia de contexto no solo se refiere al gremio sino al trasfondo político y social desde el que se aborde el problema. Esa modulación hace que las

¹ El personaje bizarro de Karl Friedrich Hieronymus, Baron von Münchhausen, no tiene mucha tradición en nuestra lengua pero es una fuente de información preciosa para los historiadores de la tecnología fantástica. Una buena edición en español se tiene en G. Bürger (1982), *Viajes prodigiosos por tierras y mares, campañas y aventuras festivas del Barón de Münchhausen, tal como él suele contarlas en su tertulia junto a una botella*. Madrid : Alianza Editorial.

discusiones sobre las diferencias entre ciencia y tecnología se repitan de forma casi igual, pero solo casi. Y es en el margen de ese “casi” donde se debe instalar la discusión.

Podemos comenzar con una breve incursión en el uso de las palabras y en la calificación de los adjetivos que ofrecen un margen para el prestigio, o al menos para el orgullo. Asegurarse que algo es científico depende de una cierta rectitud en la manera de usar un método. La palabra tiene un contenido ético, y el actor debe tener la virtud de no desear engañar. He puesto un ejemplo que se refiere a la palabra *científico*, hoy generalizada pero de uso relativamente reciente, concretamente desde principios del XIX, porque concreta a la perfección las ambiciones de la ciencia romántica que deseó generalizar el uso de un género que englobara todas las especies de ¿las ciencias?, desde los astrónomos y cosmógrafos, los matemáticos, en la parte más indiscutible de la jerarquía cognitiva, hasta los sanadores, coleccionistas de piedras y viajeros iluminados que regresaban con la narración de maravillas inverificables, unas cuantas semillas, gran cantidad de dibujos y una inmoderada pobreza, y que se autodenominaban naturalistas continuadores de la tradición de Aristóteles y de Plinio de Viejo. La palabra mencionada goza hoy de un prestigio indudable, por más crítica que se haya hecho sobre la aplicación efectiva de un método científico. Y las sombras que arrastra no provienen sólo de los escepticismos sobre la metodología sino del miedo que produce su exceso de poder, y ese miedo se disemina bien entre los que lo detentaban anteriormente ya que notan su merma, bien entre los menos favorecidos que siempre sospechan de los poderosos de cualquier época por su fenomenal capacidad camaleónica.

Así, buscar un adjetivo que mida el prestigio de la ciencia es fácil. Adjetivo y sustantivo se nutren de la misma autoridad. No lo es tanto en lo que se refiere a la tecnología, que sigue los caminos del ingenio. Si buscamos una palabra que englobe en un género todas las actividades tecnológicas que ha realizado la humanidad desde el origen de los tiempos, encontramos la familia de nombres que se relacionan con la palabra ingeniería. Se habla hoy de ingenieros alejandrinos y romanos. Incluso sería admisible hablar de ingenieros babilonios o egipcios. La *helenofilia* habitual, tan presente en los estudios históricos de la antigüedad especialmente en filosofía y ciencia, suele convertir en “griego” a todo individuo con cierta relevancia por su actividad *científica* pensante que habitara el Mediterráneo entre el siglo VII antes de nuestra Era y el V de nuestra Era. En el

caso de la tecnología esta tendencia colonizadora parece aminorarse. En esas historias helenofílicas es necesario olvidar que Ptolomeo era egipcio, y por cierto ciudadano romano, cuando se habla de la historia de la astronomía antigua, pero se permite que los diferentes individuos que tuvieron como nombre Herón, que vivieron en Alejandría en el borde del cambio de Era, o los que se esconden bajo en nombre de Filón, fueran de cualquier etnia². Se permite en esa actividad tecnológica lo que no se tolera en la relacionada con la filosofía, que existan tradiciones en el *uso* del conocimiento, y así se rescata la técnica del infierno epistémico en el que buena parte de la filosofía especulativa la sepultó hace algunos siglos. La moderna palabra “ingeniería”, aplicada a la actividad de mecánicos y artesanos, rescata la dignidad de una de las actividades más antiguas entre los humanos, la manipulación de lo natural y su transformación en lo artificial, la aplicación del ingenio para fabricar mundos, que al ser humanos siempre son artificiales.

Bueno, pero si somos más modestos en nuestro retroceso en el tiempo, y buscamos una palabra desde el Renacimiento o desde el Barroco hasta nuestros días, volvemos a encontrarnos con la palabra ingeniería relacionada con el uso de habilidades para la fabricación, y la introducción del virtuosismo a la hora de realizar sueños humanos ancestrales.

Un arquetipo lo constituye Leonardo da Vinci, con su deseo de reproducir lo natural, imitarlo hasta fabricar artefactos que se comporten como los seres naturales, es decir vivos. Volar, nadar sumergido, pensar, mirar son actividades que se pueden desear comprender para disfrutar del mundo, para admirarlo, pero el ingeniero da Vinci sigue el camino de las tentaciones prometéicas, quiere imitarlo. En el caso de Leonardo entender es reproducir, construir, sustituir las sustancias naturales con artefactos. Su obra puede parecer la de un visionario, y así se la califica con frecuencia, pero con ello se omite que contiene aspiraciones que nos identifican. Leonardo se comportó como el arquetipo de los ingenieros.

Si partimos de él podremos entender mejor por qué la ingeniería renacentista se dedicó tanto a actividades útiles, como inútiles. Al lado de los

² Las tradiciones de comentaristas y traductores contemporáneos aceptan la existencia de diferentes tradiciones en el caso de la historia de la tecnología. Sólo es necesario asomarse a las ediciones de Herón de origen árabe como la de L. Nix y W. Schmidt de 1900 y la de Schöne de 1903, ambas en Leipzig y ambas de Teubner para comprobarlo.

trabajos de hidráulica, de fortificación, de mejora de los caminos, hubo ingenieros que se dedicaron a construir autómatas y mecanismos llenos de sorpresas, a promover el nacimiento de ilusiones. Aunque se deba reconocer que fueron los menos y no los que lograron más prestigio social. Junto a esa manía por los artefactos que alimentaban las ilusiones, nació una actividad cercana a la filosofía experimental, que la ayudaba en la labor de escudriñar la naturaleza. ¿Se llamaban ingenieros los que construyeron los primeros instrumentos científicos, los que fundieron el primer vidrio para un termoscopio del tipo galileano o construyeron relojes de cuerda? ¿Cómo se denominaría a quienes diseñaron las primeras gafas o los primeros anteojos o los telescopios que se vendían en toda Europa a principios del siglo XVII? ¿Y los que desarrollaron la fabricación de cristal a lo largo del XVIII para obtener lentes acromáticas? ¿Y para fabricar relojes exactos? Es evidente que los contemporáneos no consideraron ingenieros a Cassgrain, a Hall, a Harrison. ¿Los consideraríamos ahora? La palabra artesano dominaba sobre la de ingeniero. El resultado del conocimiento manipulador, activo, técnico, es sin duda la forma más antigua de conocimiento, aunque no se la reconociera relacionada con formas más filosóficas, especulativas o teóricas. Por eso todavía en el siglo XVIII no se relacionaba la actividad de los ingenieros con la de los artesanos, o bien ambas traducían de forma separada.

Las tradiciones de los científicos y de los ingenieros no han recibido la misma atención ni por parte de los filósofos ni por parte de los historiadores. Es una constante cultural la tendencia a considerar muy separadas estas dos formas de conocimiento. En este pequeño ensayo, no espero dirimir ni el problema historiográfico ni el filosófico. Sólo me interesa señalar que existe, para reflexionar sobre el momento cuando la ingeniería se hizo visible al lado de las ciencias estándar. O mejor, cuando yo pienso que ocurrió, para presentar lo que sucedió entonces. Es decir, esta reflexión sobre la ingeniería tiene el sentido de una mera conjetura. A mi juicio esa conjetura tiene relevancia, precisamente por el interés que ahora muestran algunos filósofos por explotar comercialmente el valor de la franquicia “tecnología”.

Ciertamente, merece la pena reflexionar sobre la ingeniería porque su formación moderna fue coetánea a la de las ciencias. El nombre de ingeniero adquirió relieve y prestancia social a lo largo del siglo XVIII, porque en esa época se formaron en instituciones que acogieron con gusto las nuevas ciencias y no sólo las emparentadas con las matemáticas sino las relacionadas con la

industria, como la química o la construcción. Pero no voy a referirme a ese período sino a uno inmediatamente posterior, la última década del siglo XVIII, concretamente en el París revolucionario, durante ese conjunto de experimentos sociales tan especial que resumimos con el nombre de *Revolución Francesa* y que renombró a todas las revoluciones anteriores y posteriores. En ese contexto se determinaron varias tradiciones en ingeniería que se han transmitido hasta nuestros días. Sólo pretendo situarme en los primeros años revolucionarios para analizar algunas circunstancias en las que se produjeron.

Creo que en ese período se produjo una refundación de la ingeniería, que ese hecho se dio en un proceso político, es decir, público, impulsado por las instituciones surgidas de la Revolución, que sus actores fueron *savants* procedentes de los grupos de poder más influyentes dedicados a la acción política, que ese grupo de *savants* no estuvo solo integrado por miembros de las clases de la *Académie*, sino también por ingenieros militares al servicio de la corona. Finalmente mantengo que en aquel experimento político que significó la refundación de la ingeniería surgieron los precedentes tanto de los futuros científicos como de los futuros ingenieros en un proceso de profesionalización característico de principios del siglo XIX. Que las ciencias se beneficiaron del entusiasmo de aquellos ingenieros por las ciencias y que se produjo una primera fusión de actividades que tuvo repercusiones tanto epistémicas como sociales.

En la Francia gobernada por los Borbones se dieron precedentes que permitieron tal experimento social. París era la capital científica del mundo ya en la segunda mitad del siglo XVIII. Eso quería decir no sólo que contaba con una institución científica de prestigio, como era la *Académie Royale des Sciences*, sino con un sistema educativo asociado a las nuevas ciencias, como el cálculo infinitesimal, la mecánica pura y aplicada, específicamente la construcción y la hidráulica, la química, en las nuevas escuelas de ingenieros militares. Los profesores de estas escuelas eran muchas veces geómetras, mecánicos, incluso químicos de prestigio. Se puede citar a alguno de ellos que tuvo después una influencia determinante en los sucesos que nos interesan, primero a Lagrange, que fue profesor de la institución que formaba los ingenieros de Turín y ese puesto de trabajo le permitió tener tiempo para dedicarse a las matemáticas, y en segundo lugar a Pierre Simon Laplace, que llegó a ser el sabio más influyente del Imperio, comenzó su carrera en París como examinador de esas instituciones que tenían a gala disponer de un buen nivel científico. Sin duda, el patronazgo

de la corona y las necesidades del reino fueron unos estímulos de excepción para mantener una comunidad de *savants* que cultivaban las ciencias, y de ingenieros que desarrollaban las técnicas en una medida parecida.

Los acontecimientos ocurridos a partir del 1789 transformaron el papel de la monarquía. Sin embargo, la nueva República de 1792 se encargó de introducir una voluntad de renovación en todos los dominios, y especialmente en el de la formación de los nuevos ciudadanos. Entre las dos fechas, los políticos en el poder desearon renovar todas las instituciones del Estado pensando que una reforma semejante transformaría la sociedad, de forma que el *Ancienne Régime* quedara desterrado para siempre.

Nada más comenzar las sesiones de los *États Generaux* en 1789 surgió la primera reforma que se refería a la necesidad de contar con un sistema unificado de pesas y medidas³. No era un problema banal, había sido reclamado desde hacía dos siglos en todas las instancias del Reino. Era una cuestión que afectaba a la economía de la vida cotidiana, y a la economía del Estado, a los impuestos, a los salarios, a las deudas, a la contabilidad de los bienes, a las herencias. Se consideró que de ella dependía la justicia de las decisiones judiciales que involucraban bienes medibles, y el buen funcionamiento del gobierno de la nueva monarquía. Se formó una comisión para abordar el problema con *savants* ligados a la *Académie*, y con ingenieros militares. La comisión no trabajó eficazmente en un principio, pero lo cierto es que el 1799 se publicó el decreto con las pautas para la creación de un sistema decimal de pesas y medidas, en cuya creación se aunaron esfuerzos de matemáticos, ingenieros dedicados a la topografía y geodesia, químicos, en una comisión plural. Las discusiones acerca de dónde se podría tomar la unidad natural de medida no se centraron en puras disquisiciones teóricas, y para los protagonistas era difícil distinguir lo que es puramente científico de lo tecnológico. Elegir como unidad la longitud del péndulo que bate segundos o una parte del cuadrante del meridiano terrestre, no era ni una cuestión meramente científica ni exclusivamente tecnológica. Los primeros tiempos revolucionarios ofrecen ejemplos de esa zona de diálogo entre los diferentes grupos de *savants* e ingenieros, en cuyo contexto se abordaron otras reformas que afectaron más radicalmente a la sociedad francesa.

³ L. Marquet (1996), “La création du système métrique décimal”, en *Le Système Métrique, hier et aujourd’hui*, A.D.C.S, París, pp. 7-72.

Si tres años antes se había abordado un problema antiguo, la reforma del sistema de los pesos y medidas, en 1792 la República demolió el sistema de cómputo del tiempo, introduciendo el nuevo calendario revolucionario, y la división de los horarios diarios en subdivisiones decimales. Se quiso remover todos los indicios del régimen precedente, lo que se consideraban referencias cristianas del calendario. Así se pasó a un año que comenzaba en el equinoccio del otoño, dividido en meses de treinta días y estos en secuencias de decenas de días en un intento de conjurar la semana bíblica. En la misma línea estuvo el intento de subdividir la hora en cien minutos y los minutos en cien segundos. La reforma del reloj fue todavía más efímera que la del calendario que se usó durante doce años. Modular las costumbres de una sociedad no fue tan fácil como lo pensaron aquellos revolucionarios, aunque sí descubrieron que no motivó su fracaso querer imponer un calendario imperfecto sino no contar con la viscosidad de las costumbres y las tradiciones en las sociedades humanas, y su resistencia a aceptar transformaciones que somuevan hábitos tan enraizados como los de la medida del tiempo. Acertaron al considerar que el sistema de cómputo del tiempo es un artificio tecnológico, aunque aparentemente incorpóreo y sutil, y se equivocaron al pensar que esas referencias tecnológicas pueden cambiarse sin más voluntad que la política revolucionaria. Lo tecnológico se puede naturalizar con facilidad al olvidar su origen de artificio inventado por los seres humanos. Además de todo lo ya mencionado, el entusiasmo revolucionario creyó imprescindible cambiar los procesos de formación de su sociedad y dio paso a una formidable reforma educativa.

Con la misma fuerza y rigor que se moduló el parlamento y la retórica entre los ciudadanos dando lugar a nuevas instituciones políticas, como la *Convention*, se abordó el sistema de formación de maestros, médicos, ingenieros y militares. El cambio se gestó a lo largo del año II de la República (1793) en medio del período que muchos historiadores denominan Terror, pero sólo se manifestó con toda su fuerza durante el año III. La reforma adquirió un gran impulso después de la caída de Robespierre en el golpe de estado del 9 *thermidor*. Sus impulsores fueron los mismos que habían sido los responsables del golpe y quisieron rápidamente separarse de los viejos jacobinos a los que acusaron de fomentar la ignorancia de los habitantes de la nueva república. Hoy se reconoce que esa representación del bienio 1793-4 como el período de la barbarie no es totalmente adecuada, ya que fue entonces cuando se gestaron los proyectos de reformas educativas posteriores. La frase apócrifa *La République n'avait pas besoin de*

savants supuestamente formulada por los jueces que enviaron a Lavoisier a la guillotina, circuló desde entonces como una exageración interesada destinada a marcar las distancias entre los perdedores de los comités de salud pública y los políticos que se asentaban en el poder, algunos de ellos procedentes de las élites de *savants*, como Monge, Berthollet o Fourcroy. Mientras París celebraba el regreso a la normalidad después de haber eliminado a los puritanos, esos sabios eligieron la estrategia de una reforma educativa como la mejor forma de fundar la nueva Francia y para el relanzamiento del estado. Aprovecharon lo hecho, pero lo presentaron como una innovación y como un desafío de los nuevos tiempos.

Conviene preguntarse por tanto en qué medida la reforma propuesta constituía una ruptura con toda la tradición anterior. La noción de “ciencia”, o de “conocimiento”, que se usó en este período revolucionario tenía connotaciones que conviene considerar para apreciar hasta qué punto hubo innovación institucional. Se puede enumerar las ciencias que tenían más prestigio acudiendo a las diferentes clases en la que estuvo dividida la *Académie Royale des Sciences*, y se tendrá un repertorio que nos resultará muy familiar, matemáticas, química, historia natural y justo antes de la revolución la nueva clase de física. Sin embargo, ese catálogo puede llamarnos a engaño al inducirnos a pensar que las especies científicas ofrecían un perfil demasiado contemporáneo. En realidad, las profesiones relacionadas con las ciencias era un catálogo muy corto: médicos de diferentes niveles de profesión (incluidos cirujanos), astrónomos y navegantes, e ingenieros militares; asociados con ellos los naturalistas y los matemáticos, y como recién llegados los que cultivaban la nueva ciencia de la química que había experimentado un gran auge a lo largo del siglo XVIII. Todo estaba teñido de actividad práctica, de lo artesanal y de lo tecnológico. La reforma de la educación se dio así en un contexto donde la mayor parte del conocimiento tenía una dimensión práctica.

¿Qué admiraban los franceses revolucionarios, además del prometido sistema de pesas y medidas que era enormemente popular, o del calendario nuevo que no lo era en absoluto? Sin duda, las nuevas tecnologías. La ascensión en globo aerostático diseñado por los hermanos Joseph y Etienne Montgolfier⁴

⁴ Los hermanos Montgolfier son un ejemplo de tecnología en la revolución. Aunque tuvieron reconocimiento de su trabajo antes de 1789, fue en los procesos políticos posteriores donde encontraron reconocimiento. Joseph Montgolfier llegó a ser miembro del *Institut de France*.

constituyó un acontecimiento social desde 1783. La *Académie* había patrocinado las investigaciones como asunto de estado, los militares las consideraban de valor estratégico, y los franceses disfrutaban con el espectáculo. La República consideró el trabajo de los hermanos Montgolfier como una prioridad para la seguridad nacional y una esperanza cierta de conseguir una superioridad tecnológica en la guerra con las potencias de Centroeuropa. Otra tecnología que inspiró un tipo de sentimiento diferente aunque no menos intenso fue la máquina llamada guillotina, para disgusto del doctor Joseph-Ignace Guillotin quien pasó erróneamente por ser su inventor. En realidad, este médico lo único que hizo fue mejorar su funcionamiento, estudiar la conveniencia de su empleo “si fuera necesario”, y terminó siendo un impulsor de su uso por motivos supuestamente humanitarios. La guillotina se convirtió en un icono tecnológico de la revolución como aparato democratizador de las ejecuciones. Si todos los franceses eran iguales y todos ellos eran ciudadanos, debían tener el derecho a ser ejecutados de la misma manera. La tecnología acudía una vez más al auxilio de la razón de estado y de los escrúpulos de los legisladores. Las discusiones sobre la guillotina se centraron en torno a si su uso eliminaba el dolor en el reo, si la muerte era lo suficientemente rápida, si la cabeza mantenía la consciencia una vez separada del cuerpo. Médicos y artesanos pusieron su mejor conocimiento al servicio de la especie humana, y siempre fueron minoría quienes propugnaban la sencilla solución de abolir la pena de muerte. Dado que las ejecuciones eran un espectáculo público, la guillotina al principio defraudó por su rapidez, aunque ganó una gran popularidad en los tiempos de la acción de los comités de salud pública. Además de estas tecnologías tan espectaculares, se pueden mencionar otras que tuvieron también una gran repercusión pública, como la campaña para la vacunación de la viruela, o la misión política que requirió la participación del pueblo francés en la fabricación de la pólvora necesaria para defender la república. Esto en lo que se refiere a dimensión pública y urbana de la tecnología.

Francia había sido con la monarquía, y seguía siendo con la república, un estado que usaba los conocimientos de los sabios. No debe extrañar entonces que todos los académicos hubieran participado en proyectos que hoy denominaríamos “tecnológicos”, que hubiera muchas comisiones de *savants* relacionadas con la industria y se diese un continuo de conocimientos, desde los más abstractos hasta los más prácticos. Lavoisier era sin duda el *savant* más poderoso de toda Francia en 1789. Su formulación de la teoría del oxígeno había renovado la química, su

nomenclatura ganaba adeptos al introducir un orden en el babel de los nombres de los productos químicos, era el autor de un tratado sencillo que permitía introducirse en la nueva ciencia con un futuro asegurado para el siglo venidero, el XIX. Sin embargo Lavoisier no fue considerado el mejor químico de su época sólo por los logros ya mencionados, sino además por haber sido capaz de organizar un laboratorio donde se trabajaba de manera organizada, con una jerarquía reconocible, que tomaba decisiones sobre qué hacer en cada momento. Su organización del conocimiento sedujo a médicos, como Berthollet y Fourcroy, y a matemáticos como Condorcet y Laplace⁵. Si en la calle los ciudadanos franceses disfrutaban tecnologías que los cautivaban, en los salones y en los reservados se consideraban los nuevos conocimientos de astronomía, navegación, química y geometría, y las artes e industrias como pilares de la sociedad.

Lavoisier, además, había mostrado que los sabios podían ser también patrones, organizadores, y de hecho fue nombrado para la dirección de la fábrica de pólvora que debía subsanar el eterno déficit del estado en ese producto⁶. Tuvo tanto éxito en la producción de la pólvora como en la organización del conocimiento. Lavoisier no fue un caso aislado de *savant* comprometido con las prácticas científicas, tecnológicas y políticas, más bien fue un síntoma de lo que estaba ocurriendo en la sociedad francesa. Además de su nombre se puede mencionar el de Gaspard Monge, quien escribió un manual de geometría descriptiva que el gobierno París consideró durante tiempo *pli cacheté*, algo así como un conocimiento con alto valor para la seguridad del estado, o a Lazare Carnot, matemático que abrió la polémica sobre si las máquinas hidráulicas eran más eficientes que la de fuego (es decir las máquinas estáticas de vapor), investigación que fue seguida por Prony⁷.

⁵ Una prueba de esta colaboración se encuentra en la obra Lavoisier, A. y Laplace, P-S. (1992), *Mémoire sur la chaleur = Memoria sobre el calor*. (Ed. Bilingüe), Edición Mercedes González, E.T.S. de Arquitectura, Madrid.

⁶ El informe más relevante de Lavoisier sobre este asunto es *Instruction sur l'établissement des nitrières et sur la fabrication du salpêtre publiée par ordre du Roi. Par les régisseurs généraux des Poudres & salpêtres*. París, Imprimerie royale. M.DCCLXXVII.

⁷ La deliberación que comparaba el interés de las diferentes máquinas disponibles se encuentra en dos obras claves de la época. La primera, L. Carnot (1786), *Essai sur les machines en general*. Dijon: Defay; y la segunda, de G. Prony (1790), *Nouvelle architecture hydraulique, contenant l'art d'élever l'eau au moyen de différentes machines*, París : Didot, que fue seguida de una segunda parte en 1796. Un cuarto de siglo más tarde, su influencia sobre Sadi Carnot fue decisiva para formular el principio de Carnot.

Los *savants* mencionados en el párrafo anterior se incorporaron sin dificultad al nuevo régimen que se instauró en Francia a partir de julio de 1789. En general todos ellos fueron en principio respetados, aunque durante el Terror tuvieran las mismas dificultades que otros notables que estaban en el epicentro de las ambiciones políticas. La muerte de Lavoisier no privó de influencia a los discípulos que se habían formado en su laboratorio, como Fourcroy o Guyton de Morveau, que militaron en el sector jacobino, y que a pesar de ello tuvieron una gran influencia en el golpe termidoriano. Monge y Carnot nunca dejaron de ejercer un gran poder incluso en los momentos más dramáticos del Terror, y el segundo fue uno de los artífices de la caída del grupo de Robespierre.

Regresando a ese acontecimiento, tras la caída del puritano, los *savants* ganaron influencia y aprovecharon para poner en práctica la creación de instituciones que determinaron la vida cultural de Europa. En el otoño de 1794 (comienzos del año III de la República), los termidorianos fundaron la *École centrale de travaux publics*, que después se transformó en la *École polytechnique*, para formar ciudadanos que pudieran dirigir las obras del estado. Pare entender el sentido de la fundación conviene tomar en consideración dos cuestiones. La primera, que al mismo tiempo se crearon *l'École Normale* del año III, las escuelas de salud y el *Conservatoire national des arts et métiers*. La segunda, que todas ellas se concibieron como escuelas revolucionarias. La escuela de ingenieros formaba parte de un vasto plan de movilización intelectual a favor de lo que quedaba del proyecto republicano en otoño de 1794.

El año III fue así un año fundacional de nuevas instituciones que debían formar a los ciudadanos a base de cursos cortos e intensos, que duraran unos pocos meses. Esos períodos de formación eran herederos de los *cursos revolucionarios* que se habían impartido en primavera de 1794 para adiestrar a los ciudadanos en la fabricación de armas, de salitre y de pólvora. En este contexto la palabra revolucionario quería decir intenso como indica Fourcroy, el primer historiador de la *École Polytechnique*, quien lo explicaba diciendo que “esa palabra se había convertido en el sinónimo enérgico de acelerado, cuando esa aceleración se obtenía a costa de la forma y la regularidad de los procesos”, y añadía con escepticismo: “una operación revolucionaria no era una buena operación sino una que satisfacía las necesidades del momento”⁸. Posteriormente

⁸ A. Fourcroy, *Historie de l'École polytechnique*, París, 1828 p. 25 (reimpresión en París, Belín, 1989).

se dejó de usar ese adjetivo por considerarse demasiado peligroso para la estabilidad del estado, sin embargo en el año III fue un arma arrojadiza contra cualquiera que se opusiera a la formación de los nuevos ciudadanos.

Los cursos revolucionarios del año II antes mencionados duraban apenas un mes y con ellos se pretendía disponer de técnicos hábiles en el desarrollo de las artes de la guerra, ya que la República estaba amenazada por enemigos del este. Los profesores de esos cursos fueron *savants* bien relacionados con los jacobinos, Fourcroy, Monge, Guyton, etc., los mismos que en el año III impulsaron la creación de las nuevas instituciones. En aquella ocasión, no deseaban promover cursos ocasionales y dispersos. Más bien estaban convencidos de la importancia de una formación regular, pero sin duda temieron que en la Convención hubiera quien les recordara sus implicaciones con el Terror. Se desmarcaron de su etapa anterior con la estrategia política más antigua que se conoce: acusar a sus antiguos aliados. Al tratarlos de bárbaros, anticientíficos, crearon la primera propaganda oficial conocida que establece una relación entre estado y conocimiento. El que llevó el peso retórico de la defensa del nuevo decreto de creación de las nuevas instituciones fue Fourcroy, que había sustituido a Marat en la Convención cuando éste fue asesinado por Charlotte Cordet.

La estrategia de Fourcroy en la Convención pasó por la demolición de los jacobinos en los términos siguientes: “Mientras los conspiradores quisieron hacer desaparecer de Francia la Ilustración cuya influencia temían, la Convención nacional se opuso con toda su fuerza a los esfuerzos de esos bárbaros; conservó con todo cuidado todas las producciones del talento y rescató del exilio a los hombres ilustrados que los tiranos querían perder. Sabía que recogiendo las cosas y defendiendo a los hombres instruidos llegaría un tiempo cuando se les podría emplear con utilidad para difundir la Ilustración. Vuestros Comités de Salud Pública y de Instrucción han recogido suficientes pruebas y reunido suficiente número de hechos como para que no pueda dudarse de la existencia de la conjura contra el progreso de la razón humana. Con ello se ha demostrado que uno de los planes de los conspiradores fue la anulación de las ciencias y las artes, para proceder a la dominación por medio de la ruina de los conocimientos humanos, precedidos por la ignorancia y la superstición”.

Frente a esa representación del pasado, el autor de la soflama invoca el valor fundamental del conocimiento: “¡Representantes! no dejéis de decirlo: la

Ilustración ha iniciado la Revolución francesa, la Ilustración ha hecho caminar al pueblo francés de triunfo en triunfo, es ella quien ha vencido todos los obstáculos, es ella quien ha sostenido a la República francesa a la altura a la que ha llegado...”⁹.

El conocimiento ilustrado, acuñado durante el *Ancienne Régime*, paradójicamente debía ser el impulsor de la nueva sociedad. En aquella ocasión los *savants* consiguieron una gran influencia en el aparato del estado que no perdieron a lo largo de décadas. De todas las instituciones creadas, la que interesaba más a aquellos primeros revolucionarios fue *l'École de travaux publics*. Fue la que más creció, la que tuvo menos interrupciones en su desarrollo y donde se concentraron de forma coherente sus esfuerzos políticos. Era una escuela que heredaba parte del espíritu de los cursos revolucionarios que deseaban formar técnicos, aunque se pretendiera dar una continuidad y solidez a los estudios que los fundaran en las ciencias y en las artes del momento. A su vez se diferenciaba de la *École Normale* del año III en que los conocimientos que debían adquirir los participantes debían tener una dimensión técnica.

En el proyecto de decreto Fourcroy relacionaba la creación de la escuela con el estado de guerra de la república: “La guerra, que solo es una barbarie atroz entre reyes, y que sólo es justa para un pueblo que recupera sus derechos con su libertad, se ha convertido para la república en una ocasión para desarrollar toda la potencia de las artes, para ejercer el genio de los sabios y de los artistas, y para consagrar la utilidad por medio de aplicaciones ingeniosas”¹⁰. La guerra se convertía en la promotora de la libertad y del ingenio, aquellos que se opusieran a la guerra formaban parte de los conspiradores y de los reaccionarios. La ardorosa retórica patriótica usada en aquella circunstancia aconsejaba dar un catálogo de necesidades del estado: “es necesario, primero contar con ingenieros militares para la construcción de fortificaciones..., segundo con ingenieros de puentes y caminos para construir y asegurar las comunicaciones por tierra y por agua..., tercero con ingenieros geógrafos para disponer de mapas generales y particulares de tierra y mar, cuarto, con ingenieros de minas para la investigación, explotación de minerales, tratamiento de los metales y

⁹ *Texte du rapport et projet de decret de Fourcroy du 7 vendémiaire an III* (28 de septiembre de 1794), p. 1.

¹⁰ Fourcroy, *op. cit.*, p. 4.

perfeccionamiento de los procesos metalúrgicos, y quinto con ingenieros constructores para la marina...”¹¹. Habían sido creadas ya escuelas hacía décadas para subsanar todas estas necesidades, y la que Fourcroy presentaba a la Convención era un proyecto de unificación, de centralización de recursos del profesorado y de organización para conseguir que toda la formación de los ingenieros franceses fuera lo más uniforme posible.

Para conseguirlo era necesario diseñar un programa de estudios donde estuvieran recogidas las ciencias que podrían denominarse revolucionarias, sencillamente porque podían estar mejor que otras al servicio de la República. En boca de Fourcroy esas ciencias eran las matemática y la física (entendida como física y química). Los alumnos de la *École* que debían ser adiestrados en estas ciencias podrían llegar a obtener una acreditación para trabajar al servicio del estado. En realidad, Fourcroy hacía una recopilación de necesidades reconocida desde hacía décadas, aunque la propuesta tenía la novedad de concentrar la formación en un conjunto de conocimientos muy coherentes, con la esperanza de conseguir una homogeneización de los caracteres políticos a través de la normalización que imponían las ciencias.

Se aprobó la ley después de unos pocos días de discusión porque nadie pretendía oponerse a las propuestas de Fourcroy. La organización de la escuela requirió de algunos meses de trabajo, pero en febrero de 1795 ya estaban preparados los *Programmes de l'Enseignement Polytechnique de l'École Centrale de Travaux Publiques*. Ya aparecía la palabra *polytechnique* que se fue imponiendo progresivamente hasta ser definitoria de la escuela. Ya no era una escuela de mera tecnología especializada sino de un conjunto enciclopédico de tecnologías que necesitaban una cimentación científica común. Sin duda, la referencia a las ciencias fue la mayor revolución en la organización de la enseñanza para los ingenieros de entonces. Jean-Baptiste Biot nos da cuenta de ese nuevo espíritu en su historia de la ciencia del período revolucionario: “se tenía un objetivo triple, formar ingenieros para los diferentes servicios, diseminar en la sociedad civil hombres ilustrados, y excitar los talentos que podrían hacer avanzar las ciencias”¹². Las palabras de Biot son muy elocuentes

¹¹ Fourcroy, *op. cit.*, p. 5.

¹² J. B. Biot, *Essai sur l'histoire générale des sciences pendant la révolution française*. París, 1803, p. 59.

por dos aspectos fundamentales. En primer lugar, con toda seguridad dan cuenta del entusiasmo del momento entre los estudiantes que quedaban galvanizados por la oratoria de personajes como Monge o Fourcroy, que unían a su conocimiento científico el magnetismo de políticos de la Convención acostumbrados a seducir con sus discursos. En segundo, porque están escritas en 1802 y publicadas en 1803, cuando la situación política en Francia había cambiado completamente, ya que se había iniciado no sólo el período napoleónico sino la gran época de dominación laplaciana en la cultura científica francesa. El análisis de la influencia de Laplace será parte de la reflexión final de este trabajo, y antes de hacerlo es preferible detenerse en algunos aspectos de la organización docente de la primera *École* de 1795 que permiten entender la filosofía (en mi opinión fue una auténtica y genuina filosofía política) de aquel experimento social impulsado desde la Convención.

Primero se diseñaron cursos revolucionarios en el sentido descrito más arriba, aunque pronto se organizó la escuela de una forma estable. Durante todo el proceso de normalización de la actividad que se produjo a lo largo de 1795, se mantuvo la preeminencia de las ciencias. La programación de la *geometría descriptiva*, base de la enseñanza, estuvo a cargo de Monge, aunque otras personas impartieran las clases. Fourcroy se ocupaba personalmente de la *química*, y posteriormente Bertollet tomó a cargo esa ciencia. Menciono así los dos estudios fundamentales del programa, pero también recibían los alumnos clases de *análisis y mecánica*, de *dibujo* y de *física*. La importancia de la geometría descriptiva quedaba plasmada en las palabras de Monge como presidente mensual de la escuela: “Según el plan de fundación de la Escuela Central de Obras Públicas, la geometría descriptiva debe ser cultivada en ella por los alumnos durante tres años del curso total de los estudios. Durante el primer año el objeto de instrucción es ella misma. En los siguientes sólo es un medio o instrumento. Durante el primer año los estudiantes deben ejercitar el método de proyecciones y familiarizarse con él por medio de las aplicaciones de todo tipo que no supongan ningún conocimiento preliminar y que proporcionen resultados útiles a los ingenieros de trabajos públicos. Así, después de haber aprendido durante dos meses los métodos generales se aplicarán durante el resto del año a hacer uso de ellos en diferentes casos, aplicándolos a las señales de corte de las piedras y maderas, a la determinación rigurosa de las sombras en las proyecciones, a las construcciones de la perspectiva, al levantamiento de mapas

y planos y, finalmente, a la descripción de la mayor parte posible de máquinas empleadas en los trabajos públicos de todo tipo. Además, si se me permite un lenguaje figurado, el método de las proyecciones es para los alumnos un instrumento de instrucción que en el primer año deben fabricar por sí mismos y del que deben a continuación aprender a servirse para adquirir todos los conocimientos que no suponen ninguno preliminar o que sólo suponen unos pocos”¹³.

Monge pensaba que la geometría descriptiva era un conjunto de conocimientos que podía fundamentar toda la formación de los ingenieros en arquitectura, estereotomía y geometría general¹⁴. Según el plan de estudios, los alumnos dedicaban cerca de la mitad de su tiempo al estudio de esa geometría, una cuarta parte a la química, mientras que el estudio del análisis matemático y la mecánica ocupaba apenas un diez por ciento. El resto se dedicaba a dibujo, y la física. A pesar de las pomposas palabras que había dedicado Fourcroy a la física, apenas recibía la atención del tres por ciento del tiempo de los programas¹⁵. Esta distribución de materias fue la inicial y varió a lo largo de diferentes reformas en el Directorio, Consulado e Imperio. La escuela cambió de nombre a lo largo del 1795 en el calendario gregoriano y se militarizó a partir de la promoción de 1805. Para entonces, los ardores revolucionarios que expresaba Fourcroy se habían apagado completamente, y la mayor parte de los jacobinos habían sido directamente retirados de la vida pública. La sociedad francesa consideraba que Napoleón era un resultado positivo de la revolución, pero no la revolución misma. En 1804 se reintrodujo el calendario gregoriano, se abolió *de facto* el revolucionario que pasó a tener un valor casi ornamental, pero la escuela fundada por los termidorianos siguió cumpliendo sus objetivos al formar generación tras generación de ingenieros, y el adjetivo *polytechnicien* se convirtió en un calificativo de prestigio.

La reputación de la escuela aumentó con el paso de los años y de las sucesivas generaciones de alumnos que fueron ganando influencia en la sociedad francesa. Conviene fijar la atención sobre un aspecto que no fue circunstancial. Los programas iniciales de los primeros cursos revolucionarios pusieron el énfasis en

¹³ Contenido en el *Proceso verbal* de la sesiones del Consejo de administración de la Escuela central de los trabajos públicos de 20 pluvioso del año III (8 de febrero de 1795).

¹⁴ Para conocer un resumen de sus ideas puede consultarse Gaspard Monge (1799), *Géométrie descriptive: leçons données aux Écoles normales, l’an 3 de la république*, París: Baudouin,

¹⁵ J. Langins (1987), *La République avait besoin de savants. Les debuts de l’École polytechnique*. Belín-París, p. 28.

crear un tronco común de conocimientos que actuaran como dinamizadores de toda la actividad práctica. En la intención de los legisladores y políticos, no había frontera reconocible entre las ciencias que se enseñaban en primer lugar, consideradas base del conocimiento, y las tecnologías o artes que debían desarrollar los alumnos posteriormente. Además, la articulación en unos planes de estudio coherentes consiguió promover el interés progresivo de los jóvenes estudiantes de las sucesivas generaciones de la escuela por los estudios más abstractos, por las prácticas experimentales orientadas a la ciencias más básicas, y a interesarse por las reflexiones extraídas del comportamiento de los artefactos.

Los primeros cursos de análisis y de mecánica estuvieron a cargo de Lagrange, el matemático turinés discípulo de Euler que había emigrado de Berlín a París, temiendo que en la capital de Prusia pudiera haber graves tumultos a la muerte del Rey. París lo trató bien incluso en los momentos más inseguros de los Comités de Salud Pública, y los termidorianos lo convirtieron en un personaje central de la enseñanza de matemáticas en los primeros cursos revolucionarios de la Escuela. Sin embargo su influencia inicial fue muy escasa. Sus primeras clases tuvieron en un principio el éxito derivado de su prestigio, pero la abstracción de sus razonamientos y de sus propuestas vaciaban las aulas progresivamente.

Sin embargo con el paso de los años las matemáticas fueron ganando influencia. Los alumnos sufrieron procesos de selección más estricta, disminuyeron en número, aumentó su interés, las matemáticas gozaron de un envidiable prestigio social apoyado en toda la tradición de ingenieros matemáticos como Monge y Carnot. También se apoyó en dos pilares, uno el propio Napoleón que se consideraba a sí mismo como matemático y general (por ese orden, aunque prefiriera que los demás lo vieran en orden inverso) y para quien era muy positivo que esas ciencias fueran el eje de la enseñanza de la escuela; el otro, la influencia progresiva de Pierre-Simon Laplace, un *savant* que nunca fue profesor de la Escuela y que sin embargo se convirtió en el personaje más influyente de la ciencia del Consulado, y del Imperio. Napoleón se fiaba de su criterio y le pidió opinión sobre la forma de llevar a cabo la enseñanza en la escuela. Analizaré el papel de Laplace en lo que resta de este escrito porque en su idea de la organización del conocimiento estuvo la clave de la evolución de la Escuela.

La influencia de Laplace estuvo en la raíz de la transformación de la Escuela, que pasó de ser una institución promotora de ingenieros a la antigua usanza, visto desde la época revolucionaria, a un centro promotor de las ciencias y de las artes

en su mayor generalidad. Las palabras de Fourcroy que he citado anteriormente dan cuenta de la relación de los ingenieros con su pasado, como funcionarios del estado aptos para resolver sus problemas tecnológicos fundamentales enumerados a través de la tipología de especialidades que requiere un estado ilustrado. Sin embargo, la misma organización de la enseñanza en la Escuela impulsó en los alumnos su interés por las ciencias y se formaron ingenieros que mostraron intereses muy determinados por el desarrollo de las prácticas científicas. La intención de formar ciudadanos para resolver problemas prácticos, es decir la intención de formar ingenieros, provocó el interés de esas mismas personas por las ciencias. Las ciencias sirvieron para ilustrar la nueva Francia y a la vez para emprender una tarea civilizadora. Por eso la relación entre ingeniería y ciencia durante la última década del siglo XVIII y la primera década del XIX no es puramente un problema historiográfico. No deja de asombrar a quien se asome a los textos de esa época, la imbricación existente entre ingeniería y ciencia en los planes de estudio, y en toda la voluntad política de hacer del conocimiento científico y técnico una nueva cultura para la nueva sociedad.

Es difícil entender la creación de esa cultura sin considerar el papel de Laplace durante esos años. No fue nunca un jacobino, y durante el tiempo de actuación de los Comités de Salud Pública se retiró en un pueblecito llamado *Melun*, aunque nunca dejó de estar enterado de lo que pasaba en París. En 1794 el matemático Lazare Carnot impulsó la creación del *Bureau de Longitudes* y relanzó los trabajos para la reforma de los pesos y medidas. Gran parte de los *savants* fueron convocados para participar en la defensa de Francia y en la reforma educativa que pretendía diseñar un sistema educativo para todos los ciudadanos de la nación. Ya he mencionado que Laplace no enseñó en la escuela de ingenieros sino en la *École Normale* fundada en el año III, donde se encargó de la formación científica de un grupo de franceses que posteriormente debían ser a su vez maestros del resto de los ciudadanos de la República en los diferentes lugares de Francia. Los antiguos académicos no debían ser necesariamente buenos profesores pero hicieron el trabajo con suficiente interés como para mejorar su imagen ante la sociedad revolucionaria.

Laplace, como profesor de la *École Normale*, impartió diez lecciones de matemáticas. Aritmética, álgebra, teoría de ecuaciones, geometría elemental y la aplicación del álgebra a la geometría, constituían el núcleo fundamental de las primeras ocho lecciones. Una presentación densa, de los conceptos más elementales a los relativamente superiores en una ascensión implacable y difícil

sin duda para la parte del auditorio menos formada. La novena sesión se dedicaba a describir los fundamentos del nuevo sistema de pesos y medidas fundado sobre la medición de la longitud del meridiano terrestre. La décima, por fin, presentaba la trama del *Essai philosophique sur les probabilités*¹⁶. Este último tópico se adentraba en una de las preocupaciones que Laplace había compartido con Condorcet, la aplicación de las matemáticas a los números que expresaban características cuantitativas de las sociedades humanas. Las matemáticas servirían a la sociedad de forma elocuente a través de la elaboración de las estadísticas. Las estadísticas serían así los números de los estados.

La enseñanza no fue nunca la actividad favorita ni principal de Laplace, por mucho que fuera inspirador de los planes de estudio y de los programas de matemáticas de las *Écoles*. Más bien lo encontramos dedicado a organizar otras instituciones del año 1795, concretamente el *Institut de France* y el ya citado *Bureau de Longitudes* creadas por la Convención *thermidorienne*. La primera sustituyó y replicó la antigua Academia y la segunda amparó y modificó el antiguo Observatorio de París. Dos instituciones republicanas para hacer renacer e impulsar las ciencias que se llevaban cultivando en Francia desde Luis XIV. Todo hecho con un nuevo espíritu revolucionario y ciudadano ya que el *Institut* recibió la misión de reunir todos los descubrimientos, y perfeccionar las artes y las ciencias. Los antiguos *savants* vasallos de la corona se transformaron en ciudadanos. Las ciencias adquirieron también una nueva ciudadanía. Laplace, y su amigo Lagrange, se convirtieron así en titulares de la primera clase de ciencias físicas y matemáticas del *Institut*. El estado seguía financiando la institución y los científicos se transformaron en funcionarios; el presupuesto de la nación continuaba proporcionando los medios para la publicación de sus trabajos.

Laplace encontró en esta institución el medio natural desde donde ejercer su influencia. Uno de los portavoces de la institución ante el cuerpo legislativo, comenzó a difundir sus ideas de política científica, los *savants* debían ser la clave de la renovación moral y educadora de la República. En múltiples intervenciones sostuvo que nunca Francia podía encontrar unos funcionarios más sensibles para entender cuales son los problemas de la sociedad, ni un colectivo mejor dispuesto para resolverlos.

¹⁶ P.-S. Laplace (1985), *Ensayo filosófico sobre las probabilidades*, Introducción y notas a cargo de Pilar Castrillo. Alianza Editorial, Madrid.

Laplace había aprendido mucha matemática de Lagrange, pero también había sabido entender la importancia de la organización científica de la mano de Lavoisier con quien colaboró y mantuvo una cierta amistad, aunque no tuvieran aparentemente intereses comunes. El prestigio que adquirió Laplace con la publicación de la *Mécanique celeste* a partir de 1799 fue enorme y su influencia sobre Napoleón bastante extraordinaria¹⁷. Su poder se manifestó en la política científica, y se proyectó en la producción de conocimiento dentro de lo que se ha venido a llamar *física laplaciana*.

El programa de la física laplaciana se resume así: la física general debe poseer para los fenómenos terrestres la misma perfección matemática que la mecánica celeste ostenta para los fenómenos planetarios y para el sistema del mundo. Los sabios deben trabajar para ello, deben esforzarse no solo en matematizar las leyes que rigen los fenómenos sino deducirlas a partir de las interacciones de la fuerzas que tienen lugar entre las partes más elementales de la materia inanimada. Las leyes del mundo visible, las leyes de la física que se establecen por experimentación y medida en un gabinete de física, deben poderse deducir de forma matemática. Fenomenología y matemáticas deberían caminar unidas en una estrecha alianza para dotar a la física de una coherencia similar a la mecánica. Para ello es necesario proveerla de un conjunto no descabellado de hipótesis sobre los fluidos imponderables, agentes que en la física de la época se consideraban causantes de los fenómenos del calor, de la electricidad, del magnetismo. Fluidos sin peso pero con los que se daba razón de las variaciones térmicas, cambios de estado de los cuerpos, interacciones eléctricas, etc. Las diferentes formas de calórico habían jugado un gran papel en la teoría del calor que procedía de Black, los fluidos eléctricos y magnéticos estaban en el centro de la controversia acerca de la naturaleza de la electricidad y el magnetismo, y Laplace entendió que eran sustancias que se podían tratar como la materia ponderable. Los fluidos imponderables podrían estar así compuestos de partículas, al modo de los átomos que formaban la materia gravitacional en la representación newtoniana, y entre esas partículas deberían actuar fuerzas de diferente rango, unas atractivas y otras repulsivas. Ellas serían las responsables de la expansión de un gas por efecto del calentamiento, de las

¹⁷ J. Heilbron (1993), "Weighing imponderables and other quantitative science around 1800", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 24, p. 152.

acciones de atracción y repulsión eléctrica y magnética. Incluso la luz, ya representada en la tradición newtoniana como un haz de corpúsculos, podría tener una estructura más sofisticada que diera cuenta de fenómenos nuevos descubiertos a principios de la centuria, como el de la polarización. La luz podría estar compuesta por moléculas polares que se alinearían al atravesar determinadas sustancias. Si se representaba matemáticamente el fenómeno molecular de una forma correcta, la marcha del análisis permitiría integrar el proceso hasta formular una ley que debía corresponder a la ley experimental que se obtenía en los gabinetes del física, en los primeros laboratorios de esta ciencia. Las leyes de los gases, desde la de Boyle y Mariotte, a las de la polarización de la luz descubiertas por el joven francés Etienne Malus tendrían un fundamento análogo a las que rigen los cuerpos celestes. El rigor de la ciencia de los cielos regiría en el mundo terrestre y se instauraría una unidad metodológica en las ciencias que explican los diferentes aspectos del mundo¹⁸.

Ese proyecto científico se conoce como física laplaciana y se desarrolló durante el imperio napoleónico. Para realizarlo, Laplace contó con un nutrido grupo de colaboradores. Muchos de ellos eran ingenieros de la *École polytechnique*, formados en una sólida matemática, interesados en las ciencias con el entusiasmo que Biot manifiesta en la cita anterior. Laplace aprovechó su interés, y ellos pusieron a su servicio su pasión creyendo que era una tarea coherente con la ideología política de la institución que los había formado. Ese sistema de realimentación entre el *Institut*, donde Laplace fue durante una década el científico más influyente, y *l'École polytechnique* favoreció una estrecha relación entre ingeniería y práctica científica. El programa laplaciano se benefició, sin duda, de la juventud emergente, y la ingeniería derivó hacia patrones tan relacionados con las prácticas científicas que con el paso del tiempo se consideró la necesidad de fundar otras escuelas que fueran más fieles a la idea original de Fourcroy, más cercanas a la industria. A pesar de ello *l'École polytechnique* siguió siendo un lugar de excepción en la formación de ingenieros. Si se sigue el rastro correctamente muchas ciencias, y no pocas filosofías, nacen en un *polytechnicien*. Sadi Carnot y Auguste Comte no son una excepción. El estudio de ese tipo de ingeniería nacida del gran experimento político francés puede ayudarnos a entender nuestra relación con la acción científica.

¹⁸ R. Fox (1974), "The rise and fall of Laplacian physics", *Historical Studies in the Physical Sciences*, 4, pp. 92 y ss.

DISEÑO POR ERROR

Enrique Cerdá Olmedo
Universidad de Sevilla

Mis opiniones sobre Ingeniería no deben ser muy fiables, porque he sido autor de un solo proyecto de ingeniería, el que me dio el título, proyecto que nunca fue sometido a la prueba de la realidad. Puede que tampoco sean muy fiables mis opiniones sobre Biología, que ha sido el tema que más ha atraído mi curiosidad. *Caveat emptor*, y sigamos.

Los seres vivos, como todo el Universo, pueden ser tenidos por productos de un diseño racional, compás mediante, como en el emblema del Supremo Arquitecto, que seguramente se llama así porque cuando se popularizó en el siglo XVIII no se habían fundado todavía los Colegios de Ingenieros. No faltaron buenos observadores que, notando fallos en los seres vivos y en el Universo entero, pusieran en duda la racionalidad de su diseño, pero había que ser muy valiente para decirlo, y de todas maneras son poco viables las enmiendas a la totalidad que no van acompañadas por una propuesta alternativa.

Esa alternativa empezó a vislumbrarse hace siglo y medio y desde entonces el hilo conductor de la Biología es comprender cómo se diseñan los seres vivos, si es que se puede aplicar este verbo. En el camino de la ciencia que intenta comprender la historia de los seres vivos han quedado bien pavimentados muchos tramos y aun asentados sólidamente puentes y atajos inesperados, pero quedan muchos misterios por aclarar. Los que estamos enfrascados en comprender algunos detalles no vemos bien el conjunto.

En el inicio de cualquier ser vivo está su genoma, o sea, la información hereditaria, o sea, el Verbo. No se debe olvidar que, para poder hacer algo, un genoma tiene que estar en una célula y en un entorno apropiado y por tanto que los genomas no pueden entenderse aislados. El problema esencial del diseño de un ser vivo es, de todas formas, el diseño de su genoma, que incluye los genes necesarios para construir al ser vivo y para ejecutar todo género de acciones. Algunas de estas acciones dan lugar a productos externos más o menos asociados al ser vivo que los crea.

A riesgo de provocar un rechazo instantáneo, aventuraré la opinión de que muchos seres vivos producen obras externas a ellos mismos que deben ser tenidas por obras de ingeniería aunque no hayan sido creadas por el hombre. Se plantea así el problema de cómo diseñan obras de ingeniería seres vivos a los que no reconocemos la capacidad mental de anticipar el futuro que es característica de nuestros proyectos. Propondré que la evolución biológica diseña esas obras de la misma manera que diseña a los seres vivos que las producen: por errores aleatorios seguidos de selección.

Algunas obras de bioingeniería

Los productos de los seres vivos no son necesariamente el resultado de un proceso de diseño, dando a esta palabra contenidos de designio y planificación. Al menos no consigo apreciar indicios de diseño en muchos bioproductos abundantes, como el carbón, el petróleo y el gas, que son meros productos intermedios en el reciclado de cadáveres pretéritos, y las rocas calcáreas, que son restos modificados de las armaduras de otros seres vivos. Estos grandes depósitos no tienen utilidad alguna para los organismos que los crearon en eras geológicas pasadas.

Otra cosa habría que pensar de los arrecifes de coral, construidos durante centenares de millones de años por varios antozoos marinos, animales pequeños y de estructura sencilla. Estos arrecifes, cuyo volumen creo que supera todavía el conjunto de las obras humanas del planeta, no son meros acúmulos de materiales excretados, puesto que redundan en beneficio de las especies que los construyeron, a las que proporcionan ecosistemas extensos y favorables. Se puede sospechar que la evolución ha seleccionado los genomas de los antozoos cuyas excreciones calcáreas se depositan de manera que constituyan con el tiempo los lugares mejores posibles para la multiplicación de esos antozoos. El diseño del organismo y el diseño de su producto se harían a través del mismo mecanismo de diseño de genes.

Los bosques representan una situación aún más clara si tenemos en cuenta que un árbol es, en su mayor parte, una estructura muerta sobre la que vive el organismo que la va haciendo. No se puede negar el excelente diseño de los grandes árboles, que sobrepasan holgadamente la altura de nuestra Giralda y, al menos por ahora, su longevidad. Ese diseño está incluido en el de los genomas vegetales

correspondientes. La evolución por competición y selección gradual parece una buena explicación, porque la penumbra del sotobosque dificulta la fotosíntesis y por tanto confiere ventaja a las plantas que trepen a lugares iluminados.

Muchos hongos deben ser tenidos por ingenieros de minas. Partiendo del lugar de germinación de una espora unicelular, se extienden más o menos radialmente por el suelo o por materia orgánica. El protoplasma de esos hongos produce unos tubos de paredes gruesas en relación con su diámetro microscópico, y se traslada a lo largo de ellos. Los tubos pueden ser vistos como el entibado de una galería de mina, pero tienen funciones mucho más complejas en la interacción entre la materia viva del hongo y su ambiente. Algunas veces se alcanzan distancias de muchos metros, como reflejan los “círculos de brujas”, en los que las setas dispuestas en circunferencia señalan la situación de la espora original en su centro. Cuando reciben las señales apropiadas los tubos forman setas y otras estructuras reproductivas que pueden ser muy vistosas y enormes en comparación con aquellos. Impresiona la estructura aérea del hongo *Phycomyces*, un cilindro de hasta 600 mm de altura, que con su anchura de sólo 0,1 mm debe tener algún campeonato de esbeltez. Más admirable resulta cuando se averigua que no se contenta con crecer verticalmente, sino que su dirección de crecimiento está determinada por la luz, estímulos químicos (olfato), estímulos mecánicos, brisas ligeras y aun la presencia de objetos próximos, cuya presencia detecta de forma todavía misteriosa.

Muchos seres vivos construyen estructuras claramente separadas de ellos, como nidos, panales, galerías, presas y termiteros. Al investigar su estructura se encuentran optimizaciones impropias de la capacidad de cálculo que estamos dispuestos a reconocer a sus creadores, como es particularmente patente en el caso de los insectos. Los termiteros son más grandes que los mayores rascacielos, medidos, como es razonable, en relación al tamaño de sus constructores respectivos. Una gran parte de la estructura de los termiteros parece servir solo para acondicionar el ambiente interior en cuanto a ventilación, temperatura y composición del aire. Otra parte contiene una instalación agroindustrial muy avanzada que explota hongos especialmente adaptados a la alimentación de las termitas. Tenemos que suponer que esas construcciones están programadas en los genomas de los insectos en forma que sería apasionante descifrar.

Ningún ser vivo tiene una conducta rígidamente determinada. Todos somos capaces de acciones alternativas, según sean las circunstancias externas del

momento. Esta capacidad sensorial puede ser relativamente sencilla, como, por ejemplo, cuando la estructura de una proteína o su actividad enzimática depende de la temperatura, de la acidez o de la presencia en el medio de un compuesto químico predeterminado. No hacen falta muchos genes para dar unas respuestas aparentemente complejas y refinadas. Las del hongo *Phycomyces*, antes citado, asombran por su sensibilidad (por ejemplo, detecta el flujo luminoso que nos llega de una sola estrella en una noche oscura) y sus enormes intervalos dinámicos (se desorienta cuando recibe un flujo luminoso diez mil millones de veces mayor que el umbral de detección). No menos admirable es su capacidad de integrar en una respuesta adaptativa (conveniente para la difusión de las esporas) señales contradictorias procedentes de media docena de detectores sensoriales distintos. El análisis genético de estas conductas ha detectado solo una decena de genes y seguramente el número de genes dedicados especialmente a ellas no es mucho mayor.

Nuestro concepto de diseño tiene poco que ver con estos ejemplos, puesto que se basa en la capacidad de nuestro cerebro para imaginar lo nunca visto y lo nunca ocurrido y para anticipar las consecuencias de series de acciones. Esa capacidad no es exclusiva nuestra, pero seguramente la tenemos mucho más desarrollada que cualquier otra especie y es la clave de la transformación profunda a que estamos sometiendo al planeta entero en un tiempo brevísimo para la Geología y aun para la Historia.

El error como motor de la evolución

Imaginemos a Darwin meditando su teoría de la evolución mientras masticaba los panecillos del desayuno. Los panecillos, como casi todo lo que comía Darwin o comemos nosotros, son el resultado de la aplicación, poco o nada consciente, de la teoría de la evolución por millones de personas durante cerca de diez mil años. Uno de los resultados fue el trigo. La diversidad de los seres vivos, incluso dentro de la misma especie, la transmisión de rasgos de unas generaciones a otras y la eficacia de la selección de muchos rasgos deseables se conocían mucho antes de que Darwin formulara sus pensamientos en el siglo XIX. Su aplicación más o menos consciente dio lugar a la agricultura y a la ganadería y permitió el desarrollo cultural que está cambiando la faz de nuestro planeta.

Un aspecto esencial, el origen de la diversidad, solo empezó a entenderse a principios del siglo XX, cuando se averiguó que los caracteres que transmiten los seres vivos a sus descendientes pueden sufrir cambios inesperados (mutaciones). Estos cambios resultaron obvios a mediados del mismo siglo, cuando se demostró que todos los seres vivos contienen y transmiten a sus descendientes un texto escrito con un sencillo alfabeto de cuatro letras (los nucleótidos de los ácidos nucleicos). Ningún texto puede mantenerse absolutamente constante. Por una parte, es inevitable que sufra errores cuando se copia. Por otra, las radiaciones ultravioleta y otras de energía aún mayor y muchos compuestos químicos, naturales o artificiales, alteran los ácidos nucleicos y hacen su información difícil o imposible de leer y ejecutar.

Los errores son frecuentísimos en algunos virus, como el de la gripe, cuya información está en forma de ácido ribonucleico (ARN) de copia tan imperfecta que el texto copiado difiere de su modelo en aproximadamente una letra de cada mil. Todas las células, desde las bacterias a las nuestras, tienen su información genética en forma de ácido desorribonucleico (ADN) bicatenario, que es mucho más estable. De una generación celular a otra sufre un error cada millón a mil millones de letras de texto original. La tasa de error es el resultado de varios sumandos. Por un lado están los errores cometidos por las enzimas, llamadas polimerasas del ADN, que sintetizan las copias; para rebajar la tasa de error, muchas de esas polimerasas tienen acoplados mecanismos de corrección de errores recién cometidos. Por otro lado están los errores cometidos al reparar los daños causados por agentes externos, algunos de los cuales, como la radiación cósmica, son completamente inevitables, y otros, como la ultravioleta y muchos productos químicos, más o menos frecuentes en la vida real. Las reparaciones son en general más defectuosas que la copia normal, sobre todo cuando los daños son graves y abundantes. No debe extrañarnos, porque nuestras obras nuevas suelen ser más perfectas que las reparadas, sobre todo en caso de apuro grave. La redundancia de la información es muy útil para su estabilidad: las dos cadenas del ADN bicatenario son complementarias, es decir, dada la secuencia de nucleótidos de una queda definida la otra. En todo caso, las mutaciones son inevitables, porque no hay copista perfecto, ni restaurador que acierte siempre con el contenido original de un texto dañado.

Las mutaciones se heredan de padres a hijos y se acumulan con el tiempo, a menos que se eliminen por selección. La selección es más rápida cuanto más

daño causen las mutaciones a la capacidad de sus portadores de producir prole viable. Mientras se mantienen, constituyen el lastre genético de la población, el conjunto de defectos hereditarios de los que no se libra ninguna especie y que, más o menos, afectan a todos los individuos. Algunas mutaciones pueden ser desventajosas en un momento y ventajosas, y aun necesarias, en otro, según sean las circunstancias. Si la evolución de una especie seleccionara mecanismos de copia y reparación cada vez más perfectos, sus poblaciones serían genéticamente más sanas, en el sentido de que tendrían menos lastre genético de individuos defectuosos. Al mismo tiempo dejarían de contener variantes evolutivas que podrían ser necesarias para asegurar la supervivencia de la especie a largo plazo. La perfección es oportunista y a la larga letal.

Un ejemplo particularmente claro del papel evolutivo de las mutaciones es el control de vuelo, un problema de aviónica que sigue ocupando a los ingenieros aeronáuticos. Las aves migratorias lo resuelven combinando en distintas proporciones información hereditaria y observación de la conducta de aves experimentadas. En muchas especies la información genética basta para emigrar a lugares distantes previamente desconocidos, como han demostrado P. Berthold, A. J. Helbig y otros. Las currucas *Sylvia atricapilla* criadas en cautividad desde su nacimiento en el valle del Rin se vuelven inquietas al final del verano y de septiembre a noviembre intentan salir volando hacia el suroeste. La dirección de vuelo y la duración de la inquietud migratoria está determinada genéticamente y junto con otras conductas heredadas, como la repugnancia a volar sobre el mar cuando no se ve la costa opuesta, bastan para llegar a la Península Ibérica y, si no se entretienen y siguen volando, a la cuenca del Senegal. Los pajarillos austríacos de la misma especie se empeñan en volar hacia el sureste en septiembre y octubre y hacia el sur en noviembre, con lo que llegan primero a Turquía y luego por Siria y Egipto a la cuenca alta del Nilo. Las direcciones de vuelo que se observan cuando se cruzan ambas poblaciones indican que el carácter tiene una base genética sencilla, posiblemente con predominio de la información contenida en un solo gen.

Algunas currucas alemanas tienen una información hereditaria que las hace emigrar al noroeste, es decir, a morir en el invierno británico. En las últimas décadas muchos de estos pajarillos sobreviven gracias a las bayas de plantas exóticas plantadas recientemente en los jardines y a la ayuda de personas compasivas; al verano siguiente vuelven a Alemania, donde llegan antes que sus

congéneres de España y África, por lo que se cruzan entre sí y mantienen la dirección de vuelo en sus descendientes. Se ha producido así una población de currucas especializadas en la migración a las Islas Británicas y se puede entender que el mismo mecanismo de error y selección permite adaptaciones a la topografía mundial y a los cambios climáticos.

Concluiremos que la fuente de la evolución es el error y que el diseño de los seres vivos, de su conducta y de sus obras externas es consecuencia del error. Ningún ingeniero propondrá imitar el procedimiento de diseño biológico: proyectar muchos artefactos sin pensar nada, construirlos todos y quedarse con el que resulte mejor. Nuestra evolución cultural es mucho más rápida que la evolución biológica precisamente porque somos capaces de crear modelos mentales y prever su comportamiento futuro. Rechazamos así muchas variantes posibles de nuestros proyectos sin tener que ensayarlas. Pero nuestros modelos y nuestra capacidad de previsión tienen limitaciones y fallos y los concedores de cualquier ingeniería aprecian el papel que en su evolución han jugado los diseños fracasados.

La evolución de los mecanismos de evolución

Los mecanismos de copia y reparación pueden variar de unos seres vivos a otros. Los nuestros se componen de más de 150 proteínas distintas, entre ellas al menos quince polimerasas del ADN con distintos grados de fidelidad. Incluso una bacteria relativamente sencilla, como *Escherichia coli*, tiene tres polimerasas del ADN distintas. Los genes que determinan la estructura de esas proteínas están sometidos a evolución por error y selección, como todos los demás genes. La presencia de variaciones explica, por ejemplo, que tomar el sol induzca más manchas de la piel en unos individuos que en otros.

Tenemos buenos indicios de que las tasas de mutación han sido ajustadas por la evolución. Las reparaciones más fiables se darían en organismos expuestos habitualmente a agentes externos que dañan el ADN, como una intensa radiación ultravioleta; de esta manera la eficacia de la reparación compensa el aumento de los daños. En las bacterias que se multiplican con mayor rapidez los ajustes evolutivos se pueden observar directamente y llevan a la conclusión de que las tasas de mutación aumentan cuando las poblaciones se enfrentan por un tiempo suficientemente largo a circunstancias externas hostiles.

Como las mutaciones son errores ciegos, al aumentar la tasa de mutación aumentan por igual el lastre genético (las mutaciones indeseables) y la velocidad de adaptación evolutiva a nuevas circunstancias (por mutaciones ventajosas en ellas). El lastre genético aumenta con el tamaño del genoma, porque, para una misma tasa de mutación, cuantos más genes haya más funciones génicas pueden resultar afectadas y más individuos sufrirían al menos algún defecto genético grave. Se esperaría, en compensación, que las tasas de mutación sean más bajas en los organismos con genomas grandes, pero esa compensación tiene un límite, porque se volvería más rara cualquier mutación concreta que hiciera falta para hacer frente a los cambios ambientales. Si aceptamos la estimación de que las sociedades humanas no podrían soportar una duplicación del lastre genético, se puede sospechar que tampoco soportarían un aumento del número total de genes. Los genomas no pueden crecer indefinidamente; la evolución biológica no puede sobrepasar cierto límite de complejidad de los organismos.

El tamaño efectivo del genoma, para esta consideración, no es el número total de sus nucleótidos, sino el de los que tienen funciones mantenidas por selección evolutiva. Se cree que muchos segmentos de los genomas de los mamíferos y de muchos otros animales y plantas no sirven para gran cosa y no contribuyen al tamaño efectivo del genoma. También importa la presencia de genes repetidos, idénticos o muy parecidos, que es frecuente en nuestro caso, porque la función perdida por mutación de un gen puede ser cubierta por otro que se le parezca. A veces se producen repeticiones completas del genoma y se obtienen organismos que tienen el doble de genes sin haber variado sustancialmente sus funciones. Entre las secuencias inútiles y las repetidas tal vez podamos explicar que las cebollas tienen un genoma seis veces mayor que el nuestro y las gallinas menos de la mitad y que haya organismos con genomas mucho mayores y mucho menores que estos.

La presunta limitación del tamaño efectivo de los genomas no afecta al aumento de complejidad por cooperación biológica entre organismos de la misma o de distintas especies; así, los animales no necesitamos los genes para la fotosíntesis y las plantas dispersan sus semillas sin necesidad de motorizarlas. Recientemente el mayor aumento de la complejidad en nuestro planeta se debe a la evolución cultural. Cualquier biblioteca que se precie contiene más información que el genoma humano.

Evolución somática

Las células somáticas de los animales, como las que forman nuestro cuerpo pero no tienen posibilidad de originar otros organismos, están libres de la servidumbre de tener que sufrir mutaciones para favorecer la evolución. Cabría esperar que sus equipos de copia y reparación sean perfectísimos, tan buenos por lo menos como los mejores que se conocen. Esta esperanza no se confirma en la realidad. Las tasas de mutación varían de unas células a otras y de unos genes a otros.

Unas tasas de mutación altísimas, comparables a las del virus de la gripe, nos permiten obtener en unas células especializadas muchísimas variantes de unos pocos genes responsables de la formación de anticuerpos. Al mismo tiempo se da una fuerte selección, porque las células que producen los anticuerpos más útiles proliferan más que las otras. El resultado es que nuestro mecanismo de defensa mejora muy deprisa y en unos pocos días se ajusta a nuevos enemigos, como pueden ser patógenos con los que antes no habíamos entrado en contacto. Los mecanismos de la evolución no solo funcionan durante la proliferación de los organismos, sino también durante la proliferación de sus células.

La evolución de las células de un organismo no siempre es ventajosa. Los tumores son originados por células mutantes que se multiplican cuando no deben e invaden otros lugares del cuerpo porque han sufrido mutaciones en los genes, llamados oncogenes, cuya función normal es acomodar esas conductas a los intereses del organismo entero. Los cánceres son por tanto enfermedades genéticas, aunque pocas veces sean hereditarias. Una mutación que haga ineficaces los equipos de replicación y reparación de una célula puede dar lugar a tasas de mutación muy altas en ella y sus descendientes dentro del organismo, con acumulación de muchos millares de cambios en la información genética. Nuestro compatriota Manuel Perucho descubrió esa situación de catástrofe genética en muchos tumores, que se originan porque algunas de las mutaciones acumuladas afectan a oncogenes.

A pesar de que los mamíferos tenemos muchos genes para replicación y reparación, sufrimos carencias llamativas; por ejemplo, carecemos de fotoliasas, presentes en casi todos los seres vivos. Las fotoliasas reparan muy eficazmente los daños producidos por la radiación ultravioleta; para ello reconocen los cambios químicos más frecuentes en ADN expuesto a la radiación y los corrigen usando directamente como fuente de energía la luz del sol. Este es un diseño admirable porque en la naturaleza ambas radiaciones siempre van juntas y porque la reparación

no consume energía metabólica, que puede ser muy escasa en las células en el momento del daño. Carecer de fotoliasas no afecta a nuestras células reproductoras, que están bien protegidas de la radiación ultravioleta, pero nos expone a cáncer de piel. No extraña que los primates, habitantes de regiones cálidas y luminosas, estén rodeados por capas renovables de piel y pelo cargadas de melanina, un excelente filtro antiultravioleta. Cuando el hombre colonizó las latitudes altas, más oscuras, tuvieron ventaja los mutantes “melanoinsuficientes”, nombre que algunos proponen para los que siempre nos hemos llamado “los blancos”. Se piensa que la ventaja es la síntesis de vitamina D, que puede ser insuficiente en la dieta, pero la podemos sintetizar nosotros mismos con ayuda de energía solar.

Es triste comprobar que la calidad de los mecanismos de replicación y reparación de los tejidos somáticos no es la que convendría a nuestra salud personal. Empeora además con la edad y es muy imperfecta cuando más falta haría, en la vejez. Sospechamos por tanto que esa situación es también consecuencia de un diseño evolutivo, que limita la vida de los individuos para renovar las poblaciones y dejar vía libre a la evolución biológica.

La longevidad es un rasgo evolutivo lábil, como se ve en la extremada variación en algunos grupos de organismos, como los mamíferos. Se ignoran las razones de esa labilidad, pero se sospecha que está determinada por los niveles de oxidación. Se encuentra, por ejemplo, una correlación llamativa entre la longevidad de las especies de mamíferos y la concentración en su sangre de carotenoides, unos antioxidantes naturales que no producimos, pero adquirimos en la dieta.

Cabe imaginar que en el futuro nuestro conocimiento de la biología y nuestra capacidad de manipular la información genética nos permita escapar a la evolución por error y selección. Disminuiríamos así el lastre causado por mutaciones heredadas y somáticas y estaríamos ojo avizor para introducir artificialmente los cambios convenientes conforme se hicieran necesarios. Esta visión no me parece repugnante porque yo no me reconozco en mi genoma, sino en mi cerebro.

DISEÑO Y REPRESENTACIÓN EN LA INGENIERÍA

Fernando Broncano

*Departamento de Humanidades
Universidad Carlos III de Madrid*

Javier Aracil me ha enseñado a lo largo de muchos años que una parte de la tarea de los ingenieros es simular la realidad, inventarse modelos de los que no cabe preguntarse si son buenas correspondencias con la realidad cuanto si funcionan o no como guías para la acción. El tema sobre el que versa mi presentación tiene que ver con otra de las facetas de la actividad ingenieril que también tiene una existencia paralela a la de la realidad, se trata de la actividad de diseñar objetos y artefactos que aún no existen y que tal vez nunca lleguen a existir. Es digno de notar esta característica de la práctica ingenieril de trabajar de un lado con un pie en la eficiencia y con otro en la imaginación. Como el dios Jano, la ingeniería presenta una doble cara de actividad instrumental y de actividad creadora. No siempre se piensa así la ingeniería, se tiende a contemplarla como una parte menor de la gran cultura, cuando no como lo opuesto a ella. No sería tan grave la situación si solamente se tratase de una opinión externa y si los propios ingenieros no hubiesen internalizado en algún sentido la idea de que su actividad se encuentra regida únicamente por las reglas de la racionalidad instrumental. La historiadora de la tecnología Rosalind Williams¹, que ha tenido la oportunidad de seguir muy de cerca la evolución de la enseñanza de la tecnología en una institución tan prestigiosa como el MIT, pues fue decana durante veinte años, se quejaba de la presión creciente en la edad de la información para suprimir todos los elementos no instrumentales de la educación de los ingenieros. Mi propuesta, y éste es en parte el tema de la conferencia, como un ejemplo aplicado, es que se tome en serio la idea de la ingeniería como una forma de cultura y que, como tal, se consideren sus aspectos humanísticos, conceptuales, de relación con la

¹ R. Williams (2000), "All that is Solid Melts into Air. Historians of Technology in the Information Revolution", *Technology and Culture* 41, 641-68.

sociedad, desde dentro, desde las propias dinámicas del trabajo de investigación, de los proyectos, desde el *pathos* y nos solo desde el *ethos* de la profesión de ingeniero. El caso que propondré es el concepto de diseño, uno de los centros que justifican la profesión de los ingenieros, en especial en lo que se refiere a una actividad creadora de artefactos, innovadora o, como se decía antes, inventora.

1. La naturaleza del diseño

El término “diseño” tuvo su momento de esplendor en la década de los ochenta del siglo pasado cuando las empresas descubrieron la importancia de la presentación del dibujo. Fueron los días en que se extendió el dicho “¿estudias o diseñas?”, que nos habla de aquella fiebre de elaborar las más peregrinas presentaciones de una copa o una silla con la sola condición de que resultasen lo más posible incómodas de usar y lo más posible extravagantes de figura. De manera que el diseño de los años ochenta hizo ricos a algunos empresarios de moda *prêt à porter* y fabricantes de bienes de consumo, pero contribuyó en poco a hacernos comprender la estructura y dinámica de los sistemas tecnológicos. El diseño se hizo tan visible que ocultó la importancia real del diseño.

El diccionario de la RAE de la Lengua estipula así su terminología y define así el término:

diseño: (Del it. *disegno*). m. Traza o delineación de un edificio o de una figura. // 2. Proyecto, plan. *Diseño urbanístico*. // 3. Concepción original de un objeto u obra destinados a la producción en serie. *Diseño gráfico, de modas, industrial*. // 4. Forma de cada uno de estos objetos. *El diseño de esta silla es de inspiración modernista*. // 5. Descripción o bosquejo verbal de algo. // Disposición de manchas, colores o dibujos que caracterizan exteriormente a diversos animales y plantas.

La definición recoge los varios aspectos (y no solo usos) del término, pero como suele ocurrir cuando hay un problema conceptual, lo hace de manera sesgada. En este caso parece estar sesgada precisamente hacia esas inclinaciones culturales a las que nos condujeron los excesos del postmodernismo que imperó en los alegres ochenta. Si, por el contrario hubiésemos elegido el Oxford Dictionary y buscásemos el término *design*, encontraríamos subrayados algunos aspectos diferentes, lo que nos hablaría de nuevo de las inferencias culturales y de uso en los diccionarios que se pretenden normativos. Así, en el diccionario inglés se recogen varios sentidos distintos:

boceto: (de productos, coches, máquinas). Donde se recogen algunas expresiones en las que se aplicaría el término como “el curso está mal diseñado”, “tiene algunos defectos de diseño”, “todavía está en un estadio de diseño”, “tecnología de diseño”

decoración, dibujo

modelo

disciplina (estudia diseño)

estilo, línea

plan (deliberadamente, “por designio”, “más por accidente que por designio”)

y así mismo, en la forma verbal, se recoge la posibilidad de diseñar: jardines, casas, pero también máquinas, ropa; y también planes y proyectos de acción.

Una apreciación con cierta dosis de maldad nos llevaría a pensar que los académicos españoles se han dejado llevar por un concepto “italiano” del diseño, mientras que los redactores del Oxford Dictionary tienen en cuenta más el uso habitual en ingeniería, que va más allá de los elementos envolventes del objeto para descender a los pasos que hacen posible el nacimiento del objeto artificial. No es casual que el término inglés *design* signifique a la vez dibujo y designio, pues nos habla de los dos componentes esenciales del diseño, que no quedan subrayados suficientemente en el diccionario español; a saber, el carácter de plan complejo y el medio representacional en el que se expresa este plan.

El punto de esta sutil discrepancia es fundamental para entender los avatares del concepto de diseño y la importancia que tiene en la formación de los ingenieros. La idea de diseño industrial tiene que ver con los mismos orígenes de la ingeniería. Comenzó siendo una idea ligada a la presentación de los productos pensando en su producción industrial. El diseño, en este sentido, parecía ser una actividad llevada a cabo *después* de haber concebido e incluso realizado los primeros prototipos de un nuevo artefacto. En las ciudades industriales inglesas nació como una reacción al modo de presentación barroco de los objetos: William Morris, Gottfried Semper², y otros pioneros fueron dando origen a uno de los principios por los que se guiaron los primeros movimientos de diseño, “la forma sigue a la función”. Buscaban guías o principios generales para la producción de objetos industriales, especialmente los que tenían un destino de bienes de consumo masivo, y en ese camino encontraron un medio reflexivo irreversible

² Una presentación correcta de la idea de diseño, de los momentos más importantes de su historia y métodos es Bernard E. Bürdek (1994), *Diseño. Historia, teoría y práctica del diseño industrial*, Barcelona, Gustavo Gili ed.

sobre la práctica investigadora del ingeniero creador, del inventor. Hoy el diseño industrial se ha ido convirtiendo en una disciplina y en un arte básico en nuestras sociedades industriales pero antes que nada fue una forma de pensar el propio trabajo. Para decirlo un tanto superficial y quizás injustamente, los diseñadores son o fueron algo así como los filósofos de la ingeniería, pues su actividad tenía que ver ante todo con el pensar y hacer objetos con una intención allende lo que en un lenguaje plano pudiéramos considerar como ingenios eficientes. Su investigación tenía que ver más con cómo son los objetos que funcionan que con el mismo hecho de funcionar. Al pensar en cómo deberían ser los objetos los diseñadores estaban realizando a la vez una doble operación: la creación de objetos, al menos la creación conceptual, y la reflexión sobre el mismo hecho de crear un nuevo objeto.

La idea de diseño hace referencia a una operación conceptual por la que un objeto o proceso nace, se hace realidad, pero se hace realidad primeramente en la mente del ingeniero antes de llegar al estadio de la producción física. En imágenes, en palabras o en símbolos de otra clase, el diseño es una compleja operación que tiene una peculiar existencia intencional. Como ejercicio intelectual, un diseño es un acto por el que algo, un objeto o proceso adquiere existencia intencional. Y esta extraña expresión de “existencia intencional” nos suena casi como un oximorón, una contradicción en los términos, pues parece que la existencia intencional lleva a los diseños al mismo campo de realidad que las brujas y los duendes. Sin embargo en esta aparente paradoja está el misterio y la profundidad humanística de la actividad ingenieril. Que un objeto nuevo llegue a la existencia sin ser pensado es un hecho de la naturaleza. Nosotros mismos, nuestro ser más biológico, lo más complejo que existe en el universo, llegamos a la existencia por efecto de un sistema de información-acción contenido en el ADN y en los órganos reproductores, pero en ninguna forma somos pensados antes de existir. Sin embargo, la más humilde de las bifaces del *homo habilis* fue pensada en su forma cuasi-simétrica antes de llegar a la realidad física. Y en segundo lugar, y lo más importante de todo, es que es el contenido de esa existencia intencional es lo que controla el proceso de realización físico. En este sentido pensamos el diseño de una manera amplia como algo que ha sido producido bajo el control de algo y de una manera estricta como la parte de un objeto que es representada antes de ser realizada y de la parte realizada que llega a ser precisamente porque fue pensada antes.

Las comparación de un ser vivo y un ser artificial nos lleva a directamente al corazón del problema del diseño. Un ser vivo es un sistema funcional, un conjunto ordenado de miembros interdependientes que están ahí porque hacen algo y precisamente porque hacen algo determinado están ahí: sus vasos transfieren los fluidos necesarios para el metabolismo, sus tejidos soportan el peso, la tensión o protegen el interior, sus células realizan los cientos de funciones básicas de transferencia de energía que llamamos vida, etc. No podríamos entender un ser vivo sin entender su “diseño” formal y funcional, su anatomía y fisiología. Esta estructura y funcionamiento nos cuenta una historia de selección y de transmisión de los rasgos heredada por la información genética que fue seleccionada en las distintas generaciones. En este sentido primario, un diseño es una forma de la complejidad de la naturaleza que repite patrones establemente a causa de que hay una división funcional del trabajo causal entre replicadores y vehículos de transmisión de la información, entre organismos y material genético que controla el desarrollo de un organismo. En un sentido secundario un diseño es una compleja especialización funcional que no contradice el sentido primario: ciertos sistemas de funciones (los artefactos) llegan a ser porque antes “funcionan” otros sistemas de funciones, los que asociamos con la actividad de pensar y concebir, que a su vez fueron producto de los sistemas de funciones que dieron origen a los tejidos cerebrales. Hofstadter llamó a este ascenso el eterno bucle de oro que lleva desde las hormigas al clavecín bien temperado de Bach. Los diseños son, en el sentido secundario que tendrá sentido en ingeniería, los objetos “diseñados₂” por sistemas que han sido “diseñados₁”.

Un caso fronterizo que merece la pena dilucidar con más cuidado del que se le dedica es el diseño producido por sistemas informáticos (no el sistema de diseño ayudado por el ordenador, CAD sino el auténtico sistema diseñado autónomamente por ordenador, lo que ya es el caso, por ejemplo, en el caso de microcircuitos extremadamente complejos para la mente humana) que han sido diseñados para diseñar³. Estos artefactos, el creador y el creado, son ellos

³ Nigel Cross, uno de los más conocidos autores sobre métodos de diseño ha planteado una pregunta derivada con la que Turing, hace ya cincuenta años, dio origen a la Inteligencia Artificial (¿puede pensar una máquina?): N. Cross (2001), “¿Can a Machine Design?”, *Design Issues* 17: 4, 44-52. Su respuesta es interesante pues refleja la misma perplejidad de Turing: depende de lo que entendamos por diseñar, aunque en general responde afirmativamente a la pregunta.

mismos artefactos y al tiempo nos remiten a la frontera lábil entre lo natural y lo artificial⁴. En un cierto sentido, son objetos ultraartificiales, el prototipo de todo lo artificial; en otro sentido, son ejemplificaciones de la creatividad de la naturaleza, de la morfogénesis controlada por biomorfos o por tecnomorfos. En estos sistemas también hay cierta forma de representación previa que controla el proceso de creación y la diferencia con la actividad humana de diseño radica no en que esté más allá o más acá de una supuesta frontera de lo natural y lo artificial sino en la manera especial en la que se produce esta existencia previa intencional o representacional que después controlará el proceso. En los seres vivos esta existencia es informacional, está repartida entre la molécula de ADN y los complejos de enzimas y ARN que hacen que la estructura genética se exprese en proteínas. En los actuales y futuros ordenadores diseñadores la existencia es también informacional, se reparte entre los operadores que generan una representación y los sistemas periféricos que trasladan esa representación a un modelo visible o real. En los seres humanos la existencia es además de informacional intencional: hay un complejo de operaciones mentales que tienen un componente especial, la deliberación y la voluntad expresa de llevar a cabo algo que hasta el momento no existía en el universo y que por el hecho de la actividad creadora y de la voluntad de llevarlo a cabo adquirirá existencia real. Este elemento que añade la creatividad humana tiene dos dimensiones, la de responsividad hacia las propias representaciones y la responsabilidad de las propias representaciones. En el primer aspecto los humanos se representan sus

⁴ Maximo Negrotti ha postulado recientemente tres condiciones para que un objeto sea considerado como artificial: la primera, afirma, que haya sido construido por humanos; la segunda, que haya sido inspirado por un objeto natural (o un órgano o función natural) y la tercera, que haya sido construido con otros materiales distintos a los del objeto natural (Maximo Negrotti (2001), "Designing the Artificial: An Interdisciplinary Study", *Design Issues* 17:2, 4-17). Negrotti está interesado en alejar la idea de diseño de lo que llama el "Síndrome de Prometeo", la convicción de que la tecnología consiste en inventar objetos para dominar a la naturaleza. Opone el "Síndrome de Ícaro" o la propuesta de considerar la tecnología como una invención de objetos que reproduce, repara o sustituye funciones o sistemas naturales. Se encuentra dentro de una línea que remite todo lo artificial a funciones naturales y, en particular, humanas. Aunque es interesante como propuesta para recuperar valores ecológicos en el diseño, me parece que no recoge buena parte de las trayectorias tecnológicas que inventan nuevas funciones alejadas de lo natural (viajar por el espacio, nanotecnologías, etc.) y no permite que haya creación de funciones genuina sin tener que caer en el Síndrome de Prometeo, pongamos por caso, para "mejorar" la naturaleza.

propias representaciones, establecen variaciones, ensayos, deliberaciones; en el segundo aspecto, los humanos se hacen cargo del hecho de que por su creación deliberativa algo nuevo existirá en el mundo.

Como ya puede sospechar el lector, estamos refiriendo la artificialidad a una característica específicamente humana, la capacidad, y la obligación asociada a ella, de hacernos cargo de nuestras acciones. La técnica está asociada a nuestro impulso para controlar las condiciones de la existencia mediante una naturaleza o medio hecha a nuestra medida. Los humanos se adaptan al medio adaptando el medio a sus deseos. Como sostenía Ortega, los humanos no tienen medio, tienen entorno. Se rodean de “grúas” y andamios para alcanzar más altura de la que sus medios biológicos les permitiría⁵. Ese impulso puede llevarse a cabo por nuestra capacidad para el diseño, para la representación de los cursos de acción, para la deliberación asociada a esa representación sobre el curso más deseable y, por último, para el ejercicio eficiente del plan previsto. Todas estas características hacen de los diseños ámbitos que tienen su normatividad propia que nace de las mismas condiciones de producción de los diseños. En la secuencia de operaciones mentales y de ensayos que conducen a la producción de un objeto, el momento esencial es aquél en el que juzgamos que ese diseño en particular es la mejor solución al problema que pretendíamos resolver mediante ese diseño. Pues bien, ese juicio, que es siempre un juicio de valor, es el que crea responsabilidad sobre el producto que llegará a la existencia por medio del diseño. Ese juicio convierte al ingeniero en responsable de su entorno: gracias a su intervención, el entorno humano cambia e introduce una variante, por mínima que sea, en todas las trayectorias futuras. Para decirlo un poco enfáticamente pero con toda la conciencia de su significado, la acción del ingeniero cambia la historia y lo hace en el sentido más profundo posible, cambiando las condiciones de la existencia.

⁵ La idea de que la cultura está constituida por “grúas” y andamios ha sido popularizada por D. Dennett (1995) *Darwin's Dangerous Idea*, Nueva Cork, Penguin. Fue anticipada mucho antes por Vigotsky, para quien la cultura constituía un “entorno próximo” que permitía a las personas alcanzar la realización de acciones que por sí mismas hubieran sido incapaces de llegar a realizar. Una grúa, en este sentido biológico es una intervención en el medio que permite transformaciones mucho más profundas. La más importante de todas las grúas o andamios fue el lenguaje, después las matemáticas, la escritura, etc.

Precisamente por esa responsabilidad asumida es más que necesario tener presente en el juicio que conduce la producción de un artefacto las condiciones de su legitimidad, hacer presente que los diseños son mejores o peores, en definitiva, a reflexionar sobre las condiciones por las que este juicio del “hágase” tan prometeico son condiciones de legitimidad. Es cierto que los filósofos sienten a menudo la tentación platónica del filósofo rey, de andar por ahí diciéndole a todo el mundo cómo deben hacerse las cosas, y es cierto también que casi nunca nadie les pide cuentas por esa moralina con la que impregnan todo, pero también es cierto que en una cierta división social del trabajo, al filósofo le toca la responsabilidad de recordar que nuestros juicios crean responsabilidad, y que por ello debemos atenernos a las condiciones de legitimidad que hacen que los juicios sean sabios y adecuados. Del mismo modo, no es menos urgente recordarle sea al ingeniero o al filósofo que las condiciones de legitimidad deben referirse en primer lugar al modo en el que se produce este juicio sobre el que descansa la responsabilidad y que antes de imponer con toda rapidez algún código de valores hay que reflexionar con cuidado sobre estas formas de construcción del juicio técnico. Pues se bascula entre una tendencia a quitarse la responsabilidad de encima de formas contrapuestas, unas veces aludiendo a una supuesta necesidad técnica, que determina cualquier decisión alternativa y otras imponiendo una no menos supuesta obligación moral que no atiende tampoco a las posibilidades y cursos de acción técnica alternativas. De ahí que sea tan relevante volver una y otra vez sobre la naturaleza del diseño. No porque vayamos con ello a aprender a diseñar mejor, sino porque de este modo aprendemos algo sobre qué es lo que hacemos cuando diseñamos y sobre cómo se producen nuestros juicios sobre un curso de acción posible.

Un diseño, para decirlo rápidamente, es una *respuesta novedosa y eficiente a un problema práctico*. Estas tres condiciones componen sendas dimensiones del juicio técnico. A saber: presuponen un problema práctico y postulan la eficiencia y la novedad en la solución a ese problema. Nada hay de trivial en estas tres características: ni en lo que sea un problema práctico, ni en la novedad, ni en la eficiencia. Las tres características son borrosas, esencialmente borrosas, y sin embargo son condiciones imprescindibles en la formulación de un juicio técnico. La categoría de problema, en primer lugar, hace referencia a la visión de futuros alternativos posibles. Cuando un curso de acción está determinado por la

armadura causal del devenir no hay problema, el único problema si acaso es el de conocer lo que nos espera y aceptarlo. Los problemas nacen cuando sabemos que las cosas podrían ser o haber sido de otro modo distinto a lo que son o han sido, cuando contemplamos situaciones o mundos posibles alternativos y decidimos cambiar el curso de las cosas para que uno de esos futuros posibles se haga realidad. La categoría de problema práctico cala en lo más profundo de nuestra naturaleza. Los animales no reflexivos no tienen problemas sino reacciones. La idea de problema solamente tiene sentido por la activación de un espacio de posibilidades alternativas que se conjeturan accesibles desde la situación actual.

Un problema puede existir previamente a la consideración o puede haber sido descubierto en el proceso de deliberación que conduce al diseño. La gran mayoría de la investigación tecnológica consiste en buena medida en descubrir problemas, en observar las cosas de un modo diferente de tal modo que se descubre una posibilidad alternativa. En esto reside en buena medida la creatividad de la técnica, en descubrir que las cosas podrían ser de otro modo y plantear un problema. La noción de problema considerada de esta forma nos muestra cuán radicalmente equivocadas están las consideraciones meramente instrumentalistas de la técnica, como si fuera posible pensar en medios sin haber pensado antes en fines alternativos. Al ser planteado un problema se activa una nueva forma de deliberación que se representa las propias capacidades: ¿podremos resolverlo?, ¿tenemos los medios suficientes, las habilidades, el conocimiento disponible? Los problemas así pasan a formar parte del imaginario de la sociedad en un nivel que configura nuestra representación del tiempo. Observadas en términos estadísticos, las sociedades con muy bajas capacidades ingenieriles son sociedades muy acomodaticias con su propia situación y muy deterministas respecto a sus alternativas. Pues la fuente del deseo está situada allí donde se comienzan a entrever posibilidades distintas.

La segunda dimensión del diseño es la elaboración de una solución novedosa. La idea de novedad, como la de problema, es esencial al pensamiento técnico. Donde no hay novedad solamente hay repetición. Curiosamente, la tecnología tiende a pensarse desde ámbitos culturales ajenos como un campo dominado por el tedio y la repetición, cuando es precisamente lo contrario. El ingeniero o ingeniodor es el sucesor del personaje astuto lleno de trucos y recursos que era capaz de suministrar a los ejércitos una salida allí donde el

común de los guerreros era incapaz de encontrarla con el recurso de su propia fuerza. El ingenizador articulaba caminos allí donde no existía, máquinas allí donde la fuerza humana no alcanzaba, señuelos allí donde la apariencia era más importante que la realidad, refugios allí donde la naturaleza no ofrecía amparo, y potencia donde las fuerzas escaseaban. La novedad se le exige al ingeniero como el valor al guerrero. Los recursos que ya conocemos, las técnicas que ya empleamos, los artefactos que constituyen nuestro entorno habitual no crean problemas, los han resuelto ya y por eso están ahí. Cuando nos planteamos un problema es porque consideramos que el curso futuro de acontecimientos necesita un giro, una variación que solamente puede ser inducida por la presencia de un artefacto o recurso nuevo. A veces formamos ingenieros como repetidores y como administradores de lo que ya existe. Las empresas y administraciones de las sociedades que se conforman con copiar demandan administradores de técnicas, conservadores de los recursos existentes, sin considerar que al hacerlo están cercenando la capacidad para plantearse problemas, lo más grave y, secundariamente, la capacidad para buscar soluciones novedosas a los problemas.

Al especificar que un diseño es una representación novedosa de un objeto que llegará a la existencia a causa de que esta representación avocamos una perplejidad, la que nos suscita la noción de lo nuevo. Un nuevo modelo de automóvil es un objeto nuevo en un sentido muy distinto al de los primeros aeroplanos cuyo centenario estamos ahora celebrando, o un nuevo modelo de ordenador con respecto al primer computador digital, etc. Aunque no es el momento de explorar esta categoría tan interesante metafísicamente, la de la novedad, sí cabe decir que la novedad absoluta es casi imposible, y que lo que realmente diseñamos son aspectos de los artefactos: nuevas funciones, nuevos materiales, nuevas formas, etc. Ciertamente, el diseño de funciones nuevas es siempre mucho más novedoso que el de formas y éstas que el de materiales, pero solamente en una primera aproximación que nos sirve como aclaración de la noción de diseño.

La tercera condición del juicio que hacemos al decidir un diseño es la eficiencia. La idea de eficiencia nos acerca a la idea de prudencia, como la de novedad a la de astucia. Una solución es eficiente si es la adecuada, si recluta los medios más adecuados para resolver el problema sin crear otros problemas, es decir, si induce una trayectoria histórica sin modificar todas las adyacentes, para expresarlo en los términos de temporalidad y posibilidad que estamos empleando para caracterizar los diseños. La eficiencia ideal es la de aquél recurso que resuelve

un problema y sólo un problema y no genera ningún otro. Por el contrario tendemos a pensar las técnicas bajo las categorías económicas del menor gasto para el mayor beneficio, cuando la idea de gasto y beneficio solamente tienen sentido en una consideración externa de lo ingenieril. La idea de prudencia que adjuntamos a la de eficiencia tiene que ver mucho con el componente esencial de la acción técnica que es el control de las posibilidades. Una solución prudente, extremadamente prudente, es la que controla al máximo las posibilidades de las que nos hacemos directamente responsables: en la situación ideal, un diseño es eficiente si tiene éxito en permitir todas y solamente las posibilidades contempladas en el diseño.

Es el momento de resumir la introducción a la noción de diseño:

Hemos remitido la noción de diseño a la idea de capacidad de controlar nuestras transformaciones del medio a través de una representación previa del producto. Hemos señalado que esta es la forma específicamente humana de relacionarse con el medio, transformándolo en un entorno que constituye entonces el ámbito de nuestra supervivencia. Los artefactos, lo artificial, no sería pues otra cosa que la parte del mundo que ha sido diseñada y que existe porque ha sido diseñada. Hemos definido los diseños respecto a tres características constitutivas que crean cierto grado de responsabilidad y de obligación: la de problema práctico, la de solución novedosa y la de solución eficiente. Como resumen diría que esa es la esencia de la técnica del ingeniero y establece lo que es su actividad principal: deliberar sobre problemas, conjeturar soluciones novedosas, asegurarse de que son eficientes.

2. La heterogénea identidad de los diseños

Los diseños son, pues, la explicación de cómo llegan a la existencia los artefactos que son los productos de la acción técnica, sus resultados. Si un diseño tiene una existencia “abstracta” parecida a la forma de existencia que tiene un programa de ordenador, los artefactos, por su parte, existen en varios niveles de descripción ontológica. Comencemos por la distinción entre ejemplares y muestras. Si en algún dominio tiene sentido la distinción entre muestras y tipos es precisamente en los artefactos. Un bolígrafo “Bic Cristal” es una muestra del tipo “Bic Cristal” como el sonido bilabial “b” es una muestra del fonema consonante “b” o una letra escrita “b” lo es de la letra “b” del alfabeto español. La distinción entre tipos y ejemplares es importante en la historia del diseño, una

disciplina en la que se examinan las trayectorias de innovación a lo largo de la historia y que debería ser considerada como uno de los instrumentos de reflexión cultural más importantes, lo que no es el caso quizás por el rechazo cultista a todo lo artificial. Los catálogos de la producción industrial, documentos invaluable y desvalorizados de nuestra cultura, nos muestran claramente las categorías de artefactos fabricados en serie que se basan en la distinción entre tipo y muestra sin la que no se comprende la revolución industrial. Pues bien, lo que hace que dos artefactos sean muestras del mismo tipo es que tienen el mismo diseño o que han sido producidos siguiendo el mismo plan. El diseño, pues, es también la operación que nos permite investigar las categorías de nuestra cultura⁶.

Quizás aclare la identidad de los diseños la compleja estructura sobre la que se extiende. En primer lugar debemos reparar en la *composicionalidad* del artefacto o complejidad estructural del artefacto. Los artefactos están formados por partes heterogéneas que tienen formas específicas para cumplir funciones distintas y suelen también estar hechos de materiales adaptados para esas funciones. Es una característica suficiente para considerar un útil como producto humano: entre los animales, muchos de ellos capaces de fabricar instrumentos, no encontramos útiles de complejidad estructural o que hayan sido producto de otros útiles. Los chimpancés del Gombe fabrican pequeños bastoncillos que introducen en los termiteros, y hay que señalar que la técnica de conseguir termitas con esos bastoncillos no es sencilla, pero los chimpancés no parecen haber sido capaces de crear objetos que exijan cierto grado de composicionalidad: ni pueden crear ningún artefacto para cuya fabricación sea necesario fabricar antes otro artefacto o útil, ni artefactos, como es un arco, que necesite partes funcionalmente diferenciadas: el arco tensor, la cuerda, la flecha, la punta, el estabilizador de plumas, etc. Un artefacto, así, es un sistema producido mediante una forma de intencionalidad instrumental de orden superior que ajusta las partes. En esto

⁶ Notemos sin embargo que la identidad de los diseños es una noción sutil que no siempre es tan clara como en la producción en serie. El que los diseños sean públicos precisamente tiene como consecuencia que en ocasiones la identidad de un diseño sea sometida a discusión jurídica, como ocurre en los casos de los casos de patentes. Las fronteras que determinan que dos diseños son el mismo son más bien borrosas y dependen de los factores que consideremos relevantes. Mientras que dos automóviles de la misma marca y modelo pero de distinto color podemos considerarlos muestras del mismo diseño, el color puede ser determinante en otros diseños como el elemento relevante de la distinción (por ejemplo, en un sistema de señales de banderas en navegación).

consiste el diseño, en la capacidad de construir mediante la composicionalidad de las representaciones, planes parciales que se articulan para conseguir un plan global que da origen a un objeto articulado.

Estos planes parciales se mueven en niveles distintos de jerarquía ontológica. Así, los artefactos son objetos en los que podemos distinguir claramente tres niveles de diseño: el material del que están hechos, la forma que adoptan y las funciones que cumplen.

2.1. Materiales para los objetos artificiales

Una interesantísima característica de la técnica es la capacidad para encontrar materiales cuyas propiedades físicas sean explotadas para los propósitos de la técnica. En buena medida la historia de la técnica y después de la tecnología es una historia de la búsqueda, explotación y más tarde del diseño de materiales. Las rocas, arcillas, fibras vegetales, madera, cuero, hueso, metales como el cobre, estaño, hierro, fueron los materiales primigenios que durante milenios compusieron las estructuras y elementos funcionales de los artefactos. Las más importantes revoluciones técnicas fueron producidas por la capacidad para usar nuevos materiales. Es lo que ocurrió con la arcilla, más tarde los metales y, dentro de ellos, especialmente el hierro, que ofrecía enormes dificultades de manipulación. La revolución inducida por los ingenios de vapor tuvo que esperar a las capacidades de manipulación del hierro para construir continentes que soportaran las enormes presiones necesarias para el uso eficiente de la energía. La historia de la técnica es en buena medida una historia de búsqueda de materiales. Recientemente se han comenzado también a diseñar los propios materiales, es decir a producir materiales aprovechando inteligentemente diferentes propiedades físicas. Las revoluciones industriales más recientes tienen que ver con el diseño de materiales nuevos compuestos como el hormigón armado y el pretensado, la fibra de carbono, los materiales compuestos de resinas y cerámicas, o el material más influyente en la configuración de la tecnología contemporánea, la pasta de sílice dopada que se emplea en los microcircuitos⁷.

⁷ José Fernández Sáez, profesor del Departamento de Medios Continuos y Estructuras de la Escuela Técnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, me ha sido de sustanciosa ayuda en la clarificación de las nociones sobre materiales.

Aunque los paleontólogos y antropólogos son muy conscientes de ello, no se repara suficientemente en la complejidad que exige la búsqueda y explotación inteligente de materiales. Mientras que las especies que elaboran técnicas como son los chimpancés explotan los materiales que ofrece su territorio, las culturas líticas del *homo habilis* y especies más tardías explotan conocimientos sofisticados del territorio, localizaciones, mapas mentales y formas de organización social suficientes para sostener la tarea de búsqueda de materiales. Hay una sensible relación entre la complejidad social y la explotación de materiales. Se ha afirmado que el Neolítico, fase en la que se domestican las especies animales y vegetales, acabó con las sociedades cooperativas primitivas, pero no fue tanto la explotación doméstica agrícola y ganadera cuanto las exigencias de obtención de materiales necesarios para sostener estos complejos técnicos y artesanos. Solamente sociedades con una compleja estructura de orden y división del trabajo son capaces de explotar los minerales, arcillas y otros materiales empleados en el Neolítico y Calcolítico.

Por último, se ha argumentado también desde el campo posmoderno⁸ que la revolución microinformática ha conducido a una suerte de “inmateriales”: la distinción entre programa (software) y soporte microelectrónico (hardware) estaría más allá de la distinción entre materia, forma y función. Pero sólo es correcto en la medida en que señala uno de los elementos esenciales del diseño contemporáneo: las formas, las funciones y los materiales son muchísimo más interdependientes que en cualquier otro momento de la historia. Porque realmente los materiales para la microelectrónica son tan materiales como los materiales para la nanotecnología. En absoluto son inmateriales, son, por el contrario, ultramateriales: son sus propiedades físicas y químicas las que han sido diseñadas.

2.2. La forma del artefacto

La forma de los objetos es un dominio especialmente cercano al diseño. De hecho los manuales de diseño son esencialmente manuales de “dibujo” de formas de objetos que resuelven problemas específicos y la actividad de diseñar se iguala a la de dibujar la forma de los artefactos. La historia del diseño industrial reciente

⁸ J. F. Lyotard (1987), *La posmodernidad explicada a los niños*, Barcelona, GEDISA.

es en realidad la historia de las tensiones entre los defensores del funcionalismo y los defensores de un predominio de las formas sobre la función desnuda.

Mies van der Rohe, eje de la escuela de Berlín que configura en buena parte todo el diseño contemporáneo, escribe a comienzos de los años veinte:

“Los rascacielos revelan su osada configuración estructural durante la construcción. Sólo entonces parece impresionante la gigantesca trama de acero. Una vez colocadas las paredes exteriores, el sistema estructural, base de todo diseño artístico, queda oculto en un caos de formas triviales y carentes de significado...

En vez de tratar de resolver nuevos problemas con formas antiguas, debemos desarrollar las nuevas formas a partir de la naturaleza misma de los nuevos problemas” (en la revista *Frühlicht* de Bruno Taut, citado en Banham, R. (1985) p. 270⁹).

La noción de forma del diseño se configura en el siglo XX se desarrolla desde el pensamiento funcionalista, que supera el composicionalismo, el neoclasicismo y las formas de esteticismo heredadas del siglo anterior, cuando la máquina debe esconderse detrás de una forma estéticamente aceptable al sentido común.

“Rechazamos toda especulación estética, toda doctrina, todo formalismo [...] Rehusamos reconocer problemas de forma; reconocemos sólo problemas de construcción.

La forma no es el objetivo de nuestra labor, es sólo el resultado. Por sí misma, la forma no existe. La forma como objetivo es formalismo, y por eso la rechazamos.

Los templos griegos, las basílicas romanas y las catedrales medievales tienen importancia para nosotros como creaciones de toda una época, no como obras de arquitectos individuales,... Son expresiones puras de su tiempo. Su verdadero significado reside en que son símbolos de su época. La arquitectura es la voluntad de la época traducida en espacio.

Si descartamos toda concepción romántica, podemos reconocer las estructuras en piedra de los griegos, la construcción en ladrillo y hormigón de los romanos y las catedrales medievales como osadas realizaciones técnicas... Nuestros edificios utilitarios sólo podrán llegar a ser dignos del nombre de arquitectura si interpretan verdaderamente su época mediante una expresión funcional perfecta” (cit. en Banham, R. (1985) p. 175).

⁹ Reyner Banham (1985), *Teoría y diseño en la primera hora de la máquina*. Barcelona, Paidós, sobre la 2ª ed. inglesa del original de 1960. Se trata de una magnífica reivindicación del pensamiento funcionalista de comienzos del siglo XX.

Mies van der Rohe une los problemas de diseño, en el sentido artístico de dibujo y forma, a los problemas de diseño industrial, a la construcción de la estructura, la industrialización de los métodos. El funcionalismo de comienzos del siglo pasado configuró de manera determinante la forma de los artefactos. Quizás después ocurrieron muchas cosas que llevaron durante la época de la filosofía postmoderna a un desprecio del funcionalismo como filosofía de las formas, pero aún siguen siendo válidas estas palabras de Banham escritas en 1981 para la segunda edición inglesa de su trabajo sobre el funcionalismo:

“En los años cincuenta todos éramos revisionistas y hablábamos en son de mofa de nuestros mayores y superiores que todavía permanecían aferrados a ‘las fatigadas certezas de los años treinta’. Creíamos, apasionadamente, que el funcionalismo no bastaba, [...] Sin embargo, era evidente que su inadecuación radicaba para nosotros tanto en el hecho de que el funcionalismo como teoría hubiera impulsado a la arquitectura en el sentido de una mecanización irresponsable, sino en el hecho de que el funcionalismo, una vez llevado a la práctica, había fracasado al no alcanzar el punto al que el desarrollo de la tecnología podría haberle llevado, y consiguientemente, no conceder también a la arquitectura el poder de materializar las promesas de la Era de la Máquina” (Banham, R. (1985) p. 19)

La forma organiza en el espacio las relaciones causales que constituyen el diseño funcional. La forma es el modo en el que se conectan las propiedades de los materiales y las funciones adscritas a esos materiales, es el modo en el que los ingenieros crean, más sólo en la medida en que instauran nuevas relaciones causales, aquéllas que serán los soportes de las nuevas funciones, las que crearán los ámbitos de posibilidad que instauran los diseños.

En el extremo contrario, la tendencia postmoderna que dominó el diseño de artefactos de consumo desde los años ochenta insistió mucho más en los elementos simbólicos asociados a la forma, en el impacto estético del artefacto por encima de su dimensión funcional. Se comenzó a pensar en un artefacto como un objeto semiótico que portaba significados a través de la forma. Y una vez que se comenzó a entender los objetos y los espacios como nudos de signos también se comenzó a jugar con los puros signos con propósitos comunicativos, de sorpresa, de atracción puramente comercial. En cualquier caso, el impacto de las tendencias posmodernas de diseño convirtió esta actividad en el centro de la producción industrial masiva de finales del XX y probablemente sea parte ya de un movimiento irreversible. Ahora comenzamos a ver en las formas algo más

que efectos lineales de la función: adquieren significados que influyen sobre los usuarios de maneras sutiles pero no por ello menos poderosas y por ello nos conducen a una controversia que solamente puede resolverse caso a caso, la del peso relativo de las formas y las funciones.

2.3. *La función, el uso y la perspectiva del diseño*

Pese al debate posmoderno sobre la fuerza de las formas, siempre volvemos al núcleo funcional de los artefactos y al peso de su *identidad funcional*. Los artefactos son la función que cumplen. Las funciones constituyen la perspectiva bajo la que son contemplados los artefactos ante los que es necesaria la *ingeniería inversa*, la perspectiva del diseño sin la cual no podemos llegar a entender la existencia del artefacto. Si desconocemos la función, que es lo que nos ocurre con algunos objetos de culturas lejanas, o con objetos sofisticados que no pertenecen a nuestro círculo de utilidades accesibles, los artefactos son solamente amasijos de formas. Es aquí donde aparece en la no trivialidad de la ingeniería inversa. Los prehistoriadores son muy conscientes de la necesidad de una teoría de la función de los artefactos¹⁰. El antropólogo de las técnicas André Leroi-Gourham (1911-1986), en *El hombre y la materia* y en *El medio y la técnica*¹¹ se propuso construir una teoría sistemática de los artefactos basada en la relación entre el útil, la memoria y el gesto: los tres nos indican un sistema de interacciones que constituye el sistema funcional. Entre sus muchas investigaciones encontramos por ejemplo un interesantísimo estudio sistemático

¹⁰ Recientemente Manuel Calvo, un prehistoriador de las Islas Baleares, ha criticado con razón las inferencias funcionales en las que se han basado muchos estudios de los restos líticos prehistóricos. En ellos está almacenada nuestra información sustancial acerca de las culturas que nos precedieron, pero, como observa certeramente nuestro autor, la mayoría de estos métodos olvidan la autonomía de los niveles: una función puede realizarse en múltiples morfotipos, y un morfotipo puede realizar varias funciones a un tiempo. En ambos casos, los materiales con los que se pueden realizar los morfotipos para realizar funciones son o pueden serlo, a su vez, diversos, M. Calvo (2002), *Útiles líticos prehistóricos. Forma, función y uso*. Barcelona, Ariel.

¹¹ A. Leroi-Gourham (1988), *El hombre y la materia. Evolución y técnica I*, Madrid, Taurus (original: *Evolution et Techniques. T.1: L'Homme et la Matière*, París, Albin Michel, 1945/1973); A. Leroi-Gourham (1989), *El medio y la técnica. Evolución y técnica II*, Madrid, Taurus (original: *Evolution et Techniques. T.2: Milieu et Techniques*, París, Albin Michel, 1945/1973).

de las armas cortas, clasificadas respecto a las operaciones corporales básicas y respecto a los componentes estructurales del útil: el peso del astil o mango (PA), la longitud del astil (LA) y varias relaciones entre ellos como su peso relativo y la relación del peso relativo respecto a la longitud. Esta clasificación nos habla de por qué las formas elementales son seleccionadas en cada cultura: debemos estudiar sus hábitos, su gesto y su memoria.

La noción de función y de uso están entrelazadas en la práctica y es una fuente de problemas para la noción de diseño. La función, para la mayoría de los estudiosos¹², contiene un elemento intencional: función es el uso para el que se selecciona una forma. La función es algo normativo que aparece en la cabeza del diseñador como *solución a un problema*, que *produce un beneficio*, y en consecuencia es representado para formar parte del artefacto: su forma, sus componentes. El uso es, sin embargo, la instrumentación real que hace el usuario del artefacto. Los usos no siempre corresponden a las intenciones del diseñador.

De esta forma, tenemos dos fuentes de identidad para un artefacto. La primera, la más importante, está constituida por las funciones propias del artefacto y sus componentes, que a través del proceso de diseño configuran la forma y la elección de los materiales. El concepto de función contiene, por su parte, dos elementos: uno causal, la conducta que realiza un componente o todo el aparato, el otro, en el que estriba la normatividad de las funciones, histórico: explica por qué el componente forma parte del artefacto. Esta duplicidad del concepto de función se expresa diciendo que una función F de un X (bien un componente, bien un artefacto completo) es a) una conducta C que realiza X y b) que el que X realice C explica que X esté ahí. En la evolución biológica, el proceso de reproducción de los sistemas que contienen X a causa de que el que X haga C confiere una eficacia biológica relativa superior a los organismos que portan X, *explica* que X tenga como *función propia o adecuada* F. En la tecnología, el cerebro (o los cerebros) de los diseñadores sustituyen el largo proceso de variaciones al azar y reproducción a través de generaciones por el más corto proceso de la deliberación entre varias alternativas imaginadas y la selección de una de ellas. En lo que respecta a la génesis funcional el cerebro no es tan diferente de la evolución

¹² Véase la discusión en M. Calvo (2002), pp. 16 y sig.

biológica: una parte produce variaciones virtuales y otra parte elige las más prometedoras¹³.

Hay un elemento originario que da identidad a un artefacto: el momento en el que fue elegido el artefacto o componente, a causa de la conducta que realizaba y el beneficio que producía. Tanto en la selección como en la intención, se trata de un momento histórico que, relativamente a ciertas *condiciones normales*, establece la función. En el caso de la tecnología, la función puede representarse por un punto fijo en el espacio de posibilidades. Es la posibilidad elegida para ser realizada a través de la existencia del artefacto. Esta función y las condiciones normales de operación del artefacto se especifican habitualmente en el manual de instrucciones del artefacto. Corresponden a la

¹³ Queda fuera de la consideración de este trabajo una reciente línea de investigación de mayor interés. Se trata del *diseño evolucionario*. El diseño evolucionario aprovecha un método de computación, la programación evolucionaria para aplicarla al diseño de objetos. En la programación evolucionaria muchas variaciones de un programa se someten a evaluación y se reproducen aquéllas que son más acordes con una cierta intención de realización del programa. A través de otras técnicas, también nacidas en el contexto de ejemplificación evolucionaria de la computación, en particular las de la llamada *Vida Artificial*, podemos usar estas reproducciones para generar diversas versiones de artefactos que son sometidas a evaluación. Tanto la evolución como el diseño evolucionario son procedimientos no intencionales, inconscientes. Pero el diseño evolucionario tiene la intencionalidad derivada de los programadores del sistema, pues su elección de los parámetros por los que va a ser seleccionada una cierta variante convierte a estos programadores, o usuarios del programa, en una suerte de medio inteligente lamarckiano que dirige la evolución. De manera que las técnicas de diseño evolucionario son instrumentos que amplifican la capacidad representacional y computacional del diseñador (véase más abajo) pero no son “sustitutos no intencionales” del diseño intencional. Lo cual no obsta para que sean una de las líneas más prometedoras de innovación en métodos. He aquí algunas buenas introducciones tanto al diseño como a la programación evolucionaria:

Peter J. Bentley (ed) (1999), *Evolutionary Design by Computers*, San Francisco, Morgan Kaufmann; Margaret Boden (1992), *The Creative Mind: Myths and Mechanisms*, Londres, Basic Books (hay versión española en Gedisa); J. Gero, M. L. Mahler (eds) (1993), *Modeling Creativity and Knowledge-Based Creative Design*, Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum; David Goldberg (1999), *The Design of Innovation: Lessons form Genetic Algorithms*, Cambridge MA, MIT Press; John Holland (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems* Ann Arbor, University of Michigan Press; John Koza (1992), *Genetic Programming: On the Programming by Computers by Means of Natural Selection*, Cambridge MA, MIT Press; B. Langdon (1998), *Genetic Programming and Data Structures: Genetic Programming + Data Structures = Automatic Programming!*, Boston MA, Kluwer; Chris Langton (1995), *Artificial Life: an Overview*, Cambridge MA, MIT Press; Melanie Mitchel (1996), *An Introduction to Genetic Algorithms*, Cambridge MA, MIT Press; S. Todd, W. Latham (1992), *Evolutionary Art and Computers*, Academic Press.

zona de responsabilidad del diseñador (que incluye, en el caso de los ejemplares de un mismo tipo, al fabricante y al distribuidor del aparato).

Las perspectivas con las que el usuario se enfrenta al artefacto pueden coincidir o no con las del diseñador. Normalmente se solapan, pero no coinciden necesariamente. De ahí que cuando tomemos la vida del artefacto en un intervalo de tiempo un poco más largo, el usuario pueda incluirse en cierta forma en el proceso de diseño. Para una cierta corriente¹⁴, lo propio de la tecnología serían los cambios en la función debidos a la perspectiva del uso, de manera que la regla serían las exaptaciones más que las adaptaciones, para usar el término introducido por S. J. Gould para este evento evolutivo. De manera que los artefactos no tendrían identidad independientemente de la que les es conferida por la mirada de los usuarios. Puesto que esta idea se ha convertido en un dogma de la escuela constructivista, es conveniente que hagamos alguna matización al grado de verdad que contienen estas apreciaciones.

Es verdad que el segundo elemento que hemos establecido para la identidad de un artefacto es el uso, que es conceptual e históricamente parcialmente autónomo respecto a la función elegida. Así, las posibilidades que insta un artefacto a través de las funciones propias que le dan existencia no son las únicas posibilidades pragmáticas que establece ese artefacto. Por el contrario, los usuarios establecen normalmente derivas genéticas en la reproducción del artefacto a causa de otros usos que para aquéllos para los que fue diseñado. El automóvil es en la mitología americana el habitáculo preferido para la iniciación sexual, lo que no fue la intención primigenia de los Ford y otros diseñadores, aunque ha sido un uso crecientemente contemplado por los diseñadores, que han incluido algunas comodidades al respecto. Esta reutilización es un caso en el que la acción de reutilización es intencional, pero no es intencional el proceso de rediseño del sistema, más que a través de las intenciones del ingeniero, fabricante, etc., que repara en las virtuales ventajas de aprovechar las nuevas oportunidades de uso. En los casos normales hay que hablar más bien de *coevolución* de las intenciones del diseñador y del usuario.

¹⁴ Beth Preston (1998), "Why is a Wing like a Spoon? A Pluralist Theory of Function", *Journal of Philosophy*, 95, 215-54; W. E. Bijker (1995), *Of Bicycles, Bakelites and Bulbs. Towards a Theory of Sociotechnical Change*, Cambridge, Mass. MIT Press; Wiebe E. Bijker, J. Law (eds.) (1991), *Shaping Technology, Building Society: Studies in Sociotechnical Change*. Cambridge, Mass, MIT Press.

Lo que no excluye que en un futuro se incluyan de forma consciente las percepciones del usuario en el propio proceso de diseño, y no sólo en el de control¹⁵. En 1994 se realizó en el XeroxPARC (Xerox Palo Alto Research Center) un interesante experimento de observación del proceso de diseño¹⁶. Se trataba de observar como distintos sujetos se enfrentaban a una tarea de diseño de un elemento de una bicicleta, un transportín para objetos o personas. Se tomaron grabaciones del pensamiento en voz alta de los diseñadores con la intención de teorizar posteriormente sobre los procesos de creación. El experimento interesante puede extenderse también, quizás a cómo podrían interactuar ingenieros y usuarios en la tarea de realizar diseños más adaptados a las perspectivas del usuario. Las pocas experiencias de diseño cooperativo no permiten sino lamentar que no se hayan extendido aún estos métodos. Mientras no existan estas formas de diseño cooperativo, las intenciones del usuario obrarán como un medio inteligente de proliferación de artefactos, pero no como un medio inteligente de diseño.

3. Diseño dirigido a usuarios/inspirado en usuarios: lo humano como fin y como principio

Donald Norman¹⁷ es un científico cognitivo que se ha dedicado últimamente a popularizar algunas ideas sobre el diseño de los artefactos basados en la accesibilidad humana, en lo que está siendo llamada, no muy felizmente, “usabilidad”, que se ha extendido sobre todo en los contextos de diseños de páginas de internet. El mensaje de Norman es que sobre el diseño recae la responsabilidad de lograr que la tecnología y los humanos convivan pacíficamente. La tecnología debería permitirnos controlar la realidad sin perder el control de nosotros mismos. De ahí que una de las primeras y más importantes

¹⁵ Para la inclusión del usuario en el proceso de control, F. Broncano (2000), o.c. y Broncano (2002) “Diseños técnicos y capacidades prácticas. Una perspectiva modal en filosofía de la tecnología”, en *Actas del Congreso Internacional sobre Filosofía de la Ciencia*, Barranquilla, Ediciones de la Universidad del Norte (próxima publicación).

¹⁶ Los resultados fueron después desarrollados en un taller en Delft organizado por Kees Dorst y publicados en N. Cross, H. Dorst Christian (eds.), *Analysing Design Activity*, Chichester, John Wiley and Sons.

¹⁷ D. Norman (1998), *The invisible Computer*, Cambridge, MA: MIT Press.

propiedades de los diseños sea el que se inserten de forma armoniosa en nuestras vidas. Merece la pena comentar sus dos propuestas más conocidas en relación con la usabilidad de los artefactos. La primera es lo que denomina *transparencia* de las tecnologías¹⁸. Por tecnologías transparentes entiende diseños que apenas dejen ver el sustrato tecnológico que hace posible el funcionamiento del aparato. Los ejemplos paradigmáticos de Norman son los diseños de ordenadores personales a lo largo de la historia reciente. La transparencia de la tecnología tiene que ver con la capacidad de los ordenadores para no perturbar al usuario, incluso al usuario más incompetente¹⁹. Sería necesario que los artefactos tomaran en cuenta un modelo de intenciones de usuario tal que el artefacto logre interactuar realmente con sus intenciones, incluso con sus intenciones erróneas, de forma que no tenga que estarse preocupando continuamente por cómo funciona la máquina sino de los fines personales para los que emplea la máquina.

Ciertamente, lo que Donald Norman está proponiendo es más bien un diseño de tecnologías opacas que de tecnologías transparentes. Los primeros ordenadores personales que se difundieron exigían de los usuarios un dominio de algunos comandos del sistema operativo, (DOS fue el más extendido), haciendo casi visibles las operaciones básicas del ordenador y obligando al usuario a aprender algunos rudimentos de informática. El estilo de diseño de Apple fue, como sabemos, en la dirección contraria, la propuesta por Norman de que el usuario no tuviese que acceder a los elementos básicos de la tecnología. La línea de Apple se impuso incluso en el diseño de la competencia y, desde entonces, la programación de ordenadores personales ha seguido esta trayectoria, abarcando incluso a las formas de programación, cada vez más basadas en una adaptación intuitiva a las operaciones. Esto nos presenta un

¹⁸ El término usabilidad (neologismo de usability) se está extendiendo como característica valiosa en el diseño de programas y páginas. Un portal interesante para cuestiones relacionadas con esta propiedad es <http://www.usability.com>

¹⁹ La investigadora Lucy Suchman llevó a cabo una investigación en la antropología y sociología de la interacción con los artefactos en el laboratorio Xerox de Palo Alto en el que extrajo interesantísimas conclusiones para el diseño, por ejemplo, las dificultades para detectar en los errores de uso cuál era el problema de interpretación implicado, o las dificultades de comprensión de las reglas prácticas de los manuales de usuario. Sigue siendo un estudio de referencia en lo que respecta a los elementos cognitivos y no puramente fisiológicos implicados en el diseño ergonómico. Lucy Suchman (1987), *Plans and Situated Actions. The Problem of human-machine communication*. Cambridge: Cambridge University Press.

problema de orden conceptual que nos conduce a algunos de los dilemas más profundos que presenta el diseño y la extensión de los artefactos en la vida cotidiana de las personas. Por un lado, la presión por la transparencia de la tecnología lleva en la dirección que ya fue anticipada en la novela de Wells *La máquina del tiempo*. Allí, los eloins, la nueva especie humana, vivían en un entorno tecnológico que no controlaban, ni siquiera veían, las máquinas se encargaban de cuidarlos y de alimentarlos. Desgraciadamente eran alimentados por los morlocks, seres oscuros de las cavernas y seres industriales, que, a su vez, se alimentaban de eloins. La metáfora de Wells es bien clara: una tecnología transparente nos libera de la esclavitud de los artefactos, con los que interactuamos sin sentirlos, pero nos hace dependientes o esclavos de artefactos que cada vez son peor entendidos y por consiguiente dependientes o esclavos de los realmente expertos. Los automóviles antiguos podían ser reparados con piezas reutilizadas de otros automóviles, incluso de otras marcas. Cuando se viaja por países en desarrollo no es inusual observar la permanencia de los viejos talleres mecánicos que pueden hacer andar un auto inservible. Los modernos talleres han sido diseñados como clínicas del automóvil, ni siquiera se reparan: se diagnostica y se sustituye el paquete funcional entero.

En el dilema de la transparencia de la tecnología implicada en los diseños está la difícil permisión de dos formas de fragilidad: las tecnologías “transparentes” (ocultas, en mi interpretación) son tecnologías robustas, pues han sido diseñadas para soportar la menor intromisión de los posibles usuarios: su fiabilidad, en el intervalo de circunstancias para el que se han previsto, es mucho mayor que aquéllas que exigen una continua intervención del usuario. Pero el precio es que hacen más frágil y dependiente al usuario de una tecnología que cada vez se aleja más de su comprensión, y hacen menos plástica la utilización del propio artefacto que comienza a tener una casi única posibilidad de uso, la que el diseñador ha pensado como correcta. Por otra parte exigen un medio ambiente o ecosistema tecnológico mucho más complejo, pues la sustitución de piezas, la propia sustitución de artefactos e incluso lo que se denomina reingeniería exige un contexto de servicios adecuado a la preservación de la invisibilidad de la tecnología. En el lado contrario, a medida que la tecnología se hace más visible y manipulable, el conocimiento del usuario puede reutilizar e incluso rediseñar con mayor facilidad los aparatos, las funciones y los usos. El precio no es menos grave: el usuario debe adaptarse al

funcionamiento del aparato, debe entrar en las reglas de funcionamiento y su vida poco a poco se irá llenando de artefactos a los que se ha tenido que ir acoplado, de manera que, en cierta forma, sus hábitos e incluso su cuerpo va siendo poco a poco rediseñado por los artefactos. La tecnología así se hace mucho más frágil ante la sociedad que reacciona con malestar ante estas presiones por la adaptación a un medio que no es humano o que al menos no lo es de acuerdo a la mentalidad del usuario ya adaptado a contextos técnicos distintos. No hay que despreciar, además, la fragilidad que proviene de la propia fragilidad cognitiva humana. El caso de la cultura del automóvil contemporánea es un caso claro: los automóviles son prototipos de máquinas que exigen de nosotros una adaptación larga para adquirir el conocimiento experto necesario. Los resultados no son nada halagüeños en un cierto sentido: el número de accidentes es fruto en parte de esta opción social por un diseño de los sistemas de transporte absolutamente dependientes del usuario.

Mi impresión es que siempre se pueden buscar diseños que alcancen un adecuado equilibrio negociando una solución entre ambas tendencias, pero también que la tensión desvela profundos problemas del diseño tecnológico y de la inserción de la tecnología en nuestras vidas. La opción extrema por una tecnología invisible solamente puede ser mantenida en una sociedad que sea consciente de su creciente dependencia de la tecnología, la asuma responsablemente y que la equilibre con una paralela y creciente educación en la tecnología. Exigirá al tiempo la previsión de alternativas para los casos de fallo tecnológico generalizado pues la sociedad se hace más frágil al incrementarse su dependencia de diseños tecnológicos que cada vez le son más lejanos. En el extremo opuesto, la opción por tecnologías visibles, por un diseño más exigente en el conocimiento experto del usuario, nos lleva a un medio ambiente menos apacible y más cargado de artefactos, pero también a una conservación del control humano sobre los artefactos que nos rodean. Hace años, Robert M. Pirsig, publicó un bestseller sobre nuestra relación con los artefactos: *El Zen y el arte del mantenimiento de la motocicleta*²⁰. Allí reivindicaba una vuelta al cuidado de los artefactos, a su comprensión y uso como útiles humanos. En una reivindicación de un mundo tecnológico no alejado de una actitud cuidadosa con la naturaleza, sostenía que, quienes no

²⁰ R. M. Pirsig (1974), *Zen and the Art of the Motorcycle Maintenance*, Londres: Verso.

comprenden los artefactos y no saben repararlos, tampoco saben cuidar de lo que les rodea, que expresan en su propia concepción de lo técnico una actitud de puros consumidores de tecnología, pero no de hábiles ingenieros de la naturaleza. Las palabras de Pirsig han sido olvidadas en el rincón de una cultura progresivamente orientada hacia la rapidez y comodidad, calificadas como actitud hippy o zen, mas su advertencia sobre las sendas tecnológicas hacia las que nos encamina una actitud de dependencia de artefactos cuyo funcionamiento olvidamos no pueden ser dejadas a un lado. Las trayectorias tecnológicas no solamente modifican las posibilidades históricas, también nos modifican a nosotros y a nuestras sociedades y, esa es la posible conclusión, una tecnología oculta puede llevarnos a formas sociales más irresponsables. Desgraciadamente, hacia esta actitud convergen los intereses de los desinteresados por la técnica y los intereses de los vendedores de bienes de consumo. El equilibrio de las razones de Norman y de las razones de Pirsig debería ser objeto de una controversia abierta en todas las instancias, desde las escuelas de ingeniería hasta las organizaciones de consumidores. Por mi parte, creo que se trata de un dilema constitutivo de nuestra cultura no menos importante que el de libertad e igualdad, aunque a muchos les escandalizará esta afirmación. Les dejaremos escandalizados.

La segunda idea que promueve Norman en su cruzada por la humanización del diseño es la contemplación de las emociones en el diseño de los objetos²¹. En un sentido su propuesta es muy clásica, sigue la tradición de los promotores de una idea de diseño como envoltorio amigable o emotivo de los artefactos, tradición sostenida en las escuelas de diseño industrial y en la estética de los bienes de consumo. Pero Norman tiene una intención más profunda que la puramente estética; aboga por una auténtica antropología del diseño que no se limite al estudio ergonómico sino que haga visibles las relaciones prácticas, cognitivas y emocionales de las personas con los artefactos. Su propuesta es la de establecer la relación emocional como una constricción conscientemente buscada en el momento del diseño de los artefactos, lo que entraña un conocimiento efectivo de nuestras actitudes emotivas con las cosas que nos rodean. La disciplina de la psicología del diseño está aún por desarrollar, entre

²¹ D. Norman (2004), *Emocional Design. Why we Love (or Hate) Everyday Things*. Nueva York: Basic Books.

otras razones por la profunda desconfianza de ingenieros y humanistas y científicos sociales, pero no es por ello menos necesaria como instrumento de investigación de las formas en las que la tecnología se inserta en nuestras sociedades. En lo que respecta a la idea de incorporar elementos expresivos o emotivos que provoquen una relación de cercanía, me parece que se trata de una cuestión más bien técnica en el buen sentido de la noción de técnica de diseño, que ha de seguir a una investigación acerca de cuáles son los elementos que convocan esa cercanía. Habrá que estudiar mucho la historia del diseño, en particular las propiedades de aquellos artefactos que se convierten en iconos emotivos independientemente de otras razones de propaganda o precio: el escarabajo de Volkswagen, el bolígrafo Bic Cristal, etc.; buscar ahí ciertas claves no sólo sobre los artefactos sino sobre nuestro propio trasfondo sensorio-motor y, quizás el resultado sea descubrir cómo ciertos diseños resultan en formas de diseñar al propio ser humano y su relación con el entorno.

No es menos interesante la dirección inversa de la propuesta, la de incorporar elementos emocionales, y no solo inteligencia cognitiva, en el diseño de los objetos. Es una idea que incorpora una estrategia de diseño interesante por cuanto aprovecha recursos peculiares de los seres vivos y de los humanos para resolver problemas de eficiencia. Y, como subproducto, nos plantea una nueva serie de dilemas acerca de la naturaleza del diseño. La incorporación de conocimiento experto (o rutinas, o inteligencia artificial) en el diseño de artefactos ha sido una parte de la revolución que ha introducido la informática en todo el diseño. Como tecnología intersticial ha revolucionado el maquinismo tradicional y desde los edificios a los automóviles y en general a todos los artefactos que pueblan nuestro medio, la introducción de heurísticas, rutinas, conocimiento experto, etc., ha producido algo similar a lo que significó en su día la introducción de automatismos y de sistemas de realimentación en los artefactos. Si ya los automatismos resultaban ser mecanismos que aproximaban los artefactos a lo biológico, pues sabemos que cualquier ser vivo, por elemental que sea (una bacteria, pongamos por caso es un complejo de numerosísimos mecanismos de realimentación y homeostasis que preservan su estructura y planes de supervivencia en el plazo de su vida), la incorporación de la inteligencia mediante la implantación de diversos programas de decisión supone una transformación en el diseño que no por haber sido notada numerosas veces deja de plantear inquietantes preguntas. Es como si dejásemos en los artefactos

trozos de nuestra cultura para que funcionen en condiciones similares a las nuestras: más que una tecnificación de lo humano emprenden una humanización de lo artefactual. Un automóvil que dispone de un sistema de frenado diseñado para cuando el conductor se duerme sólo puede ser entendido como incorporando funciones mentales y sociales en su diseño puramente maquinístico. Quizás los humanistas tanto como los ingenieros debieran o debiéramos comenzar a pensar con cierto cuidado sobre esto. Y éste es precisamente el punto en el que aparecen las emociones.

Las emociones son un tipo particular de mecanismos de control de los animales superiores, en parte cognitivo, en parte visceral o puramente fisiológico: tienen funciones de alerta, de activación o depresión, de búsqueda de caminos alternativos en relación relacionadas con los planes fundamentales del sistema. En el caso de los humanos, además, al coevolucionar con nuestro sistema cognitivo en un medio social, se han convertido en una parte sustancial de nuestra naturaleza como especie o como cultura. La incorporación de diseños emocionales o de simulaciones emocionales en los artefactos, pongamos por caso, de ansiedad en un automóvil en contextos de conducción muy peligrosa, introducen algunas señas de identidad humana mucho más profundas que lo puramente cognitivo en los artefactos. Todos recordamos las angustiosas peticiones de Hal en *2001: Una odisea en el espacio* cuando está siendo finalmente desconectado: siente miedo, no quiere morir, sabe que siente miedo... El punto interesante es que lo que transferimos a los artefactos ya no es nuestro conocimiento experto, nuestras heurísticas o rutinas, sino nuestras señas de identidad que están profundamente relacionadas con nuestras formas particulares de estar en el mundo. No estoy planteando ahora un problema moral, ni siquiera en el sentido en que ha sido tratado largamente en la ciencia ficción desde *Yo, Robot*, de Isaac Asimov a toda la nueva imaginería de Hollywood. Lo que estoy planteando es que la incorporación de estos elementos a los artefactos exige un cuidadosísimo esfuerzo de estudio y reflexión sobre nosotros mismos para tomarnos como modelo de futuros diseños. Las emociones son mecanismos robustos que ya Darwin sabía que habían sido preservados por la evolución a causa de su eficiencia biológica. Pero también sabemos que son mecanismos tan peligrosos como eficientes: son la base del poder y de la sumisión, de todas las desigualdades como de las más asombrosas formas de altruismo de nuestra especie. Son, por ello, mecanismos tal vez

máximamente alejados de lo que un ingeniero pensaría que es un artefacto bien diseñado, pero sólo en una primera mirada, pues tarde o pronto se va a encontrar con que el diseño de artefactos que funcionen en contextos abiertos exigirá o aconsejará al menos algo parecido a un sistema emocional de alerta y de prosecución de fines. En nuestra sociedad del riesgo, el miedo al fallo catastrófico de un gran sistema tecnológico como es una red eléctrica, una central nuclear o incluso un superpetrolero, son estados emocionales ampliamente compartidos. La cuestión planteada en la propuesta es si deberíamos implantar un mecanismo de control similar en los sistemas de control de estos mismos superingenios tecnológicos.

Este segundo vector de desarrollo del diseño promovido por Norman nos lleva a una nueva vuelta de tuerca (una metáfora bien técnica) en nuestra investigación sobre la naturaleza del diseño. Si hasta el momento habíamos planteado la heterogeneidad de los diseños aludiendo a las tensiones entre materia, forma, función y uso, ahora tenemos que incorporar elementos que tienen que ver con la propia identidad humana, con nuestra valoración de lo que vale y de lo que debe ser evitado y, con ello, nos lleva a la cuestión que constituye el hilo conductor de toda la argumentación: que al diseñar artefactos nos estamos diseñando a nosotros mismos, que el ingeniero es mucho más ingeniero social de lo que cree y, quizás, estaría dispuesto a asumir.

Resumiendo las propuestas de esta sección acerca de la identidad de los artefactos, nos encontramos con la idea de que los artefactos tienen una existencia compleja en varios elementos de su organización: los materiales, la forma, la función, el uso. El diseño es la actividad que representa todos estos niveles, y lo hace mediante elecciones que refuerzan unos elementos u otros dependiendo de los intereses que guíen al diseñador. Las diversas escuelas de diseño encuentran en esta pluralidad de niveles el objeto fundamental para sus elecciones y sus propuestas son propuestas que nos conducen a resaltar unos u otros aspectos de la identidad de los artefactos. No hemos entrado, sin embargo, en esas controversias. Nos parece mucho más importante descubrir la base para la trama de argumentos que llevan a unas u otras tendencias. Al final, para suerte o desgracia, el ingeniero contemporáneo ya no puede sustraerse al debate cultural que, desde la Bauhaus al menos, ha calado en los propios fundamentos de la técnica, llevando el mundo de lo semiótico a donde el ingeniero más clásico temería horrorizado que llegase: al propio diseño de los objetos.

Es el momento de plantear algunas cuestiones directamente normativas, exigibles a los diseños como planes que son a la vez de cómo será un objeto y de cómo terminarán siendo los usuarios y la sociedad en la que se inserte. Habrá quien crea que es el momento de introducir la controversia moral en la ingeniería, pero la cuestión me parece que, desde un punto de vista filosófico, aún está en estratos más profundos que los de la moral, si es que existen, en sustratos epistemológicos y ontológicos. Propongo tres criterios normativos que se justifican en la propia naturaleza del diseño y cuya fuerza normativa nace de que son condiciones que hacen posible una inserción responsable y colectivamente asumida de los artefactos en el conjunto de nuestras trayectorias culturales libremente decididas:

- El diseño debe ser *representable*.
- El diseño debe ser *público*.
- El diseño debe ser *realizable*.

4. La representabilidad de los diseños

La ingeniería, la técnica moderna comienza sólo cuando la actividad del diseño se puede desacoplar de la actividad práctica de la construcción del objeto. El ingeniero había sido durante siglos el “ingeniator”, el habilidoso constructor de máquinas que servía a los ejércitos y que tenía una cierta habilidad en el dibujo para pensar y representar ciertas nuevas máquinas. Conservamos bellos dibujos de los ingenieros del Renacimiento, de Taccola, de Vinci, etc. Pero esos bellos dibujos son bocetos que no pueden ser trasladados directamente a un torno para construir las piezas, hay que rediseñarlos de nuevo y convertirlos en objetos construibles industrialmente: hay que representarlos para poder producirlos. El medio de representación, el medio de presentación, se convirtió poco a poco en el lugar del pensamiento del ingeniero, que comenzó a instalarse en una mesa de trabajo, en un ordenador, antes que en la obra o el taller. La iconografía moderna representa al ingeniero como una persona relativamente bien vestida con un casco en la cabeza y un rollo de papeles en la mano. Como suele ocurrir con los iconos culturales, mienten a la vez que dicen la verdad: el ingeniero moderno nació como un ser híbrido de papeles y de talleres. Su trabajo existía en la trayectoria desacoplada del medio escrito que adquiere significado en tareas prácticas que probablemente el ya había olvidado o con las que no tenía

familiaridad. Pronto aparecieron una serie de profesiones intermedias, los expertos en comunicar la ingeniería con la obra o el taller: fueron los síntomas sociales de la creciente distancia entre el diseño y la construcción. Fue el resultado de que los diseños se habían convertido en objetos representados en un nuevo lenguaje.

La revolución industrial y la técnica moderna comenzó cuando los ingenieros navales sustituyeron las viejas formas de construir buques basadas en la sabiduría práctica de los carpinteros navales de los astilleros por las operaciones pautadas siguiendo las instrucciones del plano. El plano o proyecto inventó la tecnología: a partir de su existencia, cambiaron las operaciones técnicas que en adelante ya no estarían guiadas por la imaginación, por la imitación y por la habilidad práctica del artesano en el trabajo sobre el objeto, sino por las estrictas medidas y por las operaciones asociadas tal como estaban representadas en el plano. Fue una transformación que no se hizo sin resistencias. Sabemos que los carpinteros navales las interpretaban como una intromisión en su trabajo de un petrimetre alejado del trabajo práctico. Seguramente cualquier maestro de obra tiene la experiencia de una continua discusión con el proyecto del arquitecto, y quizás en muchas ocasiones lleve la razón. El punto interesante, sin embargo, es que la representación formal de un artefacto asegura muchas más responsabilidades de las que la pura modificación artesana permitía, y, sobre todo, hace posible un mundo artificial desacoplado del real, un mundo que puedes ser simulado y perfeccionado antes de llegar a la complicada existencia real. La representación formal de un artefacto aseguraba, entre otras cosas, la repetibilidad ilimitada de su forma y por consiguiente también de sus funciones. En adelante, el barco que hubiese sido encontrado eficiente podía ser repetido aun sin conocer cuál era la causa diferencial de sus capacidades de navegación superiores. La representabilidad del objeto en un plano permitía también su fabricación en una escala inferior y la observación en un laboratorio de ensayos de sus propiedades y rendimientos. Por lo mismo, un error en el diseño podía ser corregido en el plano antes que en la realidad haciendo mucho menos arriesgada la fabricación final. Por último, la representabilidad de un diseño aseguraba la posibilidad de estandarizar la fabricación de las piezas del artefacto, el diseño de máquinas adecuadas para la tarea de fabricar piezas similares y, en consecuencia, la producción en masa de los objetos.

No hay diseño sin un medio representacional para realizarlo. Las capacidades de planificación y proyecto de la mente humana son limitadas. La mente humana puede ser buena jugando al ajedrez a causa de que el espacio de configuraciones está muy bien definido, pero en los demás contextos prácticos, la mente depende de la interacción del lenguaje y de sus capacidades de representación en imágenes, que no son excesivas. Esto explica el lento desarrollo de la tecnología en la historia hasta que surgieron los lenguajes representacionales útiles en los procesos de diseño. Un medio representacional está constituido por un formato que codifica la información y un conjunto de operadores que permite transformarla. Así, en la imaginaria en perspectiva, que entre los siglos XV y XVIII se convierte en el medio representacional del diseño tecnológico, el formato lo facilita la imagen bidimensional, mientras que los operadores de transformación son los que resultan de la aplicación de las reglas de la geometría proyectiva. Esta conjunción convierte a lo que antes fue simplemente un medio de expresión en un auténtico medio representacional que hizo (y hace) posible la tecnología. Es cierto que el paradigma de medio representacional es el lenguaje, y casi sólo el lenguaje, precisamente por la claridad y precisión de las reglas de transformación. Pero debemos pensarlo con más cuidado.

El lenguaje tradicional del diseño ha sido el llamado *dibujo técnico*. Es una extensión aplicada de la geometría proyectiva que nos permite manipular y transformar la imagen de un objeto, una vez que conocemos sus medidas. La transformatividad de la imagen mediante la transformación de la proyección es esencial para los múltiples propósitos que cumplen los diseños, desde dirigir la producción del artefacto hasta comprobar sus capacidades compositivas²².

²² Uno de los aspectos esenciales de los medios representacionales es la capacidad *multimedia* de representación. Los medios representacionales son inútiles científicamente si no pueden ser integrados en un modo de comunicación y pensamiento multimodal. La traducibilidad de la información desde unos a otros formatos es absolutamente esencial, especialmente cuando tenemos en cuenta los complejos procesos de conocimiento distribuido en los que múltiples científicos de formación diferente experimental y teórica deben colaborar coordinando sus actividades en medios representacionales diferentes. Los sociólogos que han estudiado las actividades de los laboratorios han subrayado la importancia de las traducciones aparatos y formatos expresivos diferentes. Pensemos, por ejemplo, en un problema que deben resolver quienes emplean pequeños ordenadores coordinados en paralelo para resolver problemas de cálculo que de otro modo serían imposibles por el costo de los grandes ordenadores, o incluso por

Pensemos en los planos de un buque de guerra de finales del siglo XVIII, en los de un puente de metal, como los desarrollados a partir de los años 30/40 del siglo XIX, o en las primeras máquinas de vapor desarrolladas por Watt. Eran artefactos que tenían una inusitada complejidad para la época y que fueron llevados a cabo mediante técnicas de diseño consciente en un medio representacional como el dibujo de sus múltiples componentes. Sin el dibujo técnico hubiesen sido imposibles el desarrollo de componentes con medidas estandarizadas y fabricadas por artesanos o industrias dispersas que debían encajar luego en el montaje y la fabricación del artefacto. Los elementos de forma y, por consiguiente, las medidas precisas de los componentes son las propiedades esenciales de la composicionalidad de los artefactos, de manera que

la complejidad de la computación: ¿corresponden las constricciones técnicas de la red a las divisiones naturales de los problemas del cálculo en subtarear? Es un problema que en parte depende de las características de cada pequeño ordenador, y de sus capacidades de cómputo, en parte de los sistemas operativos en los que se trabaje, y en parte de la propia representación del problema. En estos casos, cada vez más corrientes en la investigación contemporánea, la traducibilidad entre medios representacionales se convierte en una de las principales constricciones del problema. La computación va a depender de estas dos capacidades: integración de formatos y coordinación de medios. La coordinación, en muchos casos, depende una posibilidad de conversión de medios representacionales y esto depende de los formatos en que se codifique la información (digital y analógico como paradigmáticos). Esta conversión hace que la representación sea transportable. Las capacidades computacionales de un sistema dependen de las propiedades de los medios representacionales en que se ejecuten. La computación consiste en hacer ver (descubrir) cierta información sobre un estado de cosas mediante transformaciones representacionales. Computar requiere almacenar y extraer la información mediante la manipulación de estados representacionales en un medio. Los medios representacionales públicos son artefactos simbólicos en los que se deposita información interpretable; forman parte de la *memoria semántica externalizada* de un sistema cognitivo complejo, y por consiguiente, son *recursos* cognitivos externos que se activan en coordinación con recursos internos de los sistemas cognitivos. En este sentido, son transformaciones prácticas en el medio que modifican el contexto cognitivo en cuanto abren o cierran posibilidades informativas, pues el medio representacional determina la accesibilidad de la información. De aquí su importancia dentro de los contextos cognitivos: cada medio representacional determina un tipo de *filtro informacional* y, por tanto, define un *acceso* y un *horizonte* informacionales; cada medio representacional delimita un conjunto de accesos cognitivos al entorno informacional; estos accesos están diseñados según el uso que se haga del medio. La idea es que la capacidad representacional determina también la información que es accesible, pues de otro modo los vehículos informacionales no producen una información representable. Piénsese en alguien que tuviese alguna capacidad de captar los infrarrojos “visualmente” pero fuese incapaz de representar los resultados en un formato inteligible: la información sería igualmente inaccesible para él y para quien careciese de esta capacidad.

no es extraño que no puedan existir diseños sin un medio como el que suministró la geometría proyectiva²³.

El segundo e igualmente imprescindible medio para el desarrollo de la tecnología moderna fue el análisis matemático. El cálculo de variables permitió la simulación de la dinámica de los sistemas, y por ello también la simulación del comportamiento de los artefactos a los largo de procesos como por ejemplo, de sometimiento a cargas, probando así sus capacidades de resistencia y funcionamiento en las condiciones particulares especificadas. Es difícil exagerar la importancia de estos dos medios representacionales, y especialmente del análisis en el desarrollo de la ingeniería. La importancia de la modelización en el diseño es la característica fundamental de la ingeniería contemporánea: penetra mucho más profundamente en la estructura funcional y permite la proyección en el futuro a través de la variación en los parámetros y condiciones iniciales²⁴. Un caso bien conocido es el de los diagramas de Clapeyron, quizás empleados ya intuitivamente por Watt, que dieron origen a la idea de una máquina térmica ideal, a la idea de procesos adiabáticos y más adelante a los propios fundamentos de la termodinámica.

El tercer paso importante en el diseño ha sido la creación de modelos complejos de nuevos materiales. La posibilidad de diseñar los propios materiales con los que están constituidos los artefactos, ha sido posible, por supuesto, mediante el desarrollo científico de la química. Pero el desarrollo de nuevos materiales es él mismo un resultado tecnológico que no hubiera sido posible sin los medios computacionales que permiten las ordenaciones espaciales complejas de las moléculas. El uso sistemático de la computación en el diseño es otro de los cambios que merece la pena desarrollar con más extensión de la que aquí disponemos²⁵. Los métodos de CAD (Computer Asisted Design) han transformado completamente las viejas prácticas de dibujo. Pero aún son más interesantes por lo promisorio el uso de los propios ordenadores como instrumentos de diseño automático, por ejemplo, los métodos de diseño

²³ Un magnífico estudio teórico sobre el significado de este medio representacional es A. Pérez-Gómez (1999), *Architectural Representation and the Perspective Hinge*, Cambridge, MA, MIT Press.

²⁴ Como ejemplo de la aplicación de las técnicas de modelización al proceso de diseño, véase por ejemplo Xiaoping Du, Wei Chen (2000). "Towards a Better Understanding of Modeling Feasibility Robustness in Engineering Desing", *Journal of Mechanical Design* 122, 385-94.

²⁵ Véase nota 6 más arriba.

evolucionario, que pueden transformar la representación de artefactos complejos que no pueden ser siquiera imaginados y dibujados por una mente tan limitada como la nuestra.

Quizás uno de los elementos más interesantes que está aún por desarrollar sea el de la creación de un auténtico *lenguaje funcional*. Existen pocos intentos desarrollados de crear una auténtica ciencia de las funciones, o más modestamente, de medios representacionales funcionales. Un reciente intento interesante es el de Stone y Wood²⁶. Estos autores proponen clasificar las funciones a través de la idea de flujos: de material, de señales y de energía, de modo que se conforman un núcleo sistemático de clasificaciones que dependen tanto de las características del contenido ontológico del flujo como de las operaciones que se realizan. Surgen así funciones abstractas como: RAMIFICAR, CANAL, CONECTAR, CONTROL DE MAGNITUD, CONVERTIR, SEÑAL, SOPORTE. Es un intento de sistematización que indica, por el carácter cercano al lenguaje cotidiano que tienen las denominaciones, cómo la ontología y sistemática de las funciones son todavía programas que esperan un urgente desarrollo.

El diseño funcional tiene el interés de que penetra aún más profundamente en la representabilidad del objeto. La razón por la que señalamos su interés no es solamente por el puramente técnico, que quizás no lo sea tan grande como parece, sino por la sistematicidad que introduce en la representabilidad de los artefactos. Pues la razón por la que la representabilidad es exigible es mucho más amplia que las razones puramente ingenieriles. El ingeniero americano Henry Petrosky, popularizador de los diseños y de sus avatares históricos ha estudiado varios casos interesantes de fracaso y fallo de los diseños²⁷. Sus tesis son más bien popperianas: que aprendemos más de los fracasos que de los éxitos, que diseñar es una tarea creativa y tan azarosa como escribir una obra literaria, que todo diseño es una hipótesis arriesgada, aun los mejor contrastados, etc. Algunos de sus estudios son mucho más interesantes por lo que desvelan de cómo la ingeniería se introduce en nuestras vidas. En un caso estudiado, el del hundimiento de unos pasos elevados del vestíbulo del hotel Hyatt Regency de

²⁶ Robert. B. Stone, L. Wood Kristin (2000), "Development of a Functional Basis for Design", *Journal of Mechanical Design*.

²⁷ H. Petroski (1982), *To Engineer is Human. The Role of Failure in Successful Design*. Nueva York: Vintage Books.

Kansas City en 1979, que provocó decenas de muertos y un gran debate en Estados Unidos, un punto que salió en la posterior investigación y juicio fue las condiciones del diseño de aquellos pasos elevados y de una aparentemente poco importante modificación en unas barras de sujeción. Las responsabilidades que eran exigibles lo eran en la medida en que se atribuían a las condiciones del diseño tal como habían sido representadas en el proyecto. Y esta es precisamente una de las razones que nos llevan a plantear la representabilidad como una condición exigible. Si los diseños no fuesen representables tampoco podrían entrar en la esfera pública en su estadio de diseño. Y esta entrada en la esfera pública es la condición de que sea la sociedad la que posteriormente asuma la responsabilidad del artefacto y no solamente el ingeniero.

En el urbanismo y en general en la planificación industrial, la presentación pública de los proyectos es ya una práctica jurídica e institucionalmente articulada que convierte a la ingeniería en una parte no despreciable de la gestión política de ministerios y otras instituciones públicas. Los proyectos presentados son examinados públicamente por ingenieros y técnicos pertenecientes a las instituciones públicas y por cualquier ciudadano interesado. Poco a poco, como fruto de las presiones que en los años setenta llevaron a cabo los movimientos sociales ecologistas, se impusieron en ciertos casos la exigencia de una representación más amplia del proyecto, la de los estudios previos de su posible impacto ambiental. Fue una nueva exigencia en la representación de los proyectos que contribuye a modificar la idea de qué es lo representado y representable en un proyecto. La idea de impacto ambiental va más allá que la de los tradicionales cálculos de resistencia de materiales y de condiciones adecuadas funcionales y de uso. Representa, o pretende representar las trayectorias futuras de una modificación técnica en un medio ambiente y un medio social particular: examina las posibilidades históricas en un sentido que la ingeniería tradicional no había contemplado y que cada vez se está convirtiendo más en una rutina en muchos proyectos. Lo que es representable se convierte así en un criterio que no solamente determina qué es lo diseñable, sino también en una condición de legitimación pública de la ingeniería. Un ingeniero no sólo es el que construye, sino sobre todo el que diseña y somete su representación al escrutinio público.

Y ello nos lleva de nuevo a una cuestión filosófica: ¿qué es lo representable y, por consiguiente, qué es lo diseñable? Lo son, como hemos visto, las

características actuales del objeto: su forma, su funcionamiento en condiciones normales, tal como se desprende de los estudios de simulación previos, algunas condiciones de uso adecuado, ciertas relaciones previsibles con el medio. Son los límites actuales de los diseños ingenieriles: ¿son los límites más allá de los cuales no podemos exigir más especificación a los diseños? Sospecho que no, que quizás uno de los elementos en los que se está produciendo un mayor cambio en el diseño ingenieril sea precisamente en la exigencia de representabilidad. Si pensamos en las bioingenierías y en los problemas políticos, morales y medioambientales que están generando, observaremos que la cuestión de la representación de los escenarios futuros de inserción de un nuevo artefacto, un OGM (organismo genéticamente modificado) por ejemplo, se convierte en una creciente exigencia para la admisibilidad legal y social del artefacto. Así, aparece un nuevo nivel de representación: el de las relaciones funcionales del artefacto con su medio natural, técnico y social. Se exige la representación de las intracciones futuras que un artefacto introducirá en un contexto que sólo a medias es conocido: las implicaciones para la biodiversidad de un OGM, los efectos sobre los hábitos de especies animales de una futura autovía, la modificación de las estructuras de aprendizaje y aún familiares de un ordenador personal cuando entre a formar parte de los objetos cotidianos de un niño, etc. ¿Son representables, siquiera imaginables, estas futuras transformaciones? No por el momento, más que en forma de conjeturas y estadísticas. Son también los límites de nuestra responsabilidad y de la responsabilidad del ingeniero. Muchos autores críticos han postulado una irrestricta aplicación de un principio de precaución en el caso de las amenazas entrevistadas por un diseño. Tocamos así uno de los puntos centrales de la percepción pública de la tecnología en el mundo contemporáneo: el principio de precaución es o bien una consecuencia del riesgo representado o una consecuencia del miedo, del riesgo percibido. El riesgo representado es el riesgo asignado por los ingenieros a diversos escenarios de funcionamiento con índices de probabilidad asignables. El riesgo percibido, el miedo, implica la postulación de escenarios que tienen una importancia personal o social que sesga su probabilidad. La representabilidad se convierte entonces en el escenario de controversia entre dos asignaciones de probabilidad. No cabe ya ocultar que éste es una de las fuentes de deslegitimación social de la tecnología más importantes, al tiempo que una de las fuentes de malestar más copiosas entre los miembros

de las comunidades científico-técnicas, que se sienten acosados muchas veces por argumentos que consideran demagógicos y malinformados. La representabilidad, entonces, se convierte en una exigencia social aún más relevante: la controversia debería suponer un mismo espacio de discusión que debería estar circunscrito por las capacidades de representar las posibilidades futuras de un artefacto. Es entonces, sería entonces, cuando la responsabilidad pública adquiere, adquiriría, toda su autoridad.

5. Publicidad de los diseños

Las controversias contemporáneas alrededor de muchos productos, o incluso de tecnologías completas, como la tecnología de reactores nucleares para la producción eléctrica, las biotecnologías aplicadas a los organismos genéticamente modificados, a la investigación en tejidos para xenotrasplantes o los desarrollos en reproducción humana, han puesto de manifiesto la profunda desconfianza de muchos movimientos sociales acerca de la transparencia del sistema de ciencia y tecnología. El carácter público de los productos de la innovación ha sido uno de los puntos de mayor controversia, particularmente cuando el desarrollo de los métodos de investigación masiva en el genoma ha generado numerosos productos patentables (y patentados), razón por la que las biotecnologías, en buena medida, se han convertido en las receptoras de una gran cantidad de capital de riesgo. Este aspecto de la tecnología (y de la ciencia, pues no podemos ya separar las controversias en el aspecto político en ambas categorías) ha llevado a muchos críticos a insistir en el componente público de la tecnología como una reivindicación que está en la línea de una forma de mayor control social democrático sobre su desarrollo.

Este debate es extremadamente importante: en absoluto debe ser minimizado (o peor aún, ninguneado). Sin embargo, es un debate que en el orden lógico debe seguir a un cuidadoso trabajo ontológico y epistemológico acerca de la naturaleza de la tecnología y de los diseños en particular. De hecho siempre fue así. La epistemología, en lo que respecta a la ciencia moderna, estuvo siempre en una profunda relación con la política. Pero nunca hubo relaciones de subordinación, sino más bien de lo contrario. Hay dos momentos en la epistemología moderna que conviene recordar con cierto cuidado para repensar lo que ocurre ahora con la tecnología en general y con los diseños en particular.

El primero fue la reivindicación de la privacidad, de la primera persona, como autoridad última en el razonamiento que conduce a la aceptación racional de una creencia. Esta reivindicación tiene relación con el socavamiento que la filosofía moderna realizó en el Principio de Autoridad: nada recibido socialmente, ni siquiera la fe, es susceptible de ser aceptado sin el filtro de la autoridad de la primera persona. De aquí a una construcción solipsista del conocimiento solamente hay un paso, que dieron algunos filósofos muy consistentes, entre los que Berkeley tiene un lugar de honor. Pero hubo un segundo momento que se produjo al compás del desarrollo de la filosofía experimental. La autoridad de la primera persona fue puesta en tela de juicio en tanto que “primera persona” aislada de sus relaciones sociales. Fue el momento del desarrollo de las primeras arenas públicas de evaluación de los experimentos, particularmente entre los filósofos naturales ingleses de Cambridge y Birmingham. La autoridad de la primera persona se admitió pero sólo en tanto que sujeto que se hacía responsable de una intervención pública en la que sostenía mediante experiencias abiertas lo que postulaba como creencias aceptables. Esta segunda filosofía es paralela, pero independiente de la primera en el origen de la ciencia y el conocimiento moderno. De su independencia, y aun inconsistencia, da cuenta, como es bien sabido, la trayectoria filosófica de Wittgenstein entre ambas tradiciones. En el primer sentido la reivindicación es que el conocimiento es privado, pero tiene una proyección y un origen político indudable: minar la autoridad de la filosofía y la teología, dejando en manos de la autonomía individual el control de las decisiones epistemológicas. En el segundo sentido el conocimiento solamente existe en un ámbito público intersubjetivo, en un sistema de reconocimiento mutuo de autoridad y habilitación cognitiva y práctica. Sin embargo en este segundo sentido la proyección política es mucho menos evidente, pues supone la previa existencia de una comunidad legítima de iguales, de seres capaces de entender y valorar los argumentos y extraer las correspondientes inferencias.

Tenemos así tres sentidos del debate sobre la publicidad de un objeto, de los diseños en particular:

- si son apropiables públicamente,
- si son objetos de representación privados,
- si son objetos representables en el ámbito público.

Algunos autores que han reivindicado el elemento “práctico” y de habilidades de la tecnología, y de los diseños en particular, podrían quizás

argumentar a favor de la existencia de ciertos elementos esencialmente privados en el proceso de diseño, del mismo modo que en el ámbito paralelo de la estética también se suele considerar al menos la existencia de un núcleo privado e incomunicable de esta experiencia, por muy socialmente determinada que esté su génesis. No obstante, nuestro argumento sobre la representabilidad de los diseños nos lleva a considerar que la proposición fundamental es la tercera. Solamente existen diseños porque pueden ser representados los componentes intencionales del proyecto en un lenguaje que es público y que es, él mismo, el producto de técnicas y artefactos dirigidos a la representación.

Pues bien, este carácter público de los diseños es el que garantiza precisamente el sistema que a veces se somete a controversia, la “patentabilidad” de los diseños. Pues una patente es un acto normativo por el que se hace público un diseño.

Es cierto que el sistema de patentes es un sistema institucional que garantiza ciertos derechos adquiridos a través de la innovación. Es muy interesante a este respecto el origen del derecho de propiedad sobre un invento: se garantiza que un trozo de futuro pertenece al descubridor. Para ello el sistema de patentes debe garantizar públicamente algunas propiedades del diseño: que sea interesante y responda a un problema práctico, que estén expuestas las pautas esenciales para la construcción del artefacto, que el artefacto de hecho sea realizable y funcione. Se exigen, por último, referencias a otros artefactos y métodos existentes ya en el sistema social. La patente garantiza derechos, pero la patente solamente puede obrar si lo hace a través de un sistema completamente público de información. Lo que se patenta es, pues, el diseño: un objeto representacional que hasta el momento ha estado en un ámbito privado, pero que tiene en virtud de su expresión en un medio representacional un carácter abierto, escrutable y reproducible. La patente da fe de su carácter público y asigna un derecho al autor, pero al mismo tiempo garantiza el acceso a la información sobre el artefacto.

Si observamos cuidadosamente es un sistema jurídico similar al sistema normativo de publicaciones en el caso de la ciencia. Una publicación científica es un documento que tiene un carácter normativo y que está escrita en un lenguaje público, pero además que ha sobrepasado ciertos tests normativos de originalidad, relevancia y fiabilidad (aunque no, repárese cuidadosamente, de verdad). Mediante el acto de publicarlo en una publicación que tiene normas y está a cargo de personas competentes, los editores, la comunidad convierte esta publicación en

un documento, en un objeto que puede ser aducido como información, es decir, en un objeto de la esfera pública.

La apropiación o no, en el sentido de los incentivos que potencialmente pudieran obtenerse por el uso, es una cuestión diferente que está siendo debatida crecientemente. El debate, ahora sí, es claramente instrumental y de interés para las políticas públicas en el ámbito de la innovación y el desarrollo.

El punto esencial es, sin embargo, cuál es la esfera pública relevante en el caso de la tecnología. De acuerdo a ciertas instituciones, por ejemplo el Bureau of Patents and Trademark, muy probablemente esta esfera pública esté constituida por el sistema del código civil que regula las relaciones de mercado, pero quizás sea conveniente una segunda y más penetrante mirada: pues una invención tecnológica supone una apertura en el espacio de posibilidades.

El punto central de mi cuestión es ¿cómo podemos garantizar que el espacio de oportunidades se convierte en una parte de la esfera pública? Aquí nos encontramos con algunas situaciones un tanto extrañas, como podría ser el caso de alguien que sostuviera que el futuro es de quien lo entreve o hace posible a causa de su invento. O, por el contrario, puede debatirse si el futuro es algo que compete a todos y por consiguiente debe abrirse un espacio de discusión del diseño en todos sus niveles. Este tipo de cuestiones especulativas no responden aún a la pregunta de cómo es posible hacer que el futuro entre en la esfera pública. Las discusiones más habituales se refieren únicamente a las constricciones de orden moral que se imponen sobre los sistemas tecnológicos, pero la cuestión que sigue abierta es el de cómo puede desarrollarse un sistema de proyectos y diseños en la esfera pública.

6. Realizabilidad técnica en un mundo mal entendido

En los duros tiempos de la guerra fría, una buena parte del imaginario social expresado en las novelas, películas, etc., tenía que ver con las actividades de las grandes potencia para robarse unas a otras los planos de las armas barrocas que formaban parte de la carrera de armamentos. En *Cortina Rasgada*, de Alfred Hitchcock, Paul Newman encarna a un físico que es reclutado como espía para viajar al este y convertirse en el interlocutor de un profesor que ha resuelto un problema de balística intercontinental esencial para el desarrollo de las nuevas generaciones de misiles. La capacidad de los americanos para llevar a cabo la construcción de tales

amenazantes artilugios dependía de la resolución de un problema, creo recordar, sobre la estabilidad de un tipo de combustible: resuelto el problema, copiando la fórmula, el misil se convertía en una real amenaza que podía llegar a la existencia.

La idea de realizabilidad de los diseños nos conduce a la cuestión sobre las capacidades técnicas de una sociedad particular para hacer real la existencia de un artefacto hasta ese momento en estado puramente de posibilidad conceptual. La realizabilidad de un diseño es una clase particular de posibilidad: es una posibilidad accesible desde una situación dadas las capacidades técnicas de una cultura.

Pero no tenemos una buena aproximación más allá de lo intuitivo a lo que queremos expresar con la idea de “capacidades técnicas”. El ingeniero y profesor de métodos de ingeniería Billy Vaughn Koen²⁸ ha definido el método del ingeniero como “el uso de heurísticas para causar el mejor cambio en una situación pobremente entendida dentro de los recursos disponibles” (p. 94). Koen ha elaborado su propuesta desde la cercanía de su trabajo didáctico a la práctica de la ingeniería y merece la pena que tomemos muy en serio su definición aparentemente escéptica y alejada de toda visión utópica de la ingeniería: nos habla de una comprensión del ingeniero más parecida a la de un artesano que dispone de una caja de herramientas y de soluciones que a la imagen del arquitecto del universo que uno podría inferir de la idea de diseñador. El ingeniero no es omnisciente, no es desde luego omnipotente: hace lo que puede con los recursos técnicos y heurísticas a las que puede acceder desde su posición. Si entendemos en estos términos tan humanos el proceso de diseño, como un acudir al almacén de recursos para crear algo nuevo conceptualmente, y un volver a acudir para llevarlo a la práctica, entenderemos la realizabilidad como una senda bastante sinuosa, a veces no previsible, que nos lleva desde un boceto a un producto. Las capacidades técnicas serían entonces algo así como el almacén de recursos al que acudir para resolver un problema. En el almacén se archivan conocimientos prácticos, recetas, cacharros, instrumentos, otros proyectos y experiencias fallidas, etc.

Desde la perspectiva de las capacidades técnicas, una sociedad, una empresa, un laboratorio de diseño, puede entenderse entonces como un nudo en el que convergen habilidades, saberes operacionales, “experiencias”, en el más honesto sentido de la palabra, recursos, información, un cajón de sastre, en definitiva que

²⁸ B. W. Koen (2003), *Discussion on the method. Conducting the Engineer's Approach to Solving Problems*, Oxford, Oxford University Press.

nos permitiría si lo ordenásemos conjeturar con plausibilidad si seremos capaces o no de llevar a cabo una tarea. La realizabilidad, entendida así, tiene un aspecto subjetivo de confianza en la capacidad de un cierto complejo humano de realizar una transformación como la especificada en el diseño, y desde un punto de vista objetivo se traduce en que esa confianza esté fundamentada en la existencia real de recursos y de la habilidad para movilizarlos en orden al objetivo buscado.

La presencia de un diseño inquieta necesariamente, perturba la estabilidad del grupo. Aunque sea el más inocuo, la aparición de un diseño genera siempre un horizonte de expectativas en las que se mezcla el riesgo, la incertidumbre, el deseo y la esperanza. El paso de un problema a un diseño, de un diseño a un prototipo o modelo simulado y de un prototipo a un ejemplar útil es siempre un paso delicado que trasciende lo puramente ingenieril. El ingeniero tiene que saber que está modificando las trayectorias históricas, que se debe hacer responsable de lo que le toca y de todo lo que le toca, y por eso la realizabilidad debería dejar claras las esferas de responsabilidad. Pero lo inquietante o esperanzador de un diseño estriba en su realizabilidad, en que, en conjunción con las capacidades técnicas de una sociedad puede llegar a ser real y afectar radicalmente a las trayectorias históricas.

La actividad de diseñar convierte a la ingeniería en una actividad reflexiva de transformación del mundo. El diseño industrial, el diseño de nuevos instrumentos y artefactos, el diseño de objetos cotidianos, el diseño científicamente guiado de nuevos objetos, ha convertido la ingeniería en la profesión que más cambios ha introducido en la historia de la humanidad, aun por encima de la investigación científica. El diseño, como hemos examinado, es una actividad que existe en un medio representacional, público, que se sitúa en un mundo imaginario aún no real. Sobre los diseños recae la posibilidad de pensar y repensar los objetos antes de llevarlos a la existencia. El diseño se convierte así en el verdadero portador de la responsabilidad de los ingenieros y de la sociedad que los respalda. El objetivo de mi presentación ha sido hacer una llamada a pensar los diseños como depositarios de la responsabilidad, y hacerlo más allá de un impulso moralizador, estetizador, con la actitud reflexiva de quienes creen que la ingeniería es ya un modo de organizarnos para cambiar el mundo, para rediseñarnos a nosotros mismos y que, por ello mismo, debemos crear una esfera de asignaciones de responsabilidad a la misma altura y con la misma seriedad de la propia actividad ingenieril. Algún día humanistas e ingenieros dejarán de mirarse de lado, de temerse o despreciarse, y mirarán a la mesa de diseño, al ordenador para decir juntos: calculemos, reflexionemos, deliberemos.

LA INGENIERÍA, MOTOR DE CONOCIMIENTOS CIENTÍFICOS

José Luis Montañés

Universidad Politécnica de Madrid

Cada vez más frecuentemente se oyen voces críticas relativas a la actividad de la ingeniería. Incluso estas voces alcanzan al propio conocimiento científico tanto desde un punto de vista epistemológico como desde un punto de vista social, sustituyéndolo por misticismo e irracionalidad. Sokal y Bricmont¹, en su excelente *Imposturas Intelectuales* critican esta postura pseudointelectual, fruto del talante de la época, que se conoce como postmodernismo. Estos autores argumentan que en una sociedad desanimada, como la actual, la ciencia despierta antipatía y resulta un *blanco fácil* por su vinculación al poder establecido. En su análisis Sokal y Bricmont distinguen cuatro usos diferentes del término “ciencia”, uno de ellos es “la ciencia aplicada y la tecnología (con la que a menudo se confunde la ciencia)”; con referencia a éste añaden: “También es verdad que la tecnología tiene efectos contradictorios –en ocasiones desastrosos– y que en raras ocasiones aporta las soluciones milagrosas que sus defensores más entusiastas prometen a cada paso”, aunque a pie de página minimizan los aspectos negativos de su crítica diciendo “No obstante, hay que subrayar que, a menudo, la tecnología es censurada por algunos efectos que se deben más a peculiaridades de la estructura social que a ella misma”. En mi opinión, estos comentarios son buena muestra de la arrogancia, que a veces se observa en el mundo científico, respecto a la tecnología. A pesar de lo anterior, conviene reconocer que los resultados de la ingeniería pueden ser criticables desde una perspectiva ética, individual o social, mientras que la búsqueda del conocimiento no debería serlo en ningún caso. Como ejemplo de la dificultad de juzgar éticamente los resultados de la ingeniería, Sokal y Bricmont refieren el caso de la investigación en electrónica cuántica, llevada a cabo en los 40 y 50 que, motivada en gran parte por sus posibles aplicaciones militares, dio lugar al transistor y a las nuevas tecnologías de la información a las que éste se aplica.

¹ Alan Sokal y Jean Bricmont, *Imposturas intelectuales*, Ediciones Paidós Ibérica, S.A., 1999.

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

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

Ya Rankine abogaba por la investigación y la preparación de los ingenieros en las ciencias fundamentales. Cuando alguien le decía que un ingeniero práctico

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

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

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

En el período precientífico existieron, no obstante, hombres cuyas creaciones, buscadas y logradas de forma sistemática, permiten reconocerlos

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

Entre los ingenieros antiguos hay que mencionar, también a Heron de Alejandría, que describió un gran número de aparatos con poleas y ruedas

² Según Plutarco para Arquímedes cualquier tipo de acción relacionada con las necesidades diarias era innoble y vulgar (probablemente esta opinión puede ser el precedente del ninguneo de la actividad de la ingeniería por parte de la sociedad científica).

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

Los inicios de lo que actualmente se conoce como física van asociados, y con razón, a los nombres de Galileo y Newton. Estos no fueron solos meros descubridores de leyes o teorías sobre algún fenómeno físico particular, sino que fueron capaces de formular las leyes fundamentales que rigen los fenómenos mecánicos. No obstante, en la sociedad de su tiempo e incluso un siglo más tarde, las ciencias físicas no contaban con la notoriedad ni la relevancia social que poseen en la actualidad³. En efecto, la revolución del pensamiento científico, que Galileo y Newton protagonizaron, tuvo muy poco impacto en la mayoría de las universidades; ser científico era considerado poco más que un snobismo. Por otra parte, los practicantes de oficios y artesanos desarrollaban sus habilidades aprendidas en escuelas, usualmente patrocinadas por los gremios profesionales correspondientes y, por supuesto, separadas del ámbito universitario. Sin embargo, la necesidad de exigir responsabilidades a los dispensadores de ciertos servicios profesionales críticos hizo necesaria la tutela de los poderes públicos en la confección de los programas de enseñanza. De este modo, la sociedad pudo contar con ingenieros profesionales, a veces comisionados por el poder público, garantes de las labores técnicas, no triviales y de utilidad pública, realizadas por ellos o por otros a los que supervisaban.

En este marco y con la finalidad de fortalecer la tecnología industrial y militar francesa, la Convención Revolucionaria creó la *École Polytechnique* en el París de 1794. La principal característica de dicha institución emanaba de la creencia de sus fundadores de que la ingeniería debía estar profundamente

³ Spencer Klaw, *The New Brahmins: Scientific Life in America*, William Morrow & Co. Inc., 1968.

basada en las ciencias fisicoquímicas y en las matemáticas. Este hecho determinó el tipo de profesores empleados que fueron reclutados entre los científicos más prominentes de su tiempo. A partir de ese momento, los ingenieros entran en contacto con la investigación científica. Siguiendo las líneas de la *École Polytechnique*, esta corriente educativa pasó pronto a Alemania, donde las *Technische Hochschulen* desarrollaron rápidamente lazos con la industria alemana. Al mismo tiempo en las universidades alemanas se comenzó a valorar la actividad científica. Después de la Guerra Civil norteamericana, Estados Unidos se incorpora a este quehacer científico y algunos de sus estudiantes vinieron a Europa, a Alemania especialmente, atraídos por la fama de la ciencia que allí se desarrollaba. Se generalizó así la enseñanza de las ciencias en la ingeniería para afrontar con ventaja los problemas técnicos de una sociedad que se enfrentaba por primera vez a un desarrollo sin precedentes que exigía dar la respuesta adecuada en actividades tales como la extracción y transformación de las materias primas, la industrialización, la alimentación, y la arquitectura entre otras.

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

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

Mientras que el conocimiento científico se encuadra en un marco general de modo que cada nueva teoría contenga a las que la precedieron, la ingeniería propugna soluciones a problemas particulares, sin la exigencia de una generalización sistemática. La mecánica de Newton fue válida para cualquier sistema de referencia inercial independiente de la velocidad de los mismos hasta, que un fenómeno observable, como el de la constancia de la velocidad de la luz en cualquier sistema de referencia, vino a contradecirla; Einstein, poco después, formuló su teoría de la relatividad especial, y demostró la aplicabilidad de las transformaciones de Lorentz entre sistemas inerciales. La ingeniería, en cambio, en su búsqueda de soluciones a los problemas particulares que le ocupan hace uso frecuente de aproximaciones, simplificaciones, correlaciones y ensayos. El ingeniero, en su afán por simplificar, estructurar y facilitar su trabajo ha hecho un uso profuso de ábacos, prontuarios, reglas de cálculo y máquinas de calcular. No es de extrañar, por tanto, que el cálculo numérico, apoyado en la velocidad computacional y capacidad de memoria de los modernos ordenadores, se haya convertido en una de las armas más poderosas de la ingeniería actual. Se debe advertir, sin embargo, que los poderosos algoritmos y programas existentes no pueden sustituir al ingeniero en la búsqueda de soluciones a los problemas de la ingeniería.

No es menos ilustrativo, el estudio de la contribución de la ingeniería al desarrollo de los conocimientos científicos de los fenómenos relativos al calor, y a la electricidad y magnetismo. Aunque ambos fenómenos se conocen desde la antigüedad, su conocimiento y sus aplicaciones han seguido un desarrollo radicalmente distinto. Las sensaciones de calor y frío empezaron a cuantificarse

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

Por el contrario, el desarrollo del conocimiento y de las aplicaciones de la electricidad no siguieron las mismas pautas. En efecto, excepto en el caso de la pila de Volta, las aplicaciones sistemáticas de la electricidad comenzaron cuando ya se disponía de un extenso cuerpo de conocimientos científicos de los

fenómenos eléctricos. Innovadores de talla excepcional como von Siemens, Gramme y Tesla desarrollaron los sistemas de generación de energía eléctrica y los motores eléctricos, el descubrimiento del transformador por Gaulard permitió un transporte económico de la misma, y Edison ideó un sistema de alumbrado limpio y seguro. Finalmente, las realizaciones de Bell y Marconi abrieron el área de las comunicaciones.

Históricamente, muchos de los desarrollos y realizaciones de la ingeniería han ido por delante del conocimiento científico establecido recurriendo al empirismo en caso necesario. Como se ha comentado anteriormente, la dificultad intrínseca de las ecuaciones de Navier-Stokes, que modelizan el comportamiento de los fluidos, hace que la ingeniería de fluidos haya hecho un uso intensivo del ensayo experimental. En estos casos, es fundamental, debido al coste de los ensayos, reducir el número de los mismos para lo que el análisis dimensional y la semejanza dinámica se hacen imprescindibles. Reynolds estableció que, para velocidades pequeñas comparadas con la velocidad del sonido, los movimientos de los fluidos están gobernados por un único parámetro adimensional (después llamado número de Reynolds) y, por tanto, si se mantiene constante este parámetro, el movimiento que se obtiene es el mismo independiente de las características del fluido y del ensayo a tratar. Un ejemplo de la no trivialidad de este tipo de análisis, incluso para la comunidad científica de principios de siglo XX, lo describe la siguiente experiencia que relata von Karman⁴ y que, por su interés, copio literalmente su traducción al español:

“En 1911 un afamado fisicoquímico alemán, Emil Bose, publicó un trabajo con muy cuidadosas medidas sobre la caída de presión, en distintos tubos, de varios líquidos orgánicos. Empleó aparatos idénticos para todos ellos y midió el tiempo necesario para que iguales volúmenes de los diferentes líquidos corrieran a través del mismo tubo, determinando las correspondientes diferencias de presión sobre los extremos de éste. Comparando los resultados para distintos líquidos, halló que el cloroformo, por ejemplo, es menos viscoso que el agua a velocidades bajas, pero se comporta casi lo mismo que el agua a velocidades mayores; el bromoformo es más viscoso que el mercurio a velocidades bajas, pero resulta ‘menos viscoso’ que el mercurio a velocidades altas. Evidentemente ‘menos viscoso’, en este caso, significa que es necesaria una diferencia de

⁴ Theodore von Kármán, *Aerodinámica*, INTAET, 1954.

presión más pequeña a la misma velocidad de corriente. Sugerí el empleo del número de Reynolds como parámetro –definido como la velocidad media multiplicada por el diámetro del tubo y dividida por la velocidad cinemática–, y se vio que las formulas que propuso Bose para representar sus resultados experimentales con nueve líquidos podían unificarse en una sola formula. Lo que prueba no tanto lo correcto de la ley de semejanza, que no necesita prueba experimental, sino la exactitud de las medidas de Bose”.

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

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

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

A pesar de su modernidad, la ingeniería aeronáutica ha hecho un uso intensivo y sistemático del ensayo experimental para extraer conocimiento. Por ejemplo, los hermanos Wright, pioneros de la ingeniería aeronáutica consiguieron realizar los primeros vuelos propulsados, en Kitti Hawk en 1903, después de medir las características de los perfiles aerodinámicos a partir de ensayos realizados en un túnel aerodinámico diseñado y construido por ellos

mismos. El éxito de sus vuelos despertó el interés de científicos e ingenieros por la ciencia aerodinámica lo que condujo a un desarrollo rápido y espectacular de sus fundamentos básicos y resultados prácticos. No obstante, el progreso del vuelo propulsado ha necesitado disponer de plantas de potencia adecuadas. La falta de un medio adecuado de propulsión, independientemente de otros problemas, impidió el vuelo de la máquina concebida para tal fin por Leonardo da Vinci. Los hermanos Wright tuvieron que desarrollar su propio motor de 12 CV antes de afrontar con éxito su primer vuelo por ser excesivamente pesados los motores de combustión interna existentes en su tiempo. El desarrollo de motores más grandes y eficientes posibilitó el vuelo de aeronaves mayores, más rápidas y capaces de volar a mayor altura.

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

El desarrollo de un proyecto competitivo de un motor de reacción para una aeronave o vehículo espacial es una de las tareas más desafiantes en ingeniería. Las actuaciones de una aeronave o vehículo espacial son tan sensibles a las reducciones de dimensión, peso y consumo de combustible de sus motores, que se requiere que el rendimiento de cada uno de sus componentes esté por encima de un valor umbral.

Para lograrlo fue necesario recurrir a disciplinas tales como: aerodinámica, termodinámica, control, materiales, vibraciones y aeroacústica, combustión, transmisión de calor, lubricación, instrumentación, fabricación e inspección.

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

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

claro ejemplo de desarrollo industrial de un país y sitúa a sus empresas en una posición ventajosa. Conviene destacar que este carácter del desarrollo tecnológico ha restado protagonismo al ingeniero. La empresa y no el ingeniero que trabaja para ella es la que desarrolla y detenta el conocimiento tecnológico. Contrariamente al ingeniero, el científico sigue, en la actualidad, siendo el verdadero protagonista del desarrollo del conocimiento científico.

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

Como se ha mencionado, el precedente de este modo de hacer es la *École Polytechnique*. Así, bajo los auspicios del Comité de Salud Pública se creó una Comisión de Trabajos Públicos que daría origen a la creación de la *École* en 1794 bajo la dirección de Monge y Fourcroy. Se instaló en el Palais-Bourbon, sus profesores fueron seleccionados entre los científicos más destacados y sus alumnos eran reclutados por concurso en toda Francia. En 1795, se le agregó el adjetivo *Polytechnique* con la misión de conferir a sus alumnos una sólida formación científica, apoyada en las matemáticas, física y química, y formarlos para entrar en las escuelas especiales de los servicios públicos del estado. El impacto de esta Escuela se puede apreciar en la lista de nombres ilustres que salieron de sus aulas: Poisson, Biot, Fresnel, Gay-Lussac, Arago, Cauchy, Comte, Poincaré, Becquerel, Clapeyron, entre otros muchos. De nuevo, la

ingeniería fue motor del conocimiento científico y, desde entonces, ha seguido siendo su principal mecenas. Tras muchos avatares, después de pasar por academia militar, en la actualidad sigue siendo una de las instituciones de enseñanza técnica más prestigiosa del mundo. Parte del éxito de la *École Polytechnique*, así como de otras muchas que la tomaron por modelo, es debido al sistema de selección de sus estudiantes; se puede definir como un sistema elitista, en donde entran los que mejor resultado han obtenido durante una formación preparatoria. Para dar una idea del carácter de exclusividad analicemos las siguientes cifras correspondientes a la actualidad: 800000 personas nacen en Francia en un año; 480000 pasan el Bachillerato; 120000 de ellos siguen la opción científica; de los cuales 13000 –con muy buenos resultados académicos– son admitidos en el Preparatorio (estudios especiales para competir en los exámenes de entrada de las *Grandes Écoles*); pues bien la *École Polytechnique* recluta sus estudiantes de primer curso entre los mejores de ellos.

Si este ingeniero, de amplia formación científica, cuyos orígenes se remontan al siglo XVIII sigue hoy vigente es una cuestión respuesta delicada. Aun para los que creemos en los valores de ese modelo de ingeniero y de su enseñanza, es indudable que la sociedad occidental demanda su revisión crítica. En particular, el abandono de los procesos de selección para permitir el acceso a la Universidad de grandes masas de estudiantes, que los poderes públicos tratan de satisfacer con mejor o peor fortuna, parece incompatible con la formación elitista del modelo anterior; la preocupación por el grado de conocimientos adquiridos durante el período de formación pasa así a un segundo plano. No podía de ser de otra forma ya que nuestro sistema universitario ha pasado de atender a 330000 alumnos en 1970 a casi 1,6 millones en el año 2000 de los cuales el 12,5% han optado por ingenierías⁵. Para muchos, los contenidos científicos cuya adquisición requiere mayor esfuerzo están bajo sospecha y su necesidad ha sido puesta en tela de juicio. Con independencia de lo anterior, la adecuación de los conocimientos científicos del ingeniero a su realidad profesional es imprescindible. Al igual que Landau estableció, en su tiempo, los conocimientos matemáticos mínimos requeridos para la formación de un físico,

⁵ M^a Jesús Sansegundo, “El sistema universitario español en una perspectiva internacional”, capítulo 2 de la publicación de la CRUE *Información académica, productiva y financiera de las universidades públicas de España*, 2002.

el cambio drástico que está experimentando la ingeniería en la actualidad requeriría también establecer la formación físico-matemática mínima imprescindible en el patrimonio intelectual de los ingenieros.

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

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

Ante esta diversidad en las necesidades de la ingeniería no parece razonable dar una única respuesta. En este sentido, la ingeniería anglosajona parece más adaptada a la demanda actual ya que en su sistema han convivido tipos diferentes de ingenieros. Desde aquellos cuya formación estaba basada fundamentalmente en la práctica hasta otros, como los graduados en el *Imperial College* o en el MIT, con una sólida formación científico-técnica. Es conveniente

notar que la ingeniería francesa está abriendo actualmente el abanico de posibilidades en la formación de sus ingenieros al introducir diferencias en los contenidos científico-técnicos y en la especialización de éstos para su mayor adecuación a las nuevas tareas profesionales.

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

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

EL PAPEL DE LA TÉCNICA EN EL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO

José Ferreirós

Universidad de Sevilla

Antes de comenzar, no me quedo tranquilo sin comentar una obviedad. Fui invitado a participar en este curso como representante de la filosofía, y el título del mismo, “Ingeniería y pensamiento”, podría dar a entender que “por tanto” represento al “mundo del pensamiento”, como suele decirse. Pero naturalmente que el pensamiento no es patrimonio de la filosofía, ni habita sólo entre los literatos. La facultad de pensar no se adjudica burocráticamente, no depende de un título de licenciado, sino que es característica de los humanos en general. Se encuentra tanto entre los filósofos como entre los ingenieros y los científicos, y de la misma manera: en algunos magníficamente, en otros de forma escasa¹. Si entiendo bien al profesor Aracil, el sentido del título es que el hacer es siempre anterior al pensar, y simplemente existen actividades importantes (como la ingeniería) sobre las que *reflexionamos* poco, aunque las *practicamos* mucho y bien. Los que trabajamos sobre filosofía de la técnica y de la ciencia podemos aportar algo, dentro de nuestras limitaciones, a esa tarea de reflexión. Entendidas así las cosas, de acuerdo: vayamos pues al grano.

1. Introducción

Para centrar el tema, empezaré discutiendo lo que se ha llamado el “modelo lineal” respecto a las relaciones entre conocimiento y progreso social². Este modelo tiene sin duda orígenes en la Ilustración, y probablemente antes, pero sobre todo caracterizó las políticas científico-técnicas hasta mediados del siglo

¹ Me atrevo a decir que se puede ser muy bueno usando microscopios, o ser un experto en la obra de Kant, y pensar más bien poco.

² Un libro sencillo pero serio donde puede encontrarse información a este respecto es el de J. Ziman, *Introducción al estudio de las ciencias* [sic; el título original es *An Introduction to Science Studies*], Barcelona, Ariel, 1986.

XX; sin embargo, es muy insuficiente por varias razones. La idea es tan simple como lo siguiente: si el político desea producir progreso socio-económico, sólo debe preocuparse de fomentar la investigación científica; los avances científicos “darán frutos” de por sí, se transmitirán de forma casi automática al mundo de la técnica y al de la industria, acabando por afectar a la sociedad en su conjunto (ver figura 1). Es una visión que expresaba con toda claridad Ramón y Cajal ya en un artículo de 1898 donde reaccionaba al desastre de aquel año proponiendo remedios a los males de la nación:

Hay que crear ciencia original, en todos los órdenes del pensamiento: filosofía, matemáticas, química, biología, sociología, etcétera. Tras la ciencia original vendrá la aplicación industrial de los principios científicos, pues siempre brota al lado del hecho nuevo la explotación del mismo, es decir, la aplicación al aumento y a la comodidad de la vida. Al fin, el fruto de la ciencia aplicada a todos los órdenes de la actividad humana es la riqueza, el bienestar, el aumento de la población y la fuerza militar y política³.

Como vemos, se plantea aquí la simple idea de una cascada descendiendo bajo la acción de la gravedad, presuponiendo una jerarquía en la que la ciencia se sitúa arriba, y un automatismo en la aparición de desarrollos técnicos e innovaciones industriales. Para controlar el sistema y regular sus rendimientos, basta controlar el polo científico. No hay que pensar demasiado, ni saber mucha historia (aunque conocer la española ayuda), para darse cuenta de que el modelo lineal presupone demasiado: presupone sociedades similares a la británica en los siglos XIX y XX, y fracasa estrepitosamente cuando se aplica a sociedades con tejidos empresariales o actitudes respecto a la técnica muy diferentes.

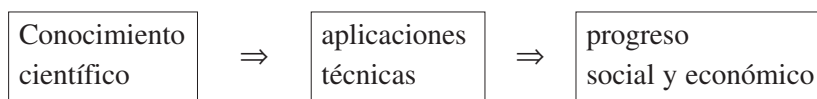


Figura 1. El “modelo lineal”, o mejor, unidireccional de investigación y desarrollo.

³ Santiago Ramón y Cajal en *El Liberal* del 26/10/1898, citado en J. M. Sánchez Ron, *Cinco, martillo y piedra. Historia de la ciencia en España (siglos XIX y XX)*, Madrid, Taurus, 1999, p. 174. Cajal terminaba diciendo: “Hemos caído ante los Estados Unidos por ignorantes y por débiles, que hasta negábamos su ciencia y su fuerza. Es preciso, pues, regenerarse por el trabajo y el estudio”.

Hoy sabemos que los diferentes elementos de la Fig. 1 interaccionan, pero que son autónomos y no pierden esa autonomía por más que se desarrolle el proceso. Conviene además pensarlos como elementos no jerarquizados, de manera que el control socio-político debe intervenir a los tres niveles. Esto da lugar a un modelo de realimentación ciencia-tecnología-industria, que es precisamente lo que significa la expresión que ha estado de moda en los últimos años: el hablar de *I+D+i*. Quiere decirse que para obtener progreso económico y social (dos cosas que, por cierto, no son idénticas) hay que estimular tanto la *investigación* científica (laboratorios y centros de investigación) como el *desarrollo* técnico (escuelas de ingeniería, laboratorios técnicos) y también, sobre todo en países como el nuestro, la introducción de *innovaciones* a nivel empresarial. En el caso español, como venimos repitiendo en las últimas décadas, es sobre todo este tercer eje el que falla, y todo el mundo sabe que un trípode al que se le quita una pata... cae.

En lo que sigue vamos a ver cómo la autonomía y la interacción entre conocimiento y técnica se muestran ya en el propio trabajo de los científicos. Cómo hay una constante realimentación, en bucles cada vez más sofisticados, que se expresan también en las interacciones actuales entre científicos e ingenieros. Basta pensar en los macroproyectos de la llamada *big science*, cosas como el Proyecto Genoma Humano o los aceleradores del CERN en Ginebra, o como la Estación Espacial Internacional. La prensa y la televisión nos venden todo esto como triunfos de la ciencia, pero son en realidad expresiones de la colaboración entre ciencia, ingeniería e industria (sin olvidar al convidado de piedra: el estamento militar). En el laboratorio europeo de física de partículas, el CERN, que es el más grande del mundo, existe una plantilla fija de casi 3.000 personas, los cuales representan una amplia gama de profesiones, incluyendo por supuesto administradores, secretarios y obreros, pero sobre todo físicos e ingenieros. Sin la colaboración estrechísima entre física e ingeniería, nada de lo que hace el CERN sería posible⁴.

⁴ Para cada experimento en particular, esta gente trabaja con especialistas de todas partes del mundo, hasta sumar (según la información disponible hoy) unos 6.500 físicos de partículas de más de 80 países. Puede verse el libro *History of CERN* por A. Hermann *et al.* (3 vols., Amsterdam, North Holland, 1987, 1990, 1996).

Por cierto que en su página web (www.cern.ch) el CERN se anuncia también, con toda razón, como el lugar donde nació el *world wide web*, basado en el protocolo *http* que inventó en 1989 el ingeniero Tim Berners-Lee. Curiosamente, las páginas del CERN, al describir este importante invento del que se sienten muy orgullosos, hablan de Berners-Lee como un “científico”: ¡cuestión de imagen! Enseguida volveremos sobre esta imagen popular de la ciencia y la técnica.

Conviene, antes de proseguir, realizar una última aclaración sobre el sentido en que voy a emplear la palabra “técnica”, que, de nuevo siguiendo a Aracil, preferiremos usar en general en lugar del anglicismo “tecnología”. Es una constante en el lenguaje humano la tendencia a ampliar más y más el uso de las palabras, sobre la base de analogías mejor o peor fundadas. Esto lleva a expresiones que pueden sonar paradójicas a los expertos, como cuando se habla de la “filosofía” de un grupo industrial, o de la “lógica” de lo social o, incluso, de las emociones. Del mismo modo, a menudo oímos hablar de “tecnologías” sociales o de “técnicas” empresariales, pero yo me voy a resistir conscientemente a estos usos analógicos.

Cuando hablo de *técnica* me refiero ante todo a la creación de artefactos, la fabricación de objetos útiles al ser humano (desde el arado al bolígrafo y el ordenador), y secundariamente me refiero también a las habilidades necesarias para su manipulación, tanto personales como colectivas. Por costumbre y tradición solemos entender que esos artefactos son objetos inanimados, pero nada impide incluir a seres vivos como el maíz y los animales domésticos (que son tan “naturales” como “artificiales”, mostrando las limitaciones de esta dicotomía) o los ratones transgénicos.

2. Historia de dos prejuicios (parte I)

A la hora de pensar la ciencia, es muy importante superar dos prejuicios que están enormemente extendidos. Los introduciremos a base de ejemplos. El primer ejemplo viene al caso debido a aniversarios y decesos, pero podrían haberse elegido muchos otros. Hace poco se celebró el medio siglo del descubrimiento científico más importante del siglo XX. Sucedió en 1953, y dio lugar al premio Nobel de 1962, otorgado a Watson y Crick: todo el mundo sabe que estoy hablando de la estructura en doble hélice del DNA. Pero lo cierto es

que el premio Nobel fue para tres personas: los dos mencionados y Maurice Wilkins (1916-2004), un científico que trabajaba en Londres, cuyo nombre es desconocido para la inmensa mayoría de la gente⁵. Hay también una cuarta persona que realizó una contribución central al descubrimiento de la estructura de DNA, Rosalind Franklin (1920-1958), que seguramente hubiera sido la cuarta recipiente del Nobel de no ser porque ya había muerto, y el premio se otorga sólo en vida⁶.

Hay dos razones fundamentales por las que Watson y Crick se han llevado la fama, mientras Franklin y Wilkins son los grandes olvidados. La primera razón es de pura simplicidad, un motivo pedagógico. El *modelo* de la doble hélice lleva el nombre de Watson y Crick, que lo propusieron en un artículo de *Nature*, y la mayor parte de la gente se limita a estudiar este modelo superficialmente; así que todos nos encontramos con sus nombres, pero no con los otros. La labor de Franklin y Wilkins fue fundamental para establecer la base experimental que sirvió para crear y para confirmar el modelo de la doble hélice; fueron trabajos muy cuidadosos en laboratorio, realizados mediante difracción de rayos X. Y aquí está la segunda razón de su olvido: Franklin y Wilkins eran experimentadores, mientras que Watson y Crick desempeñaron el papel de teóricos.

Nuestra memoria de la ciencia pasada está sesgada muy claramente a favor de los teóricos y en contra de los experimentadores y observadores. Los ejemplos se podrían multiplicar: Kepler frente a Brahe, Newton frente a Hooke, etc. También han estado sesgadas en este sentido la filosofía de la ciencia y la historia de la ciencia, hasta tiempos muy recientes⁷. La filosofía de la ciencia se ha ocupado tradicionalmente de las teorías, sin prestar atención a la experimentación, sus problemas y su epistemología. La historia de la ciencia ha sido, hasta hace pocos años, historia de los conceptos científicos y su evolución, prestando poca atención a los instrumentos, etc.

⁵ Las fechas de Francis Crick son también 1916-2004; murió el pasado 28 de julio.

⁶ Sobre el DNA puede verse el entretenido libro de Watson, *La doble hélice* (Barcelona, Salvat, 1989) junto con los comentarios en la obra de Crick, *Qué loco propósito: una visión personal del descubrimiento científico* (Tusquets); y el estudio histórico de R. Olby, *El camino hacia la doble hélice* (Madrid, Alianza, 1991).

⁷ Véase J. Ferreirós y J. Ordóñez, "Hacia una filosofía de la experimentación", *Crítica* 34 (2002) n° 102, 47-86, y el número especial "Theoria experimentorum" de la revista *Theoria* 17 (2002) n° 44. Un clásico y pionero del tema es el libro de I. Hacking, *Representar e intervenir* (Barcelona, Paidós/UNAM, 1996; orig. de 1983), así como D. Gooding, *et al.*, *The uses of experiment* (Cambridge Univ. Press, 1989).

Llamaré a esto el *prejuicio intelectualista*. Es un prejuicio muy arraigado en nuestra cultura occidental: lo intelectual, lo propio de la mente o el alma, es superior a lo práctico o material. Sus orígenes son múltiples, entroncando por supuesto con las ideas religiosas más extendidas, pero todo el mundo está de acuerdo en que un origen clave se remonta a los antiguos griegos, a personajes como Platón. Los griegos que más han influido en la Europa cristiana tuvieron una ideología muy marcada, favorable a lo teórico y lo contemplativo, contraria a todo lo que fuera actividad práctica o técnica, “mancharse las manos”. Marx ya enfatizó la relación entre esas actitudes y la estructura socio-económica de la sociedad griega: era una sociedad esclavista, donde la técnica y las tareas prácticas eran cosa de esclavos, mientras que los ciudadanos libres se dedicaban a la política, la matemática, la filosofía y la guerra⁸.

Este elitismo de lo contemplativo se ha reiterado luego en momentos muy importantes de nuestra historia: podemos mencionar a filósofos como Agustín de Hipona, quien “cristianizó” a Platón allá por el siglo V; a científicos como Newton en el XVII, intelectuales como W. von Humboldt en el XIX, incluso científicos y filósofos del siglo XX como Popper, y un largo etcétera. El efecto acumulativo de los siglos que ha perdurado esa actitud es una deformación de la imagen de la ciencia, que a veces nos resulta difícil percibir dado lo mucho que el prejuicio nos ha sido inoculado. Incluso hoy, cuando el péndulo se ha desplazado y el prejuicio más extendido es exactamente el contrario, siguen teniendo enorme presencia las implicaciones más sutiles del intelectualismo.

En realidad, la ciencia moderna siempre se ha opuesto a dicho prejuicio, pero “la ciencia” no es una persona, sino una representación abstracta que nos hacemos del colectivo de los científicos y de sus aportaciones. La ciencia no tiene una única voz. Como el intelectualismo era tan persistente y difícil de erradicar, las quejas se han reiterado una y otra vez. Daré dos ejemplos. En 1638 Galileo publicó su libro más importante, *Consideraciones y demostraciones matemáticas en torno a dos nuevas ciencias*⁹, donde proponía sus famosas ideas en mecánica (la ciencia del movimiento) y donde –por cierto– trataba también de desarrollar la ciencia de la resistencia de materiales. El diálogo comenzaba

⁸ En efecto, las únicas artes prácticas dignas de un hombre libre eran las artes militares. Un detalle en el que no suele pensarse, pero que merece una buena reflexión.

⁹ Madrid, Editora Nacional, 1976.

con un canto a la intensa actividad técnica desplegada en el “famoso Arsenal” de Venecia, y enfatizaba el “gran campo para filosofar” que esas actividades ofrecen “a los intelectos que especulan”. Galileo recomendaba hablar con los artesanos para descubrir nuevos problemas y nuevos efectos naturales; fue así como empezó a andar el camino que llevaría a su discípulo Torricelli a descubrir la presión atmosférica, y a la invención del barómetro.

Pero a la voz de Galileo se opusieron muchas otras, y aunque los ilustrados fueron eminentemente utilitaristas, transmitiendo sus ideas a través de la célebre *Enciclopedia* y muchas otras obras, luego vendría la época romántica con su retorno a los viejos ideales. Ya en el siglo XIX, la Universidad alemana, que marcó el camino hacia las universidades de hoy, fue también el mayor foco de propagación de la ideología purista e intelectualista¹⁰. Mientras, los británicos fueron los partidarios más declarados de lo útil. Un ejemplo llamativo es el de William Thomson, Lord Kelvin, quien no sólo realizó contribuciones muy importantes a la física, sino también al tendido de cables submarinos de telégrafo y al desarrollo de la ingeniería eléctrica como profesión. Kelvin escribió:

No puede haber un error mayor que el de contemplar con desdén las aplicaciones prácticas de la ciencia. El alma y la vida de la ciencia está en su aplicación práctica¹¹.

Pero evidentemente esto no zanjó la cuestión, ni siquiera entre los anglosajones. Por poner un último ejemplo, el célebre físico norteamericano Albert A. Michelson (1852-1931) le reprochaba a un discípulo suyo el entrar a trabajar en un laboratorio industrial después de acabado el doctorado, diciéndole nada menos que al hacerlo estaba “prostituyendo [su] formación y [sus] ideales”¹².

Cuando pensamos en la ciencia, normalmente nos viene a la mente la idea de unas teorías perfectamente organizadas y sistematizadas. Sin duda, esto responde a que la mayoría de la gente, incluso con una considerable formación científica, la ha recibido estudiando manuales que tratan de presentar esas teorías

¹⁰ Sobre este tema puede verse J. M. Sánchez Ron, *El poder de la ciencia* (Madrid, Alianza, 1992).

¹¹ De un discurso ante la Institución de Ingenieros Civiles británica en 1883, recogido en *Popular Lectures and Addresses* (3 vols., Londres, 1891).

¹² Frank Jewett, que sería jefe de los Laboratorios Bell, citado en S. R. Weart, “The rise of ‘prostituted’ physics”, *Nature* 262 (1976), 13-17. Michelson es célebre por sus experimentos de precisión, realizados en parte con Morley, que allanaron el camino hacia la teoría de la relatividad especial.

de la manera más rápida y clara. El objetivo de estos manuales es comunicarnos bien los *resultados*, pero no enseñarnos *cómo* esos resultados se obtienen. Son muy pocos los que han llegado a tomar contacto directo con el mundo de la investigación, de ahí que la idea habitual sea la fría imagen de la ciencia como producto elaborado completo, y no la imagen de la ciencia en desarrollo, en acción, en caliente¹³. Pero basta asomarse a un departamento o un laboratorio y realizar un recuento para darse cuenta de que el conjunto de los experimentadores supera siempre con mucho al de los teóricos, ya sea entre los físicos, entre los biólogos, o donde queramos.

Para comprender qué es la ciencia y cómo se elabora, es preciso por tanto librarse de la tradicional imagen de la ciencia *como teoría*. Sin duda los científicos van formando conceptos, principios y teorías, pero la mayor parte de su tiempo se dedica a obtener datos fiables, a perfeccionar los cálculos y los experimentos, a medir y a verificar si los datos y las predicciones encajan, etc. En los últimos veinte años, la corriente que algunos llaman *nuevo experimentalismo* ha surgido dentro de la filosofía de la ciencia para reclamar atención a las actividades de observación y experimentación (ver nota 7). También los historiadores han reclamado mayor atención a los instrumentos y los experimentos¹⁴. A mí particularmente me gusta decir que debemos concebir la ciencia *como actividad*, y que en una primera aproximación es el producto de una dinámica bipolar, de la *interacción entre dos fases*: la actividad teórica y la actividad experimental. *Cada una de ellas* tiene sus reglas y normas, su metodología y su epistemología; si renunciamos a entender una de ellas, como hizo la filosofía de la ciencia tradicionalmente, no podremos entender el conocimiento científico.

El método hipotético-deductivo (ya sea en versión falsacionista o verificacionista) nos da una buena aproximación a cómo se relacionan los productos de una actividad (teorías) con los de la otra (datos). Pero ese pobre esqueleto lógico, pese a sus virtudes, se queda muy lejos de comenzar a

¹³ Este ha sido un tema de moda entre los sociólogos de la ciencia; un libro muy bueno a este respecto es el de B. Latour, *Ciencia en acción: cómo seguir a científicos e ingenieros a través de la sociedad* (Barcelona, Labor, 1992).

¹⁴ Un trabajo pionero en esta dirección es el de J. Heilbron, *Electricity in the 17th and 18th Centuries* (University of California Press 1979), y también el de P. Galison, *How experiments end* (Univ. Chicago Press, 1987).

explicarnos de dónde proviene la peculiar fiabilidad de los productos que ofrece la actividad científica. Todo esto es algo que podríamos y deberíamos enseñar cuando enseñamos ciencia a nuestros estudiantes, ya sea en la Universidad o en el Bachillerato. Y una de las mejores metodologías para hacerlo es darles a conocer la historia de la ciencia, analizar con detalle cómo se obtuvieron algunos grandes avances científicos, desmenuzando los detalles de la metodología, de la formación de teorías y de la producción de datos fiables¹⁵.

Decir que la ciencia es el resultado de la interacción entre teorizar y experimentar (o en su caso observar) es una obviedad. Pero quizás pensar las implicaciones de esta idea sea menos obvio. Entre otras cosas, porque nos conduce a la conclusión de que la técnica está en el corazón mismo del trabajo científico, más de lo que tradicionalmente se ha pensado.

3. La fábula de la ciencia

Contaré aquí una bonita historia que, pese a estar demasiado simplificada, condensa buena parte del proceso por el que surgió la sofisticada actividad que llamamos ciencia. En el proceso de hominización, durante el último millón de años, tuvo un papel central el desarrollo de dos tipos de capacidades en el hombre: capacidades simbólicas y capacidades productivas; el manejo de las palabras y el de las herramientas. Las primeras servían para sostener una vida social cada vez más compleja, las segundas para permitir el desarrollo de la técnica, la manipulación y fabricación de artefactos. Ambos procesos establecieron la presión selectiva que hizo que los cerebros del género *homo* se hicieran cada vez más voluminosos. Esas dos capacidades fundamentales encerraban el potencial de combinarse de maneras muy sofisticadas, originando una inmensa sinergia, pero esto tardaría en llegar cientos de miles de años. Sólo con la invención de la ciencia moderna, allá por 1600, se establecerá una unión altamente efectiva de ambas.

La capacidad productiva se fue perfeccionando a través de diversas revoluciones técnicas interrelacionadas: va surgiendo el dominio del fuego, la agricultura, los minerales y los metales. Mientras, la capacidad simbólica alcanzaba su expresión más alta con los mitos: los mitos griegos de Homero, los

¹⁵ Un libro que presenta ejemplos sencillos, pero muy bien estructurado, es el de R. Giere, *Understanding scientific reasoning* (Harcourt Brace Jovanovich, 1997).

mitos hebreos del Génesis, etc. Pocos siglos antes de nuestra era, con los griegos, surgen novedades enormes en el uso de la palabra y la escritura: la escritura alfabética, origen de toda una revolución cultural e intelectual; la argumentación crítica, la demostración matemática basada en diagramas, y por fin la lógica. A través de esta revolución, los mitos se transforman radicalmente, surgiendo las teorías en sentido estricto: es el paso del mito al *logos*, el nacimiento de la teorización filosófica. Paralelamente, y en parte por las mismas razones –demostrar es la contrapartida de argumentar–, surgen las matemáticas deductivas.

Pero los griegos, aunque hicieron algunas observaciones y experimentos sumamente ingeniosos, no llegaron a practicar la ciencia en el sentido moderno. Les faltaba emplear sistemáticamente el *método experimental*, como se decía en el siglo XVII. En parte, esto se debió a la actitud negativa hacia la técnica y la idea de una separación radical entre lo natural y lo artificial (aquí la referencia clásica es Aristóteles). Estas ideas cambiaron allá por el Renacimiento, en parte debido al impacto de las revoluciones técnicas ocurridas en la Baja Edad Media (con el reloj mecánico, invento del siglo XIII, como mayor exponente), en parte al difundirse la idea de que, siendo el hombre *también* parte de la naturaleza, difícilmente sus obras pueden ser algo radicalmente opuesto a lo natural. Es sólo a partir del Renacimiento que aquellas formas superiores de las capacidades simbólicas, nacidas en Grecia, encuentran una combinación sumamente ingeniosa y potente con las capacidades técnicas disponibles: nace la ciencia moderna.

Todavía en el siglo XVII, “ciencia” era una palabra de muy amplio uso, aplicable tanto a la mecánica como a la teología. Lo que nosotros llamamos ciencia tenía otro nombre: *filosofía experimental*, el estudio de la “filosofía natural” por medio de la experimentación. Una reflexión sobre el sentido de esta expresión nos pone ante la ciencia moderna como híbrido de filosofía, matemáticas y técnica. De la filosofía heredó la argumentación lógica y las teorías, el esfuerzo por dar explicaciones causales; estos elementos se combinaron de una manera sumamente ingeniosa con las ideas matemáticas disponibles en la obra de personajes como Kepler, Galileo, Descartes o Newton. Pero todo ello se sustentó sobre el recurso constante a la observación y la experimentación, cuya base (como veremos en la sección 5) era la técnica; en esto insistirían hombres como Bacon, Boyle, Locke y Newton. Surgió así un híbrido sumamente bien logrado, la ciencia moderna, como una mixtura magnífica, más poderosa que cualquiera de sus ancestros (técnica, filosofía, matemáticas).

4. Historia de dos prejuicios (parte II)

Como ya he adelantado, el viejo prejuicio intelectualista ha perdido casi toda su fuerza a lo largo del siglo XX (aunque algunas de sus consecuencias sigan siendo aceptadas acríticamente). Esto se debió al impacto cada vez mayor de la industrialización, y en buena medida también a que EE.UU. ha acabado dominando la escena internacional: el ambiente cultural al otro lado del Atlántico era muy distinto del europeo ya hacia 1900, y los norteamericanos se han caracterizado siempre por su utilitarismo y su “entusiasmo tecnológico”¹⁶. A lo largo del siglo XX, los cambios políticos, las guerras, el desarrollo económico y la globalización han difundido por todo el planeta esa forma de pensar. Con esto ha llegado el imperio del *prejuicio utilitarista*, que afecta sobre todo a los políticos y al ciudadano medio.

La confusión entre ciencia y técnica es un aspecto típico de la cultura actual, consecuencia de lo anterior y de otros motivos. Hoy, en la prensa y la televisión, las exploraciones de Marte se presentan puramente como un éxito de la ciencia, como si no tuvieran una inmensa carga técnica e ingenieril (o peor, como si interesase ocultar esa carga). Lo característico de los megaproyectos científicos de finales del siglo XX (la llamada *big science*) es la fusión entre aspectos técnicos y científicos, entre el interés por el conocimiento y el interés por desarrollar la tecnología. Pero la NASA, el CERN y tantos otros organismos o proyectos prefieren sistemáticamente borrar la frontera entre ambas cosas. Los profesores de enseñanza básica colaboran al presentar a Marconi o a Bell como hombres de ciencia, al teléfono o internet como grandes avances científicos.

Bien es verdad que las formas de fusión entre ciencia y técnica no dejan de aumentar, y que además las diferencias metodológicas no son radicales. Puede haber diferencias más o menos claras en casos normales: por ejemplo, la inexistencia de actividades de diseño en el trabajo científico (salvo el diseño experimental, que no es poca cosa); o la inexistencia de novedades cognoscitivas en el trabajo de ingeniería (salvo habitualmente en datos, y a veces en mucho más). El nivel al que las diferencias son claras y patentes es en los objetivos últimos. Los científicos buscan datos fiables, que proporcionen información sólida sobre los

¹⁶ Un clásico sobre el tema es T. P. Hughes, *American genesis: A century of invention and technological enthusiasm* (Londres, Penguin, 1989). Un libro que refleja la extrañeza de los europeos ante el ambiente en Norteamérica es J. T. Merz, *A history of European thought in the nineteenth century* (London, Blackwood, 4 vols., 1896-1914).

fenómenos, y teorías que los representen bien. Los ingenieros trabajan para crear objetos artificiales que sean robustos y fiables, y todo lo demás son meras apoyaturas. Asociada a esta diferencia viene aquella diferencia en los regímenes que regulan el fin de la investigación en uno u otro caso, de los que habla Aracil.

Curiosamente, la tendencia a confundir ciencia y técnica, y el énfasis en lo útil, no han ayudado mucho a revisar la imagen sesgada de la ciencia de la que hablamos en la sección 2. Seguimos pensando en la ciencia como teoría, pero asumimos que, por algún poder mágico de la captación mental de los fenómenos, esas teorías tienen enormes aplicaciones inmediatas. Los científicos que buscan financiación y convocan ruedas de prensa no están por la labor de corregir esa imagen deformada, sino más bien buscan modos de sacarle provecho. A fin de cuentas, creo que los escasos cambios de fondo, a pesar del cambio en los prejuicios, se deben sobre todo a que no hay conceptos claros tras la confusión entre ciencia y técnica. Lo que hay son ideas oscuras, la creencia en que las dos cosas van siempre de la mano sin que la acompañe un intento de comprensión.

El “entusiasmo tecnológico” es y será una componente esencial de la cultura del siglo XXI. Hay motivos para pensar que el paso a primer plano, junto a la sociedad norteamericana y la “vieja Europa”, de otras naciones pujantes como Japón y China, redundará precisamente en un mayor énfasis sobre lo útil y lo aplicado. La historia muestra además que la pasión por los artefactos se difunde más fácilmente que la pasión por el conocimiento.

La paradoja es que ese énfasis en la técnica da lugar a una complicada realidad de luces y sombras. Lo que hoy existe es una compleja combinación de tecnofilia y tecnofobia, ya que la población pasa con facilidad de actitudes positivas acríticas a actitudes negativas (también acríticas). Hay ejemplos muy notables, como puede ser el considerable número de personas que pagan su criogénesis en lugares como California, esperando una tecnología médica futurista que les resucite. O como las actitudes irracionales que se desarrollan frente a los alimentos transgénicos y la comida orgánica. La razón última de estos movimientos pendulares, demasiado guiados por las emociones, parece estar precisamente en la falta de *comprensión*. Probablemente bastaría un mejor conocimiento de cómo se elaboran la ciencia y la técnica para reducir la tecnofilia y la tecnofobia (aunque es necesario investigar más estas cuestiones).

La cultura de la innovación quita visibilidad a lo que es propiamente conocimiento, lo hace poco atractivo en sí mismo. Aquí está lo que me parece más

peligroso de este segundo prejuicio, y lo que me lleva a pensar en el conocimiento como un bien escaso y delicado, que se debería proteger. Sería deseable un pacto a escala internacional que protegiera la investigación, promocionando los valores del conocimiento y la curiosidad. Es necesario sobre todo mantener la pluralidad de motivaciones, la búsqueda del saber (con experimentos y teorías) sin necesidad de que la motive el lucro o las ventajas egoístas.

Bien entendida, la ciencia es una actividad muy filosófica, marcada por una exigencia de *inteligibilidad* que va mucho más allá de lo práctico. Personajes como Kepler, Newton, Darwin o Einstein no responden en absoluto al estereotipo actual del científico-empresario, encarnado por ejemplo en un Watson (y no lo digo en el sentido de que sea “malo” que haya personajes de este tipo). Hay muchas tareas pendientes hoy en día en relación con la ciencia y la técnica. No me olvido en absoluto de la necesidad de exigir *responsabilidad* a científicos e ingenieros con respecto a los proyectos en los que se involucran y con respecto a los tan traídos y llevados *spin-off*¹⁷. Pero, entre esas muchas tareas, es necesario promocionar el bien escaso que son los científicos y los ingenieros¹⁸.

5. La técnica en el corazón de la ciencia

Los filósofos nos han acostumbrado a pensar que la experimentación se reduce a la observación, y que ésta no es más que la recepción de impresiones por una mente atenta. Esto es una bella imagen metafísica de las cosas, pero no responde a la realidad. La observación que practican los científicos no es pura contemplación, sino una forma de acción productiva: para poder observar hay que hacer cosas. A veces la complejidad práctica de una observación es mucho mayor que la de un experimento: el famosísimo experimento de Oersted (en 1820) que dio a conocer el efecto electromagnético lo puede realizar una persona cualquiera en su casa; compárese con el despliegue de medios realizado en 1769 para observar el tránsito de Venus desde Tahití (cosa que realizó una expedición

¹⁷ Subproductos o consecuencias colaterales de esos proyectos, por ejemplo el uso armamentístico de materiales desarrollados por la NASA (aunque quizás en este ejemplo no se trata de algo “colateral”).

¹⁸ Quizás se me permite añadir que también los filósofos son un bien escaso, unos “bienes” que en ocasiones (piensa uno) habría que proteger de su propia tendencia a enclaustrarse y hablar sólo de “sus cosas”.

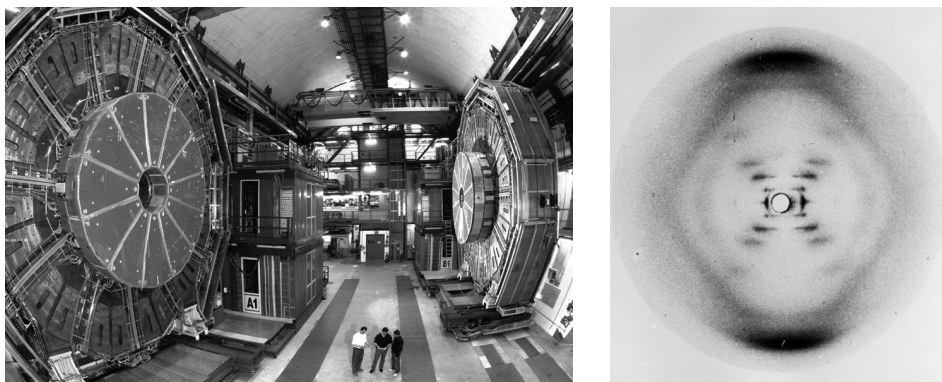


Figura 2. Dos imágenes mucho menos conocidas que la del modelo de doble hélice. 2a (izqda.): Wilkins con su difractor de rayos X; 2.b (dcha.): La imagen crucial obtenida por Franklin, mostrando un patrón de difracción sumamente simple y simétrico obtenido a partir de una muestra purificada de DNA; Crick pudo concluir que hay solo dos o tres cadenas en la molécula.

del capitán Cook), a fin de comparar esas observaciones con otras simultáneas desde la Bahía de Hudson, Irlanda y la frontera entre Rusia y China¹⁹.

La diferencia entre una observación y un experimento es que, en el segundo caso, el científico interviene sobre el fenómeno observado y lo altera: registrar un terremoto es solo observación, provocarlo bajo condiciones controladas sería experimentación. Dicho esto, resulta evidente que el elemento técnico es un ingrediente imprescindible de la actividad experimental, desde los prismas de Newton a los láseres actuales, desde los humildes péndulos de Galileo (artefactos a fin de cuentas) a los aceleradores de partículas. Pero la mediación técnica es también inevitable en el terreno de la observación, y no ha parado de acrecentarse. De aquí la horda de artefactos cuyo nombre se forma con el sufijo *-scopio*

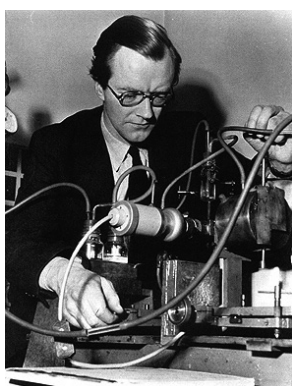


Figura 3. El detector Aleph instalado en el célebre acelerador LEP (Large Electron-Positron Collider) del CERN, operativo entre 1989 y 2000. Nótese que el inmenso detector ocupaba sólo una pequeña parte en el extremo del anillo de 27 km. de circunferencia que era el LEP.

¹⁹ Lo cual permitía en principio calcular con precisión la distancia Tierra-Venus, y de ahí la distancia Tierra-Sol, que es la unidad astronómica (AU).

(derivado del verbo ‘ver’ en latín): microscopios, telescopios, oftalmoscopios, estetoscopios, espectroscopios, etc. También sirven para observar muchos instrumentos que permiten realizar mediciones precisas, desde los hermosos astrolabios medievales a los detectores de la radiación de fondo que se instalaron en el satélite COBE. Me atrevería a decir que no existe hoy un solo dato de *mera* observación que no haya sido depurado y perfeccionado usando algún artefacto.

Repasando la presencia de elementos técnicos en el conocimiento científico, podemos comprobar sistemáticamente su aparición a todos los niveles. Ya hemos mencionado el nivel

A. Nivel de observación y experimentación, pero quizás no esté de más añadir alguna otra reflexión. Si pensamos en los inmensos sistemas detectores que se instalan en aceleradores de partículas como los del CERN (Fig. 3), encontramos que todo el proceso de registro está automatizado y controlado por sistemas automáticos y computadores. La propia *selección* de qué eventos registrar, entre la miríada de ellos que se producen en una colisión de partículas, se realiza de manera automática. Podría pensarse que esto es solo un paso más en la línea de las micrografías del siglo XIX (fotografías de lo que “se ve” por el microscopio), pero se trata de un paso tan radical que quizás altera parte de la epistemología de la observación.

La idea habitual es que sólo en ese nivel A. encontramos una presencia sustancial de ingredientes técnicos, pero una reflexión más detallada revela que esto es un prejuicio. En otros muchos pasos del proceso que media entre los registros brutos de la instrumentación y las teorías, encontramos la presencia inevitable de la técnica. Para empezar, lo que llamamos “datos” no son esos registros brutos, sino algo mucho más sofisticado y controlado, un producto de largas investigaciones. Esto nos conduce al:

B. Nivel del tratamiento de datos. Podríamos poner aquí ejemplos como las llamadas “técnicas” estadísticas: el método de mínimos cuadrados que se inventó hacia 1800 en astronomía, o quizás los métodos de Montecarlo mucho más recientes. ¿Es esto realmente técnica? La pregunta es difícil, porque en buena medida involucra un tema que no podemos tratar aquí en detalle: el estatus de las matemáticas, entre ciencia y técnica. Pero, a un nivel más elemental y más evidente, los viejos dibujos del astrónomo Tobias Mayer representando la Luna nos dan un ejemplo del XVIII donde figuran prominentemente varias técnicas, desde la innovación que supuso la micrometría hasta (claro está) los métodos del dibujo.

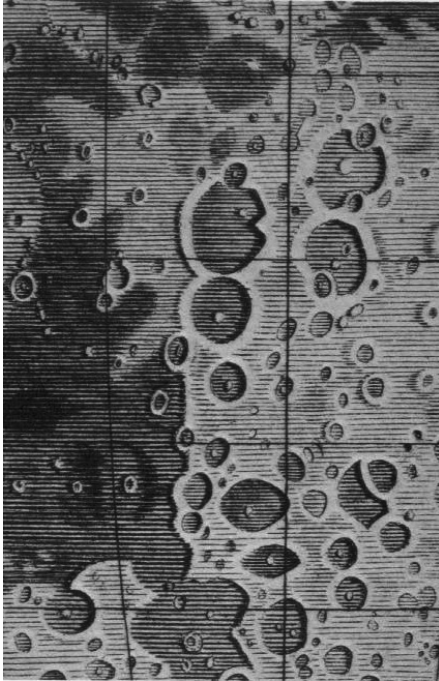


Fig. 4. Representación de la superficie lunar debida al astrónomo alemán Tobias Mayer (1723-1762), donde pueden verse los cráteres Ptolomeo, Hiparco y Alfonso, junto al Mare Nubium. Fue el primer caso en que se empleó el micrómetro, cuya retícula aparece representada.

Una vez completado el proceso de obtención de datos, es importante siempre comprobar cómo éstos encajan (o no) con lo que cabe esperar a la luz de la teoría. Aquí es donde entran en juego las predicciones:

C. Nivel de establecimiento de predicciones. Hoy todos somos conscientes del papel de artefactos a este nivel, dado el empleo omnipresente de ordenadores para obtener predicciones a partir de sistemas de ecuaciones complejos: en meteorología por supuesto, pero también en física y tantas otras ciencias. Ahora bien, ¿qué pasaría con las simples técnicas de cálculo que aplicamos automáticamente, desde las antiquísimas técnicas de sumar, multiplicar y dividir, hasta las técnicas de integración? Sin esto, por supuesto, las ecuaciones de la física “no nos dicen nada” acerca del mundo. ¿Y las “técnicas” de aproximación? De nuevo nos encontramos con algo que es difícil catalogar, debido al carácter ambivalente de las matemáticas.

A fin de cuentas, esta ambivalencia sugiere que incluso al nivel de la teoría y los modelos abstractos hay elementos técnicos en el mismo corazón de la ciencia. Hablemos pues del nivel

D. *Nivel de la elaboración y tratamiento de teorías.* Nos dejamos llevar con demasiada alegría por las frases hechas que nos dicen que una teoría, la de Newton, la de Darwin o la que sea, es un producto mental de ese científico. Esto es sin duda cierto, pero se suele interpretar de manera equivocada: se interpreta lo mental como algo “interior” y contrapuesto a cualquier cosa “exterior” al sujeto, como pueden ser objetos u otras personas. Se olvida, para empezar, que la teoría “de Newton” que se estudia en la Universidad tiene poco que ver con los cálculos geométricos que llenan los *Principia mathematica* de 1687, y debe mucho al desarrollo de las matemáticas en los siguientes 200 años; que la teoría “de Darwin” que hoy estudiamos no es la que aquella persona presentó en su famoso libro *On the origin of species* de 1859, sino el producto de la llamada “nueva síntesis” en la primera mitad del siglo XX. Pero sobre todo olvidamos que las teorías no nacen de la mente del científico como Minerva de la cabeza de Júpiter en el antiguo mito: Minerva surgía como una mujer totalmente crecida y venía ya armada para la guerra. No, el proceso de creación de una teoría es largo y complejo, involucrando al cerebro y a la mano, mucho papel y tinta y electricidad en los ordenadores, discusiones con colegas, borradores y más borradores, cartas y emails, etc.

Veamos un ejemplo. Hace poco que la casa de subastas Christie's, en Londres, vendió por la impresionante suma de medio millón de dólares el manuscrito Einstein-Besso. Se trata de un escrito muy interesante, porque formó parte esencial del proceso creativo que condujo a la teoría de la Relatividad General (Fig. 5). Para empezar, es un producto bien físico, pero además no es el “producto mental” de Einstein solo, ya que se debe a dos autores; sin la colaboración de matemáticos como su amigo Michele Besso, el famoso físico no habría podido concebir su teoría de la gravitación. El manuscrito se dedica a elaborar las consecuencias de la teoría con respecto al movimiento de Mercurio, para calcular si la famosa anomalía en su órbita podía explicarse desde la perspectiva relativista (como de hecho fue el caso).

Un detalle muy interesante del manuscrito Einstein-Besso es que hay un error en ciertos cálculos, error que hizo pensar a Einstein que su teoría provisional era aceptable cuando no lo era. El error fue localizado en 1915 y, según algunos expertos, condujo a Einstein a una profunda revisión de sus ideas que le puso en el camino final. Esto nos recuerda de una manera muy gráfica que el papel desempeñado por los garabatos de tinta y las discusiones no es en absoluto secundario, sino que pertenece centralmente a la formación de esos productos mentales que son las teorías.

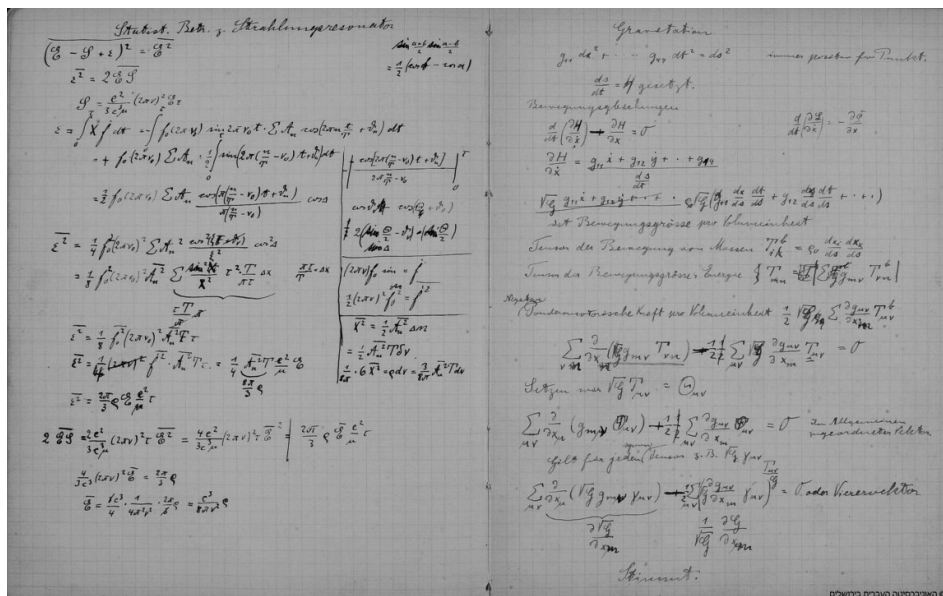


Fig. 5. Páginas del “Cuaderno de Zurich” en el que Einstein explora posibles formulaciones de su teoría de la gravedad. La teoría definitiva de la Relatividad General apareció en noviembre de 1915 y –a diferencia de dos años antes– conseguía explicar totalmente la anomalía del perihelio de Mercurio. Einstein contaría más tarde que este descubrimiento hizo que le palpitara fuertemente el corazón²⁰.

Las fórmulas y los cálculos de Einstein y Besso me traen a la memoria lo que dijo otro gran físico, Heinrich Hertz, cuya obra experimental puso los cimientos de las telecomunicaciones modernas, pero que fue también un teórico:

²⁰ Una buena referencia en castellano sobre el tema es J. M. Sánchez Ron, *El origen y desarrollo de la relatividad*, Madrid, Alianza, 1985.

No se puede evitar la sensación de que estas fórmulas matemáticas tienen una existencia independiente y una inteligencia propia, de que son más sabias que nosotros, más sabias aún que sus descubridores, y que sacamos de ellas más de lo que originalmente se puso en ellas.

Lo mismo puede decirse de las viejas técnicas geométricas que aplicaba Kepler, como tantos otros, en la elaboración y conformación de sus modelos teóricos. Y de nuevo nos vemos conducidos a la pregunta, ¿son las matemáticas pura teoría?, ¿son ciencia o son técnica? O lo que viene a ser lo mismo: ¿inventan o descubren los matemáticos?

Quizás, si la respuesta es que no son pura teoría, encontraremos el inicio de un camino que podría llevarnos a entender mejor la vieja alianza entre matemáticas e ingeniería. (A fin de cuentas, en los siglos XVI y XVII la palabra “matemático” designaba ante todo a un ingeniero.) Pero tenemos ya que abandonar este terreno pantanoso; me limitaré, para concluir, a citar unas palabras del matemático Luis Santaló, quien hablaba del

doble aspecto de filosofía y técnica, que caracteriza a este saber que denominamos matemática; un saber, por cierto, que siempre se ha hallado entre el pensar y el obrar, entre el verbo y la acción²¹.

Donde Santaló escribió “filosofía”, quizás el lector pueda leer conocimiento o ciencia, y con ello se evite alguna dificultad en entender la idea.

6. Algunas reflexiones filosóficas y conclusiones

Hemos visto en lo anterior el papel del prejuicio intelectualista y la centración en las teorías a la hora de pensar la ciencia, como origen de algunos sesgos de interpretación que no permiten concebir esa actividad adecuadamente. También hemos hablado de lo que podríamos llamar el *mito del sujeto*, la idea errónea de lo mental como algo puramente “interior”. Cuando decimos que una teoría o un diseño sin duda habrán de registrarse en papel o magnéticamente, pero “primero” tienen que aparecer “en la mente de” Albert Einstein o Graham Bell, y señalamos con nuestro dedo a la cabeza, solemos aceptar toda una serie de interpretaciones

²¹ Ll. Santaló, *La matemática: una filosofía y una técnica* (Barcelona, Ariel, 1994), 7.

muy discutibles. La idea de la mente como algo que está en el interior del cerebro es una metáfora, una figura lingüística y retórica que oscurece la complejidad de los procesos de pensamiento y de producción de conocimientos.

Entiéndase bien: no quiero negar la existencia de los fenómenos mentales, de ninguna manera; no quiero “robarle” a nadie sus pensamientos y emociones y recuerdos, cosas que nos pertenecen de una manera íntima. Lo que pretendo es enfatizar que lo mental no es algo incorpóreo, sino que llamamos “mentales” a toda una serie (heterogénea) de conductas y capacidades; estas conductas y capacidades no sólo involucran al cerebro, sino a todo nuestro cuerpo y también a objetos externos. Einstein no habría podido concebir su teoría de la Relatividad General sin escribir ecuaciones, realizar cálculos y corregirlos, pedir consejo y colaboración a matemáticos como Besso o Grossmann, recibir las críticas y las sugerencias de otros científicos. Tampoco el filósofo sabría elaborar sus reflexiones sin ponerse a escribir, con papel y bolígrafo o con el ordenador; como mínimo, necesitará ponerse a hablar al modo de Sócrates, producir palabras e interaccionar con otras personas. Los procesos que llamamos mentales no suceden dentro de los límites del cráneo, ni tampoco dentro de los límites de la piel de un individuo. La idea de que lo mental es estrictamente “interior” no es más que una mala metáfora.

Lo que acabo de decir no es novedad. La interacción entre la técnica y el pensamiento, el papel de los elementos materiales y corpóreos en la producción del conocimiento, han sido señalados una y otra vez de diversas maneras y en diversos contextos. Pensemos en la teoría del conocimiento marxista, con su insistencia en que el conocimiento es una actividad productiva, o pensemos en la idea de “sistemas tecnológicos” que han propugnado los teóricos de la técnica. Otra versión reciente y prometedora es el enfoque de la *cognición distribuida* en ciencias cognitivas²². Este enfoque pretende precisamente analizar de manera integrada aquellas situaciones cognitivas en las que interviene más de un actor, y en las que los objetos del entorno tienen un papel crucial en los procesos mentales. La cognición individual, la interacción social y la interacción con objetos y artefactos actúan de manera coordinada y no son separables. Como ha señalado el mismo Hutchins, la actividad de los científicos, ejemplos como los que he discutido en estas páginas, son una magnífica muestra de cognición distribuida.

²² Ver entre otras la obra de E. Hutchins, *Cognition in the wild* (MIT Press, 1995).

Pero estas ideas tienen difícil penetración en la cultura general, porque aquí el contrapeso de las creencias religiosas impide un funcionamiento normal de los procesos de instrucción y educación, procesos de transmisión de lo aprendido por generaciones anteriores. A una porción muy grande de cada generación se le enseña de nuevo la idea de la dualidad alma/cuerpo, tan central en las principales religiones, y por tanto nos vemos obligados a superar esa dualidad de nuevo en cada generación. Para superarla son necesarios esfuerzos individuales basados en lecturas, experiencias y reflexiones, en un proceso que es mucho más difícil y costoso que la instrucción normal²³.

En conclusión, reiteraré unas pocas ideas. La ciencia no es pura teoría; si la entendemos así, nos olvidamos del mundo de los datos y la experimentación, que a fin de cuentas son la clave que hace de la ciencia *ciencia*. La técnica ha sido *siempre* determinante en la elaboración de ciencia, incluso en las épocas más antiguas, y desde luego en los primeros pasos dados durante los siglos XVI y XVII. Pero es que, además, la propia actividad teórica del científico depende centralmente de la técnica. Como hemos visto, la *filosofía experimental* del siglo XVII fue hija de tres madres, dos de ellas viejas (la filosofía y la matemática) y la tercera antiquísima (la técnica).

Otra cosa es la relación entre ciencia e ingeniería. La ingeniería no es simple técnica sino tecno-logía: teoría de la técnica y técnica elaborada en base a teorías científicas. La ciencia no dependió de la ingeniería durante los siglos XVII, XVIII y buena parte del XIX, aunque muchos ingenieros desempeñaron un papel muy importante en la ciencia: pensemos en el español Jorge Juan –marino de profesión, pero ingeniero en la práctica– o en el francés Coulomb. Ahora bien, desde finales del siglo XIX la ciencia no ha podido ya vivir sin la ingeniería (y recíprocamente): hemos visto cómo hoy la observación, la experimentación, el tratamiento de datos, la predicción y la elaboración de teorías tienden a estar mediadas por tecnologías altamente desarrolladas.

²³ Pondré un paralelismo: en un país como España, casi todo el mundo sabe qué forma tienen las órbitas de los planetas, gracias a la instrucción recibida; pero son muy pocos los que han hecho el esfuerzo de *pensar* esa conclusión, entender cómo fue posible llegar a ella sobre la base de la experiencia del movimiento aparente de los planetas (con sus avances y movimientos retrógrados, sus conjunciones y oposiciones al Sol, etc.) tal como se ve desde nuestra Tierra.

Yendo algo más lejos, en realidad puede decirse que no hay ninguna actividad humana, ya sea mental o corporal, científica o artística, que no involucre a la técnica (y también al lenguaje). La técnica, como la ciencia, constituye uno de los mayores activos de que dispone la humanidad. Pero para que alcancen todo su valor y todo su potencial, ambas deben ser entendidas en un sentido elevado y liberador. Ya hay demasiadas voces y demasiadas manos que se encargan de impulsar la ciencia y la técnica por su utilidad y buscando el provecho. La técnica, y también la ingeniería, son algo más, mucho más que herramientas del empresario para superar a sus competidores, o herramientas del político para conseguir un país rico y plenamente inserto en el “Primer Mundo”. Es necesario complementar esas voces y contrarrestarlas apoyando la búsqueda del conocimiento, o, por decirlo de otro modo, impulsando los valores de la curiosidad frente a los valores económicos.

¿ES LA INGENIERÍA MERAMENTE CIENCIA APLICADA?

Javier Aracil

Escuela Superior de Ingenieros

Universidad de Sevilla

El espíritu científico de la ingeniería

En las páginas anteriores se han analizado, bajo diferentes puntos de vista, rasgos de la actividad de los ingenieros, lo que nos ayuda a adquirir una perspectiva sobre cuáles son sus orígenes y entender ciertas peculiaridades de su forma de ser. Vamos a dedicar este capítulo a comentar algunos aspectos de su identidad y en especial de su método. Cuando se observa el vasto campo de actividades que desarrollan estos profesionales (proyectar, producir y explotar máquinas, sistemas de comunicación, aviones, plantaciones agrarias, carreteras, cosechas genéticamente modificadas, etc.) surge la duda de si hay algo que unifique actividades tan diversas. Sin embargo, si se cambia la perspectiva de *que* hacen a *cómo* lo hacen entonces podemos encontrar alguna luz respecto al método y la identidad del ingeniero.

La definición tradicional de la ingeniería es la de “arte de aplicar los conocimientos científicos a la técnica industrial, a la construcción de obras públicas y a las necesidades de la guerra”. Esta definición, aparte de ser muy incompleta con respecto al dominio que abarca, lleva implícita una cierta subordinación de la ingeniería a la ciencia, en el sentido de que la primera se reduciría a aplicar a una situación concreta, aunque sea de forma más o menos habilidosa, un conocimiento preexistente, perteneciente al dominio de la ciencia. Vamos a ver que este aspecto de la definición es cuestionable y requiere importantes matizaciones. Además nos coloca inevitablemente en el meollo del debate sobre las discrepancias y las relaciones entre ciencia e ingeniería.

Estas diferencias y concordancias requieren de entrada algunas consideraciones terminológicas. En principio se entiende por ciencia, de una forma muy general, el conocimiento de un cierto dominio de la realidad basado

en la experiencia y estructurado según los principios de la razón. No obstante, ¿qué conocimiento más legitimado que aquel que permite hacer algo de acuerdo con un diseño previo? ¿Y qué más experimental que un artificio que funcione correctamente? Sin embargo, en el habla corriente, tanto en los medios académicos como en otros más amplios, cuando se habla de ciencia se alude al desvelamiento de la venturosa, y a la par misteriosa, unidad que se esconde bajo las mutantes apariencias de los fenómenos naturales de modo que el correspondiente conocimiento se ocupa fundamentalmente de lo natural, de las cosas como son con independencia de la posible intervención humana para modificarlas de acuerdo con unas necesidades o pretensiones decididas intencionadamente.

La ciencia, en sus formas más excelsas, trata de deslindar los principios básicos que subyacen a la rica diversidad de las cosas que pueblan la naturaleza. Como dice Javier Ordóñez¹ “por físico se entiende un pensamiento que trata de explicar cuál es el origen de las cosas del mundo a partir de determinados principios”. En consecuencia, en lo que sigue, y siguiendo este uso convencional, nos referiremos a la ciencia como sinónimo de ciencias de la naturaleza, de las cosas del mundo natural tal y como se ofrecen a la consideración de nuestro entendimiento cuando se las desnuda de lo superfluo. De ello es de lo que se ocupan fundamentalmente los estudios de las tradicionalmente llamadas facultades de ciencias. De acuerdo con esta acepción las actividades ligadas a la producción de objetos artificiales ocupan un lugar muy secundario en las motivaciones intelectuales de los científicos. Por otra parte, podemos reservar la denominación de ciencia de lo artificial² para el conocimiento estructurado de la ingeniería.

La tradicional definición de ingeniería cabe plantearse si no habría que cambiarla por “arte de crear artificios para resolver problemas”. Nuestro principal argumento es que este arte posee rasgos de autonomía, y que no está predeterminado por los conocimientos científicos o de otra naturaleza, ni deriva exclusivamente de ellos. Evidentemente la creación de artificios está influida, y hasta cierto punto condicionada, por el conocimiento existente sobre el dominio al que pertenecen. Pero estos conocimientos (que en el mejor de los casos son

¹ *Historia de la ciencia*, Espasa-Calpe, 2003, p. 67.

² Herbert Simon, *The sciences of the artificial*, MIT Press, 1969.

consistentes con los conocimientos científicos básicos del dominio correspondiente) son auxiliares para esa función. Es lo que sucede en todos los dominios del arte (en el sentido de bellas artes). Cuando se realiza una pintura se recurre a todos los recursos o habilidades para resolver clases de problemas más o menos codificados. Saber pintar, en el sentido académico, implica poseer esos conocimientos acumulados a lo largo de los siglos, para recurrir a ellos cuando sea necesario. Sin embargo, sabemos que la excelencia de una pintura no se mide por el habilidoso recurso a esos procedimientos –los que sin embargo contribuyen notablemente al resultado final– sino por la capacidad creadora desplegada por el artista. Así también en la creación de artificios, en sus formas más excelsas, el recurso a los conocimientos estructurados y organizados en teorías es también, en cierto sentido, secundario.

La imaginación y la creatividad se deslizan por los resquicios de lo previamente conocido. Los conceptos y leyes involucrados en esos conocimientos aportan peldaños de un valor inestimable para alcanzar la suficiente perspectiva desde la que abordar los problemas prácticos. Al fin y al cabo, el patrimonio de una rama de la ingeniería contiene elementos teóricos de un gran valor para su ejercicio. Este conocimiento es el patrimonio intelectual de la ingeniería sin el cual su ejercicio no es posible. Forma el sustrato en el que germinan las imaginativas concepciones del ingeniero. Sin embargo, tienen un carácter necesario pero no suficiente. Delimitan lo que es posible hacer, si será posible llevar a cabo un determinado artificio, pero la propuesta de éste no se desprende de esos conocimientos. El saber en un área de la ingeniería aporta un sustrato de conocimientos a partir del cual es posible construir un artefacto, pero siempre teniendo presente que éste último no está implícito en esos conocimientos, en el sentido de que se deduzca de ellos. La excelencia del resultado³ se medirá por la síntesis creativa del producto acabado, por su funcionamiento de acuerdo con los fines previstos, y no tanto por la excelencia de los conocimientos incorporados en su concepción.

Para mejor precisar las relaciones entre la ciencia y la ingeniería conviene evocar dos citas. La primera es de Herbert Simon (1916-2001), autor de

³ Los criterios que miden la excelencia de un producto, en el dominio de la ingeniería, tienden a desplazar los cánones puramente estéticos, propios de épocas anteriores, especialmente del Renacimiento, por otros de carácter más utilitario, más funcional.

aportaciones a campos muy variados que incluyen la economía, la inteligencia artificial y las organizaciones industriales, y que recibió el premio Nobel de Economía, quien dice que: “el científico se ocupa de las cosas como *son* y el ingeniero de cómo *deben ser*”. Theodore Von Karman (1881-1963), reputado ingeniero aeronáutico, propone una dicotomía complementaria: “el científico describe las cosas como *son*; el ingeniero crea lo que *nunca ha sido*”. Resulta inevitable comparar estas citas con la de Aristóteles en la *Ética a Nicómaco* recordada en la presentación de este libro. En todas ellas está implícito el carácter creador, productor de algo previamente inexistente, de la ingeniería, asociado a un acto *intencional* dirigido a dar el ser a algo dotado de una cierta pretendida utilidad. Esta intencionalidad introduce intangibles cualidades humanas en la cadena de las relaciones de causa a efecto que conducen a la construcción de un artefacto. La mezcla de creación e intencionalidad, especialmente en sus formas más eminentes, puede desbordar el conocimiento científico existente en un determinado momento, en cuyo caso se acaban abriendo nuevas vías al pensamiento.

En todo caso, con los conocimientos propios para hacer artefactos se define un ámbito específico, aunque difícil de precisar, de los saberes del ingeniero. Para definir esos saberes es importante establecer que entender las cosas, saber cómo *funcionan* y ser capaz, hasta cierto punto, de prever su funcionamiento, no quiere decir necesariamente saber cómo *son*, en el sentido de este término al gusto de un metafísico o de un ontólogo, o aun de un científico básico de los tiempos modernos; es decir, el inevitable contraste entre el discreto *saber cómo* hacer algo, el saber productivo aristotélico, frente al imperioso *saber que* las cosas son de una manera determinada, el saber teórico del Estagirita. En el primer caso el conocimiento está sometido a la eficacia, mientras que en el segundo tiene pretensiones de verdad. Si los conocimientos de ingenieros y científicos son compatibles tanto mejor para ambos, pero sus intereses y las implicaciones de éstos para su método y especialmente el canon al que someten sus producciones están claramente diferenciados.

Pensemos, por ejemplo, en la aparición de la aviación. Como es bien sabido los hermanos Wright (Wilbur y Orville, 1867-1912, 1871-1948, respectivamente) eran unos habilidosos mecánicos que tenían un flamante negocio de bicicletas y una gran pasión por hacer volar un objeto más pesado que el aire. Disponían de abundantes conocimientos sobre lo que se había hecho en planeadores, y una gran dosis de ingenio y creatividad. Sentían un gran entusiasmo por la ciencia física, aunque

carecieran de una sólida formación en ella. Concibieron el primer avión, el *Flyer*, no como consecuencia de la aplicación de un conocimiento científico preexistente sino de una mezcla de reglas heurísticas sobre planeadores y conocimientos de mecánica (no teóricos, sino de taller), a partir de lo cual concibieron una máquina llamada a revolucionar la ingeniería moderna. Después de los Wright vinieron otros ingenieros, como Ludwig Prandl (1875-1953) o el mencionado Von Karman que aplicaron las pautas del conocimiento científico a un objeto artificial, el avión, para mejorar sus prestaciones y crearon la aerodinámica que posee todos los ingredientes de rigor y de estructuración racional del conocimiento científico, pero cuyo objetivo es contribuir a proyectar esas maravillas de lo artificial que son los aviones.

Éste es un caso paradigmático del método del ingeniero y de sus relaciones con el método científico convencional. En él se pone de manifiesto el carácter de ciencia de lo artificial propio de los conocimientos de la ingeniería. Aunque los componentes de los artefactos son en último extremo naturales, sin embargo *no* lo es la forma como se entrelazan o coordinan para producir una interacción entre ellos que de lugar a un comportamiento conjunto previamente concebido en la mente del que lo diseña. Las leyes de lo natural que regulan el comportamiento de los componentes básicos de un artefacto no establecen como deben organizarse esos elementos para producir el funcionamiento artificial pretendido; en todo caso establecen límites a las posibles formas de coordinarlos.

Así pues, aunque las partes de un artefacto sean naturales, y por tanto su comportamiento esté regido por las leyes de la naturaleza, de esas leyes no *deduce* el diseño de un artefacto concreto (en el sentido en el que las trayectorias de los planetas se deducen de la teoría de la gravitación de Newton; luego volveremos sobre esto). Por muy importante que sea el conocimiento de las leyes que regulan el comportamiento de las partes de un avión (la historia nos muestra, en este sentido, el frustrado intento de Leonardo Da Vinci de construir una máquina voladora) se comprende que de ese conocimiento no se desprende, de forma directa o indirecta, cómo proyectar un avión. Lo artificial, aunque hecho de lo natural, deja de serlo, no se reduce a ello, lo trasciende.

El ingeniero concibe en su mente aquello que luego producirá. En el método del ingeniero, en todas sus acepciones, juega un papel fundamental la representación. Aquello que concibe debe representarlo para establecer un “diálogo” con esa representación mediante el cual estudie, entre otras cosas, su viabilidad y proceda a calcular la forma más eficiente de producirlo. También

necesita representarlo para poder discutirlo con otros e incluso propugnar su colaboración, en sus múltiples aspectos, para llevarlo a cabo. Para moldear lo concebido se requiere el uso de lenguajes adecuados. Estos lenguajes, normalmente, los suministran las matemáticas. El método de representación más tradicional ha sido el plano en el que se plasman las relaciones espaciales de una obra pública o de una máquina, a lo que subyace la geometría. No hay que olvidar que geometría viene de agrimensura, y se gestó al calor de las necesidades de mediciones en los campos agrícolas, para alcanzar luego su mayor desarrollo en la plasmación de edificios y máquinas. Arquímedes, en el mundo griego, postuló la síntesis de mecánica y geometría.

En tiempos recientes, a partir del XVIII, el análisis matemático suministra un lenguaje especialmente adecuado para representar concepciones de naturaleza más elaborada, en las que las magnitudes involucradas pierden el carácter estático de la geometría tradicional, y evolucionan en el tiempo. La mecánica ha sido objeto de una sólida formulación matemática llamada a extenderse a otros dominios de la actividad del ingeniero, al tiempo que se ha convertido en el lenguaje universal de la física matemática. Surgen así los modelos matemáticos que en la actualidad, con la informática, se convierten en la herramienta de representación habitual de las concepciones del ingeniero.

Es evidente que el empleo de las matemáticas por los ingenieros no se reduce a la representación: incluye también, de forma complementaria, el cálculo de lo que proyectan. Este cálculo comporta una previsión del comportamiento de aquello que se producirá, lo que atenúa las incertidumbres inherentes a la gestación de algo nuevo.

La necesidad de representar lo que se está proyectando, que es inherente a la técnica desde sus albores, ha dado lugar a un pernicioso efecto epistemológico colateral: la identificación de la representación con lo representado, dando lugar a problemas en los que aquí no vamos a detenernos. Sin embargo, sí conviene advertir sobre el peligro que esa identificación, tomada en un sentido unitario, puede producir, y de hecho está produciendo, en múltiples ámbitos del pensamiento. En los escritos del filósofo americano Hillary Putnam (1926-), especialmente en *Las mil caras del realismo*⁴, se aportan argumentos nada desdeñables en favor del ineludible pluralismo en la representación.

⁴ Paidós, 1994.

Las diferentes racionalidades del ingeniero y del científico

La racionalidad es un término que se invoca comúnmente por ingenieros y científicos para caracterizar su método. Sin embargo, éste es un vocablo comodín que admite múltiples acepciones. No resulta extraño encontrarlo como una coartada para justificar modos de comportamiento discordantes en ámbitos muy variados. Vamos a ver en este apartado dos de esas acepciones que nos ayudarán a perfilar las analogías y diferencias del método del científico con relación al del ingeniero.

En primer lugar vamos a referirnos a la racionalidad crítica tal como la propone el conocido filósofo de la ciencia Karl Popper (1902-1994). Supongamos que ante un determinado problema P_1 , al que pretendemos encontrar una explicación, proponemos una teoría tentativa TT. Entonces sometemos esta opción al análisis crítico AC, de cuya aplicación normalmente surgirán otros problemas como, por ejemplo, P_2 . El anterior proceso puede representarse esquemáticamente mediante el diagrama siguiente⁵:

$$P_1 \Rightarrow TT \Rightarrow AC \Rightarrow P_2.$$

A partir de P_2 se reinicia el proceso, introduciendo las modificaciones oportunas en TT, para recurrir de nuevo al análisis crítico AC; y así sucesivamente. El proceso acaba cuando se encuentra una teoría T que resulta aceptable de acuerdo con los cánones que rigen la ciencia en el dominio al que pertenece el problema en cuestión. El anterior proceso recoge rasgos definitorios del método científico.

El ingeniero procede de forma semejante en la resolución de problemas. Cuando está tratando de plasmar en un proyecto algo que está concibiendo, inevitablemente se encontrará con problemas como P_1 . Para resolver P_1 adoptará una solución tentativa ST a la que aplicará con toda intensidad el rigor del análisis crítico AC. Esta aplicación le llevará a encontrarse con problemas como P_2 , con lo que nos encontramos con un proceso recurrente semejante al esbozado más arriba. Ahora tenemos el esquema:

$$P_1 \Rightarrow ST \Rightarrow AC \Rightarrow P_2.$$

⁵ K. Popper, *El mito del marco común*, Paidós, 1997, p. 141.

En ambos casos, ingeniero y científico comparten el uso del análisis crítico para la eliminación de errores. En el común ejercicio de ese análisis hay que buscar las credenciales de la pretendida excelencia tanto del pensamiento científico como del técnico. Así, el análisis anterior pone de manifiesto uno de los sentidos en los que cabe considerar científica a la ingeniería: el empleo del razonamiento crítico, por parte del ingeniero, en el tortuoso camino que conduce desde la idea motriz de un artificio hasta su plasmación en algo concreto que funcione adecuadamente de acuerdo con las prestaciones exigidas.

De la destreza, habilidad y rigor con que apliquen ingenieros y científicos ese análisis se desprenderá la excelencia de su trabajo. Sin embargo, es importante destacar los diferentes cánones a los que ambos someten la iteración aparentemente equivalente de las dos formulaciones anteriores. El científico trata de conseguir una teoría T cuyo alcance no se limite exclusivamente al problema P_1 , que ha desencadenado el proceso, sino que tenga un valor de generalidad y universalidad que incluso le permita postular que ha alcanzado la verdad en un cierto dominio (aunque hoy en día esta opción radical es objeto de substanciales matizaciones). Ello puede llevarle a pretender desvelar el ser profundo de las cosas, solapando así el dominio tradicional de la filosofía. No en vano los orígenes de la ciencia moderna están en la filosofía natural, lo que, por otra parte, no deja de encontrar ecos en tiempos recientes. Así, por ejemplo, Fernández Rañada en su reciente biografía sobre *Heisenberg*, ya en la tercera y cuarta líneas del prólogo, escribe “el estudio de la naturaleza debería haber mantenido el certero nombre de filosofía natural”. Más adelante reincide en la añoranza de la locución perdida y alude al significado de la filosofía natural como “amor a la sabiduría sobre la naturaleza [...] hermoso nombre [para la] ciencia”⁶.

Por su parte, el ingeniero considerará finalizada su iteración cuando alcance una solución *acceptable* al problema concreto que tiene entre manos. Puede además suceder que esa solución le lleve a desarrollar un método que permita resolver no sólo un problema concreto sino otros semejantes. En tal caso ha contribuido a crear un método de resolución de problemas con pretensiones de generalidad. De este modo contribuye a establecer un conocimiento respecto a *cómo* funcionan las cosas en el dominio en el que desenvuelve su actividad. Ese conocimiento es una componente fundamental del saber propio de la

⁶ Antonio Fernández-Rañada, *Heisenberg*, Nivola, 2004.

ingeniería. Sin embargo hay que destacar que si la solución tiene rasgos de generalidad tanto mejor, pero que ese no es su objetivo fundamental; éste es el resolver un problema concreto, para lo que se entrelazan imaginación creativa y conocimientos fundamentados.

Los anhelos de alcanzar generalidad en los métodos de resolución empleados abocan a los ingenieros a una labor pareja a la de los científicos, aunque moduladas en cada caso por las diferentes pretensiones de eficiencia y de verdad de unos y otros. Estas diferencias, sin embargo, admiten sutiles gradaciones e incluso pueden llegar a identificarse. Pero prescindiendo de las identificaciones profundas que puedan hacerse entre la pretensión de alcanzar la eficacia o la verdad, es evidente que aunque unos y otros organicen sus conocimientos mediante estructuras lógicas semejantes, sustentadas en un formalismo matemático que en algunos casos alcanza un alto grado de elaboración, no hay que olvidar que la construcción de esos edificios intelectuales que son las teorías constituye un fin para el científico y un medio para el ingeniero. Para el ingeniero el problema siempre prima sobre el método, y no al revés. El ingeniero, cuando genuinamente lo es, tiene un problema y recurre a los métodos existentes para ver si alguno le sirve. Si no es así tratará de ingeniárselas para resolverlo como pueda y tendrá que introducir innovaciones en los métodos en vigor, de modo que si lo consigue contribuirá a incrementar el acervo de los métodos propios de su especialidad, pero, en todo caso, su labor como ingeniero se medirá por la excelencia de la solución al problema (aunque como investigador esté sometido a otros criterios, entre los que acaso el canon de la universalidad ocupe un lugar relevante).

El proceso de la elaboración intelectual que lleva a organizar sistemáticamente los conocimientos de la ingeniería es otro de los modos de ver cómo en el quehacer del ingeniero se hace también ciencia. También nos sirve para esbozar, de una manera general, cómo desde la técnica –desde lo concreto– se gesta la ciencia –lo general–. Es bien sabido que la técnica es indisociable de la génesis de la civilización, mientras que la ciencia es un fenómeno ante el que si bien cabe conceder mayor refinamiento, es muy posterior. Por ello llevando esta gestación a sus últimas consecuencias se puede incluso decir que la ciencia surge históricamente como una hipertrofia de la técnica.

La distinción entre científicos e ingenieros es especialmente patente cuando se habla de la formación de unos y otros. Los científicos tienen, desde sus

primeros pasos por la facultad, una inquebrantable voluntad de alcanzar un conocimiento de las cosas de tal naturaleza que llegue incluso a sustituir a la ontología tradicional de los filósofos. Por ello la sistematización de los conocimientos es algo esencial, ya que con ella se pretende desvelar la profunda unidad que subyace a la desbordante diversidad de los fenómenos naturales. Mediante ella codifican en un sistema abstracto coherente las diferentes manifestaciones de nuestra experiencia con una pretensión, a veces inconfesada, de contribuir a desvelar el ser profundo de las cosas. Por otra parte, para los estudiantes de ingeniería la motivación radical es aprender a *hacer* cosas, conseguir que aquello que conciben se transforme en algo palpable. Aprenden un “saber hacer” (*know-how*) que comprende tanto un conocimiento estructurado como una inasible habilidad. Saben que la legitimidad de sus productos se derivará de que funcionen convenientemente, y no sólo de que estén basados en una teoría pertinente (lo que, por otra parte, es inusual que se consiga y no debe ser, en ningún caso, una meta en sí; puede incluso que sea distorsionador e inconveniente). La sistematización de los conocimientos de los ingenieros mediante teorías adecuadas (la mecánica de los medios continuos, el control automático, la electrónica, la electrotecnia, la aerodinámica, etc.) es especialmente interesante en la fase de formación y para una vida profesional en el mundo académico.

Una segunda acepción de racionalidad que es relevante para el tema que aquí nos ocupa es la debida Herbert Simon a quién ya nos hemos referido anteriormente. Distingue Simon entre dos formas de racionalidad: la sustantiva u objetiva, y la acotada o procedimental. Cuando se dispone de una descripción exhaustiva del objeto sobre el que se va a actuar y se tiene además una formulación matemática precisa de lo que se pretende obtener, entonces la toma de decisiones se convierte en el problema matemático de encontrar la mejor solución de acuerdo con ese criterio de bondad compatible con la descripción que se tiene del objeto con respecto al cual se adopta (lo que se conoce como optimización de la solución de un problema). Si se dan esas circunstancias la solución puede incluso obtenerse mediante el recurso a un algoritmo que conduce a ella de forma automática. El cálculo de esa solución (la ejecución del algoritmo) debe hacerse además en un tiempo razonable concordante con el tiempo en el que se desenvuelve el proceso en cuestión. Para esta forma de racionalidad Simon propone la denominación de racionalidad sustantiva u objetiva.

Sin embargo, en la ejecución de un proyecto y en la mayor parte de los problemas que afronta un ingeniero, rara vez se tiene una descripción de esa naturaleza de los problemas que se pretende resolver, y aunque esto fuera así no siempre podemos formalizar el criterio de bondad que nos permita tomar una decisión adecuada, y aun cuando también esto último fuera posible, puede suceder que para el cálculo de esa solución se requiera un tiempo incompatible con las necesidades prácticas del proceso. Se recurre entonces a una forma alternativa de racionalidad para la que Simon propone la denominación de racionalidad acotada o procedimental. La ejecución de los algoritmos involucrados en la solución, cuando estos existen, tienen un carácter fundamentalmente interactivo en el que el ejecutor del proyecto mantiene una presencia activa; e incluso los propios algoritmos emplean frecuentemente recursos heurísticos.

Mientras que la racionalidad objetiva se basa en criterios de optimización, la procedimental lo hace sustentada en criterios más laxos de satisfacción. Simon propone un ejemplo, extraído de sus trabajos sobre inteligencia artificial, para ilustrar esta diferencia. Se trata del juego del ajedrez. Este juego tiene unas reglas perfectamente establecidas, por lo que el objeto sobre el que se toman decisiones (las piezas sobre el tablero) es perfectamente conocido. También se sabe qué es lo que se pretende: dar jaque al contrario. Por tanto debería ser posible construir un árbol de decisiones que estableciese, de forma inequívoca para cada situación del tablero, las decisiones a tomar para llegar al objetivo deseado. Sin embargo, en tal caso el tiempo de cálculo desborda las posibilidades de cualquier ordenador por lo que, en la práctica, su programación se hace atendiendo sólo a un horizonte de unas cuantas jugadas que se ponderan heurísticamente de acuerdo con la experiencia anterior. De este modo se consigue un funcionamiento satisfactorio, aunque no óptimo. Esa satisfacción se mide por el hecho de que el ordenador gana la partida a ajedrecistas consumados (aunque no siempre, como sucede también con los buenos jugadores humanos).

Las dos formas de racionalidad que postula Simon se adecuan bastante bien a las del científico y el ingeniero. La racionalidad objetiva está más cercana a la del científico, que se recluye con su objeto de estudio en el laboratorio, o en su gabinete, por lo que en sus experimentos o elucubraciones puede pretender aislar su objeto de estudio de modo que tenga una descripción exhaustiva de él. Al mismo tiempo sus objetivos están perfectamente definidos.

El ingeniero, por el contrario, cuando se enfrenta con sus problemas no puede prescindir de lo que le incomoda y tiene que hacerles frente con toda su complejidad. Por otra parte, sus objetivos no suelen estar definidos tan nítidamente como los del científico. Ante este tipo de situaciones se hace más conveniente la racionalidad procedimental que la sustantiva, aunque en su fuero interno el ingeniero pueda añorar esta última. El arte del ingeniero consiste precisamente en saber desenvolverse con acierto en situaciones no bien conocidas de antemano. En este sentido cabe decir que si hay algo característico del método que aplican los ingenieros es la no subordinación estricta a un conocimiento previo y exhaustivo de aquello sobre lo que trabajan. Esta forma de caracterizar la ingeniería es la que ha sido objeto de un tratamiento sistemático por Vaughn Koen, y es la que vamos a ver en el siguiente apartado.

El método de la ingeniería

El título de este apartado puede resultar excesivamente ambicioso. Si no existe unanimidad respecto a qué es el método científico, que ha sido profundamente analizado por los filósofos de la ciencia en el siglo pasado, ¿tiene sentido plantearse con respecto a algo mucho menos estudiado, y aparentemente más disperso, como es la ingeniería? Hay una provocativa propuesta de dar una respuesta afirmativa a esta cuestión, y es la proporcionada por Vaughn Koen en su controvertido libro *Discussion of the Method*⁷. Según este autor:

“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, y a partir de los recursos disponibles”.

La estrategia que subyace a esta definición es la actualización a los tiempos modernos del método de la técnica que es indisoluble del proceso de hominización. La producción de transformaciones en el mundo natural, tal como se lo encontraron los primitivos humanos, para desembocar en el mundo artificial en el que hoy vivimos, es el hilo conductor de la historia de la

⁷ Oxford University Press, 2003.

civilización. Este camino se ha transitado buscando soluciones parciales a los distintos escollos que aparecían en él, al tiempo que se proponían nuevas metas fruto del ingenio humano. El método seguido a lo largo de este recorrido se ajusta bastante bien a la sugerente propuesta de Vaughn Koen.

En la anterior definición juega un papel radical la idea de cambio, de transformación de lo previamente existente en un sentido considerado como deseable para atender a alguna necesidad. En la idea de cambio resulta inevitable ver un juicio de valor por el que se cuele, de forma más o menos sutil, la idea de progreso tan vinculada a la ingeniería moderna. Los cambios que busca el ingeniero son aquellos por los que pretendidamente, aunque sea *a posteriori*, discurre el progreso.

Vaughn Koen procede de la inteligencia artificial y emplea también, como Simon, el juego del ajedrez como ilustración del método de la ingeniería. En cada jugada se pretende producir el *cambio deseado* en la situación sobre el tablero a partir de un *conocimiento incompleto* de los resultados de esa decisión y que sea consistente con los *recursos disponibles* (la situación de las piezas). Para ilustrar el modo de proceder del jugador de ajedrez, que sirve a su vez para mostrar el del ingeniero, Vaughn Koen propone un peculiar concepto de heurística que define como:

“una heurística es todo lo que suministra una ayuda efectiva para la solución de un problema, pero cuya fundamentación no está necesariamente del todo justificada, por lo que la confianza en ella puede ser limitada y no haya que descartar un posible fallo”.

A partir de este concepto Vaughn Koen se extiende en una larga digresión sobre el método del ingeniero que no podemos reproducir aquí, pero que resulta muy sugestiva y clarificadora incluso para el propio ingeniero. Es notable que el concepto de heurística va más allá del dominio propio de la ingeniería, para abarcar también los conceptos básicos de la ciencia. Para Vaughn Koen conceptos fundamentales como el de tiempo o el de causalidad, o reglas como la que la mejor teoría es la más simple, son ejemplos del empleo por los propios científicos de heurísticas. En este sentido, y como cerrando el ciclo, Vaughn Koen propone como una heurística más del método del ingeniero el emplear conocimiento científico siempre que se disponga de él.

Aunque el empleo de ese conocimiento puede ser una herramienta inestimable para el ingeniero, el centro de gravedad de su método no se encuentra en él, sino en su capacidad para resolver problemas. Así como el científico emplea métodos rigurosos (el análisis crítico para la eliminación de errores, como recordábamos más arriba) para construir teorías que permitan explicar los fenómenos del mundo natural, el ingeniero procede de forma análoga pero con relación a sus concepciones, con el fin de crear algo previamente inexistente y que es la meta de su actividad.

Cuando tratamos de delimitar lo que es mera aplicación de la ciencia (la ciencia aplicada) de la más libre y genuina actividad imaginativa y creativa del ingeniero podemos recurrir a la propuesta de Carl Hempel (1905-1997) para caracterizar la explicación científica y emplearla para nuestros propósitos. De acuerdo con ella, si se trata de explicar un acontecimiento A (el *explanandum* en la denominación de Hempel) se requiere la concurrencia de una teoría T (el *explanans*) y de unas circunstancias C, de modo que de la teoría T, si se dan las circunstancias C, se deduce la producción del acontecimiento A que se pretende explicar. Para el proceso anterior Hempel propone el siguiente esquema deductivo:

$$\begin{array}{c} T \textit{ Explanans} \\ \underline{C} \\ A \textit{ Explanandum} \end{array}$$

Este proceso se conoce como cobertura legal de Hempel, ya que la producción del acontecimiento A se desprende inequívocamente de la teoría T cuando se dan los requisitos C. Es decir, la teoría T recoge *a priori* todo el conocimiento necesario para explicar el acontecimiento A; se dice entonces que T “cubre” a A. Por ejemplo, la teoría de la gravitación de Newton cubre, en este sentido, las trayectorias de los planetas (excepto la de Mercurio). De forma análoga se dice, en teoría de modelos, una rama de la moderna teoría de la ciencia, que el movimiento de los planetas es un modelo de la teoría gravitatoria. Todo lo necesario para explicar e incluso predecir las trayectorias está en la teoría.

Se ha pretendido que la aplicación técnica se podía subsumir en el anterior esquema, en el sentido de que si se quiere producir el acontecimiento A lo que

hay que hacer es buscar la teoría T que lo cubra⁸. Una vez se disponga de T todo se reduce a determinar las circunstancias C para que se produzca A. Este es un punto de vista con un sesgo fuertemente cientifista, en el que se prima de forma exagerada lo teórico sobre lo pragmático. Esta primacía suele llevar a creer que lo primero es hacer una teoría y pretender que luego, de su aplicación a casos concretos, resulten beneficios en forma de soluciones. Esta forma de proceder, sin embargo, no resulta muy recomendable no sólo en el dominio de la técnica sino en tantos otros del quehacer humano.

En realidad el anterior proceso no da cuenta de la aplicación técnica, sino de la aplicación científica: del empleo de una teoría científica para resolver un problema práctico. Sin embargo, en la aplicación técnica, como pone de manifiesto Vaughn Koen en su definición del método del ingeniero, no necesariamente se dispone *a priori* de una teoría T que cubra aquello que se está concibiendo. No, desde luego, en los casos de creatividad genial en ingeniería. Por ejemplo, en el caso antes mencionado del primer avión, el *Flyer* de los hermanos Wright, no existía en absoluto una teoría T de la que los esforzados hermanos pudieran valerse para diseñar su avión. Al contrario, la aerodinámica surgió, y alcanzó su deslumbrante desarrollo actual, precisamente del tratamiento riguroso mediante mecánica de fluidos de los problemas del vuelo de un avión. Un avión no está implícito en la aerodinámica sino que con la ayuda de los conocimientos que la forman se puede calcular la viabilidad de un determinado proyecto e incluso introducir mejoras en su concepción. Dicho con otras palabras, la aerodinámica suministra los conocimientos que forman el substrato sobre el que se proyecta (concibe y calcula) un avión que, en ningún caso, se deduce (como sucede con las trayectorias de los planetas y la teoría gravitatoria) de esos conocimientos.

Además de éste, hay múltiples casos históricamente relevantes de lo que se está diciendo. La anónima concepción del reloj mecánico de la Edad Media es una clara muestra de ello. También lo es, de modo muy significativo, la historia de la máquina de vapor que culmina con los trabajos de James Watt (1736-1819). Ninguna teoría previa permitió llegar a estos ingenios. En el caso de la máquina de vapor incluso fue el origen de dos disciplinas: la termodinámica,

⁸ Véase, por ejemplo, “El mito de la ciencia” de M. A. Quitanilla, en *Diccionario de filosofía contemporánea*, Ediciones Sígueme, 1976.

materia que ha alcanzado el rango de rama de la física; y la ingeniería de control automático, disciplina ésta propia de ingenieros, aunque últimamente empieza a ser cultivada sistemáticamente por científicos (¿no estaremos asistiendo a un fenómeno análogo al de la aparición de la termodinámica?). En el caso de la máquina de vapor resulta también interesante reseñar la fecunda relación de Watt con el empresario Matthew Boulton (1728-1809) en lo que constituye uno de los primeros ejemplos históricos de innovación exitosa: creación tecnológica que logra la implantación social mediante una fecunda colaboración con el mundo empresarial. Se apunta así uno de los rasgos definitorios de la modernidad.

Otro caso de interés histórico es la falaz secuencia que parte de la teoría electromagnética de James C. Maxwell (1831-1879), sigue con los experimentos de Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) y desemboca en la radiotelegrafía de Guglielmo Marconi (1874-1937). Es otro contraejemplo claro del empleo de la cobertura legal de Hempel para explicar una innovación en ingeniería. Toda la evidencia histórica apunta a que Marconi no partió de las ecuaciones de Maxwell (la teoría T) a partir de la cual establecer que circunstancias C le permitirían concebir la radiotelegrafía. Las cosas fueron bastante diferentes, aunque Marconi tenía noticias de los experimentos de Hertz quién, por cierto, en lo que estaba interesado era en el descubrimiento del eter y en absoluto sentía la menor inclinación hacía las aplicaciones. Marconi como Edison, como tantos otros inventores de finales del XIX, no se dedicaron a aplicar teorías preexistentes, sino que mediante su ingenio concibieron artificios adecuados a unos determinados propósitos. Aunque Marconi conociese indirectamente los trabajos de Hertz, y ello pudiese llevarle a intuir la posibilidad de la transmisión inalámbrica de señales eléctricas a distancia, la concepción de equipos con los que llevarla a cabo no se basó en las teorías de Maxwell. La secuencia directa desde T a A está bien para la formación de estudiantes de ingeniería, pero en absoluto se ajusta a una reconstrucción histórica. Y ello aun en el caso de que la T proceda de esas disciplinas a las que se ha aludido varias veces y que constituyen el saber propio de la ingeniería; no digamos cuando T pertenece directamente al dominio de las ciencias de la naturaleza. Es posible que los fenómenos que explica una teoría T sean capaces de inspirar algún artificio, o algún modo de intervenir en los fenómenos naturales; es decir, que alguna T sugiera nuevas posibilidades a la técnica. De ahí a que ese artificio sea un modelo de T, en el sentido más arriba recordado de la teoría de modelos, media

un abismo. En este sentido cabe recordar otra cita del ya mencionado Fernando Savater: “No hay mecanismos naturales que nos indiquen [...] cómo resolver los problemas”⁹. La cuestión está precisamente en que no existen esos mecanismos, que serían los que propiamente marcarían la ruta de la ciencia de lo natural a la de lo artificial.

Como en los viejos tiempos, los personajes del mundo zoomórfico que pueblan las fábulas de La Fontaine o Samaniego pueden aportar alguna luz a lo que estamos tratando. Y así viene en nuestra ayuda la sugerente distinción entre erizos y zorros ya empleada por Erasmo de Róterdam (1469-1536) y recientemente recordada por Isaiah Berlin (1909-97) en uno de sus ensayos más conocidos¹⁰. Debida originalmente al soldado-poeta griego del siglo VII a.C. Arquíloco, y retomada por Erasmo, resalta esta fábula el abismo existente “entre aquellos que, por un lado, lo relacionan todo a una sola visión central [...] un único principio organizador en función del cual cobra significado todo...; y, por otra parte, aquellos que persiguen muchos fines, a menudo no relacionados y aun contradictorios”. Los primeros poseen un esquema ordenador que les suministra una visión sistematizada, mientras que los segundos tienen una visión múltiple de la realidad, no subordinada a ningún principio integrador. De acuerdo con la fábula, los erizos ilustran la posesión una visión monocorde inevitablemente totalizadora, una llave que les permite pretender tener acceso a la raíz de todas las experiencias, y que tratan de aplicar a todo lo que encuentran, llegando a rechazar aquello a lo que esa aplicación no conduce a brillantes resultados. Los zorros, por el contrario, parten de la multiplicidad de facetas que presenta todo problema real y buscan, entre el repertorio de posibilidades de cómo afrontar cada uno de estos aspectos, aquellas que les sirvan para el caso concreto que tienen entre manos. El contraste entre zorros y erizos se ha usado tradicionalmente para ilustrar el correspondiente a humanistas y científicos¹¹. Sin embargo aquí proponemos que también es relevante para ilustrar las distintas aptitudes del científico y del ingeniero (aunque esa relevancia pueda resultar extraña para algunos ingenieros fuertemente imbuidos por el espíritu científico convencional).

⁹ *La libertad como destino*, Fundación José Manuel Lara, 2004.

¹⁰ I. Berlin, “El erizo y el zorro”, en *Pensadores rusos*, Fondo de Cultura Económica.

¹¹ Una de las más recientes evocaciones de este contraste puede verse en la reciente obra de Stephen Jay Gould, *Érase una vez el zorro y el erizo*, Crítica, 2003.

Al mismo Berlin debemos también una flageladora crítica del monismo platónico. Este ideal platónico se resume, según Berlin¹², en tres supuestos: todo problema auténtico sólo admite una solución correcta, siendo todas las demás necesariamente erróneas; existe un método para descubrir esas soluciones correctas; y, las soluciones deben ser necesariamente compatibles, pues si no lo fueran, una verdad sería incompatible con otra, cosa lógicamente imposible. El cuestionamiento de estos supuestos conduce a una postura pluralista en la que se puede integrar, de manera natural, el método del ingeniero tal como lo hemos analizado en páginas anteriores.

El ingeniero, en consonancia con todo lo anterior, mantiene una inclinación pluralista en el sentido de que para la concepción de un artefacto se vale, en caso necesario y sin ningún complejo, de diferentes lenguajes de representación, a los que pueden subyacer diferentes concepciones teóricas. Sin embargo, el científico mantiene una inconfesada y persistente pretensión monista de alcanzar una síntesis unitaria de todos los conocimientos que sería, en el límite, la soñada “realidad” (condensada en una formulación abstracta). Esta última, como en el mito de las cavernas, estaría en un cielo platónico al que los científicos tratan de acceder y que constituye el ideal del monismo cientifista. Frente a él se instaura un pragmático pluralismo con el que el ingeniero no puede dejar de simpatizar.

La resolución de problemas concretos constituye la esencia de la profesión del ingeniero. Y para ello emplea todo el conocimiento o la información de que dispone. En un proyecto de ingeniería están involucrados tanto aspectos físicos como económicos. El ingeniero empleará tanto la abstracción matemática como el sentido común. Y su labor, en último extremo, es una labor de síntesis en la que están presentes una gran cantidad de factores. El científico se concentra en un único aspecto de la realidad que estudia; esta concentración resulta fecunda cuando se alcanza esa sublime, inquietante y misteriosa conjunción de simplicidad, generalidad, e incluso belleza en la explicación de algún fenómeno, que está en la raíz del deslumbramiento y admiración que produce la nítida transparencia de la ciencia. El ingeniero, por el contrario, no puede prescindir de la realidad con toda su complejidad; no puede despreciar aquello que incomoda a su esquema conceptual; de ahí su inevitable vertiente pluralista y pragmática.

¹² Ver, por ejemplo, I. Berlin, *El fuste torcido de la humanidad*, Península, 1992, p. 25.

El científico se encierra con su objeto de estudio y lo reelabora con perseverancia hasta desvelar un resultado de validez universal. El ingeniero, por el contrario, aborda su problema teniendo presente sus múltiples facetas, sin poder prescindir de ninguna de ellas, y empleando la sagacidad y la astucia, en su caso, para lograr la pretendida síntesis. Ya se ve cómo los buenos ingenieros y los buenos científicos, por la propia naturaleza de su trabajo, tienen que desarrollar aptitudes que están en las antípodas, con una polarización análoga a la de los zorros y los erizos en la fábula de Arquíloco (lo que no excluye que una misma persona pueda comportarse unas veces como lo uno y otras como lo otro; incluso que sea lo uno creyendo ser lo otro).

Los artificios que pueblan el mundo artificial, así como los métodos empleados por los ingenieros para llevarlos a cabo, forman parte de la cultura. Por ello es posible enhebrarlos en un relato histórico. La cultura de cada momento es un todo, en el que se conciertan sus distintas componentes: lo técnico se articula con lo social (otro pilar de lo artificial, como también lo es lo lingüístico) al abrir nuevas posibilidades en los distintos órdenes de la vida. La transición entre los distintos momentos históricos nos lleva a proponer una metáfora evolucionista de la ingeniería, según la cual en el mundo artificial la mutación es el acto de creación del ingeniero. El árbol evolutivo de los artefactos, que desemboca en nuestro mundo artificial, florece mediante las creaciones de los técnicos que, por su propia naturaleza, es decir por su novedad intrínseca, no están implícitas en el conocimiento existente sino que corresponden auténticos actos de creación, a los que cabe aplicar la cita del viejo Estagirita recordada en la presentación de este libro. Luego se procederá a un proceso de abstracción que, si es el caso, conducirá a la definición de conceptos adecuados para enmarcar esas creaciones en un contexto suficientemente amplio y con pretensiones de universalidad, que es el dominio propio de la ciencia, en cualquiera de sus manifestaciones. Pero volviendo al mundo de los artefactos, sabemos que la selección natural permite la supervivencia de las mutaciones viables; y, análogamente, la selección artificial selecciona aquellos objetos técnicos llamados a pervivir. El ingeniero sabe que la viabilidad de un proyecto reside no sólo en su adecuado sometimiento a las leyes de la naturaleza sino a su pertinente integración en el sistema social al que pretende aportar un objeto útil. La síntesis adecuada de todos esos elementos marcará las cotas de excelencia en la creación de lo artificial por parte de un ingeniero.

Somos una extraña especie. Muchos pensadores han puesto de manifiesto el carácter radical de proyecto inacabado de los seres humanos que necesita constantemente reinventarse y que, en consecuencia, nos lleva tanto a hacernos a nosotros mismos como a transformar nuestro entorno, el cual hemos remodelado profundamente a lo largo de toda la historia de la civilización convirtiéndolo en un artificio, en una inmensa prótesis, en el mundo artificial en el que hoy se desenvuelve nuestra vida y del que nosotros mismos somos parte constituyente. Nuestro éxito biológico, el aparente predominio de nuestra especie sobre la Tierra, es indisociable de ese progreso de lo artificial. Ante la transformación que la técnica ha producido sobre nuestro planeta surgen inacabables preguntas: ¿es reversible el impacto de lo artificial?, ¿nuestro éxito abre una nueva era en la Tierra?, ¿somos la culminación de un proceso, o el principio de otro –o más modestamente una etapa indeterminada en la evolución? Estas cuestiones, y otras muchas análogas, nos sitúan ante el misterioso abismo en el que se entremezclan nuestra existencia y nuestro destino. La pretendida trascendencia de estas cuestiones no debe, sin embargo, enmascarar otras más cotidianas asociadas también a la técnica y a las que los ingenieros, en nuestro ejercicio profesional, difícilmente podemos substraernos: creamos constantemente las condiciones para una transformación en la que parece estar implícita una componente de progreso, en una acepción convencional de ese término, pero que inevitablemente produce efectos colaterales ante los que, muchas veces, carecemos de respuesta. En todo caso resulta inevitable la asunción de riesgos, la clara conciencia de que cualquier cosa que hagamos nos coloca ante una situación indefinida cuyo significado último (cualquier cosa que eso sea) no podemos pretender alcanzar y que inevitablemente nos lleva a aceptar riesgos. ¿Debe seguir el progreso a pesar de todo? ¿Qué voluntad podría pararlo, o al menos reconducirlo? La metáfora del navío en alta mar en plena tormenta y sin referencias claras se hace ineludible.

Por tanto, no parece prudente que el mundo del pensamiento no tenga entre sus inquietudes primordiales al mundo de la técnica, tanto en sus repercusiones sociales (que posiblemente sí lo haga) como en el análisis crítico de esa forma radical de quehacer humano. La invasión de lo artificial, con sus formas peculiares de crearlo e implantarlo socialmente, requiere una ineludible atención. La ingeniería, lo hemos visto repetidamente a lo largo de estas líneas,

surge de una ponderada combinación de creación y cálculo, de una peculiar interacción entre conocimiento y acción; en la creación es determinante el genio imaginativo libremente desplegado, mientras que en el cálculo lo es el conocimiento acumulado y el sometimiento a los rigores de la razón. Así, el ejercicio de la ingeniería resulta de una peculiar conjunción de creatividad y conocimiento. Al mismo tiempo la técnica, como dosificada mezcla de libertad y racionalidad, se manifiesta como una dimensión radical de la condición humana que requiere un análisis presidido por una marcada autonomía.

INGENIERÍA Y APOCALIPSIS

Francisco García Olmedo

(Notas)

1

Poesía y Verdad; Ciencia y Cultura; Ingeniería y Pensamiento. ¿Implica el título de Goethe que la Poesía no es Verdad? ¿No es la Ciencia parte de la Cultura? ¿Es la Ingeniería una gallina que corre sin cabeza hacia el precipicio? ¿O es una gallina ciega que nos acerca el Apocalipsis? Veamos.

2

LA CONQUISTA DEL REINO

No es cierto, Hesiodo,
que fuéramos inmortales.
Ni antes ni después
nos quisieron los dioses
y no fue una edad de oro
la que propició Saturno.
Pagábamos nuestros errores
con la muerte y si es cierto
que hasta hoy perduran
los saludables esqueletos
es porque ésta acechaba
antes de cerrar la noche.
Depredadores demonios

fuimos desde el principio
hechos en la conquista
del reino envenenado
de lo verde. Combatimos
la cicuta con el fuego
nos rindió la piedra el blanco
corazón de la cariópside
y el tosco hierro desveló
el exquisito secreto
de la sámara alada.
Alteramos las claves
de bayas y tubérculos
en busca de un placer
sin vínculo seguro.

No hay sueño sin sustrato.

Ante la injuria del viento
la flor que disimuló
nuestra perversidad
y el fruto dulce y ácido
que sobre pie silvestre
se ofreció inerme.

El mar congelado Glosas y Tergiversos

Somos una especie artificial porque nos valimos del artificio para violar las fronteras de nuestro espacio asignado. Dominamos el fuego, el agua, la piedra y el metal para emprender la conquista del reino de lo verde: sin el tratamiento térmico, la lixiviación o la molienda, no habríamos superado el pobre repertorio de lo blando y lo inocuo, ni nuestra población hubiera excedido la decena de miles de reproductores que al parecer fuimos durante la mayor parte del Pleistoceno. Colonizamos el mundo mediante el artificio, gracias a una dieta artificial que acabaremos de inventar el mismo día de nuestra próxima extinción.

3

Inventamos la Agricultura. Ahormamos el suelo laborable y domesticamos plantas y animales. Ideamos el mayor de todos los artificios y pusimos en marcha la mayor obra de ingeniería en la historia de nuestra especie: en términos de transferencia y conversión de energía, movimiento de materia, flujo hídrico o modificación del medio ambiente. A cambio de producir más alimento por unidad de superficie pagamos un alto precio: mayor trabajo por alimento producido, mayor riesgo de dieta sesgada (obesidad, enfermedades carenciales) y de hambre catastrófica y, sobre todo, se creó una espiral demográfica. En efecto, la mayor demanda de mano de obra para producir alimento fomentó la natalidad, que aumentó la demanda de alimento, que aumentó la de mano de obra, que fomentó la natalidad...

Esta ingeniería recreó el problema al que dio solución.

4

El invento migra con el inventor, y la ingeniería, con el ingeniero. Cavalli-Sforza ha llamado a este fenómeno migración démica, y lo ha documentado mediante la confrontación de los datos arqueológicos y los referentes a los flujos lingüísticos con los gradientes de frecuencias génicas de las poblaciones humanas en Europa. Según esta visión, la superpoblación fuerza a la búsqueda de nuevo suelo laborable, lo que actúa como motor del proceso migratorio (en torno a 1 km/año). En el mismo sentido pueden considerarse recientes observaciones respecto al sur de Asia.

5

En 1798, Thomas Robert Malthus¹ plantea por primera vez en términos modernos el conflicto entre el crecimiento de la población y la producción de alimentos. Su indudable mérito radica en haberlo planteado, no en lo acertado de

¹ T. R. Malthus, *An essay on the principle of population as it affects the future improvement of society, with remarks on the speculations of Mr. Godwin, M. Condorcet and other writers*, Londres, 1798, 1803, 1806, 1807, 1817 y 1826.

sus predicciones. Aunque la población ha acabado creciendo más deprisa de lo predicho, las tasas de incremento en la producción de alimentos se han mantenido por encima de las del crecimiento de la población.

Hoy trabajamos menos para alimentarnos: el 94% menos que en 1600 y el 80% menos que en 1950. Hasta esta última fecha, el milagro se ha hecho posible por la roturación de nuevo territorio, con una contribución más limitada de la mejora del rendimiento por unidad de superficie. Sobre la demanda de alimento gravitan no sólo los aumentos de población (la esperanza de vida, de 40 años en 1850, ronda hoy los 80 años) sino los incrementos de consumo per cápita.

En 1962, Rachel Carson² plantea el conflicto entre humanidad y medio ambiente. De nuevo, su gran acierto consiste en el hecho de plantearlo y no en la perspicacia con que lo hace. Carson escamotea el crecimiento de la población como base del problema (ni siquiera se refiere a este factor) y prefiere imputar todos los males a la estupidez humana y a la ceguera de la técnica. En las últimas cuatro décadas, la mayoría de los remedios que propone han sido descalificados por la tozuda realidad.

6

El hambre que padecen más de 800 millones de seres humanos sigue siendo una de las mayores lacras de la humanidad, pero no ha aumentado sino que ha disminuido: moderadamente en términos absolutos (en unos 200 millones desde 1970) y significativamente en términos relativos, ya que en los últimos 30 años la población mundial se ha duplicado. No es cierto que haya 3.000 millones de hambrientos y que su número esté en rápido aumento. En este asunto, como en otros que trataremos más adelante, hay que constatar que la humanidad está mucho mejor que antes, pero que no está bien, y puede ir a mucho peor.

En contra de las predicciones comúnmente aceptadas a mediados del siglo XX, la disponibilidad de alimentos per capita ha aumentado en todas las regiones del mundo, excepto en el África sub-sahariana, y el precio del alimento básico se ha reducido a la tercera parte en ese período (se ha dividido por 12 desde el siglo XVIII). Hasta los más realistas piensan que, en las próximas décadas, el hambre en el mundo

² R. Carlson, *Silent Spring*, Fawcet, 1962.

está en trance de casi desaparecer en la mayor parte de las regiones, mientras que en África parece que el número de hambrientos puede llegar a duplicarse. Diluir nuestra atención con falsos fantasmas conduce de hecho a ignorar una realidad concreta y aterradora, e interfiere gravemente con la búsqueda de soluciones.

En el caso concreto de los alimentos, no puede concluirse sin más que su disponibilidad per cápita va a seguir aumentando, y su precio disminuyendo, en las próximas décadas, a pesar de que el crecimiento demográfico parece estar atenuándose notablemente. Aun suponiendo que seamos capaces de mantener en las próximas décadas las mismas tasas de aumento de la producción de alimentos que en las pasadas, para el año 2025 se predicen déficits de grano en todas las partes del mundo menos en Europa y en el norte de América³. La capacidad de poner en cultivo nuevo suelo virgen es en extremo limitada y la velocidad a que se destruye es muy elevada. El rápido crecimiento demográfico ha hecho que el suelo laborable per cápita se haya reducido a la mitad en menos de cuarenta años (de 0,5 ha a 0,25 ha) y que vaya a seguir reduciéndose.

El uso de agua dulce renovable para fines humanos supera ya el 50%, por lo que no hay mucho margen para un mayor consumo, especialmente para fines agrícolas. La gestión actual de dicho recurso es deplorable, por lo que, si se mejora la gestión, no parece que se haya alcanzado un techo respecto a su suministro para fines humanos primarios. Sin embargo, las proyecciones futuras de la disponibilidad de agua son más pesimistas que las de suministro de alimentos.

7

Un debate científico sobre la coyuntura actual de la humanidad debe partir de unos datos fiables y comúnmente aceptados, junto con un correcto tratamiento estadístico de los mismos, como algo previo a las inevitables divergencias en su interpretación y valoración. Sin embargo, el debate está tan cargado de ideología que no se duda en distorsionar los datos primarios y en hacer “de mangas capirotas” con los métodos estadísticos con tal de vencer en la enconada lucha. El talón de Aquiles del debate ecológico en sus diversas vertientes –demografía, agua, suelo, contaminación, recursos renovables y no renovables, nutrición, medio

³ T. Dyson, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96:5929-5936, 1999.

ambiente, cambio climático y otros– es precisamente la falsificación de muchos datos de partida y su sesgado tratamiento estadístico. Sin embargo, no debemos deslizarnos desde la constatación de que “el peligro no es tan acuciante como nos quieren hacer creer” hacia un “no debemos, por tanto, preocuparnos grandemente”. Opinamos que una cosa es reducir un problema a sus justos términos (de por sí, aterradores), lo que puede hacer abordable su solución, y otra, negar su existencia.

8

El planeta se enfrenta a una crisis masiva de extinción de especies de animales y plantas. No hay acuerdo sobre las tasas reales a que se está produciendo el fenómeno: E. O. Wilson estima entre 27.000 y 100.000 extinciones al año. Para no quedarse atrás, el agorero Paul Ehrlich apunta 250.000 extinciones al año (con esta tasa es esperable que todas las especies del planeta se extingan entre 2010 y 2015). Algo más conservador, Norman Myers se queda con 40.000 extinciones por año. Pueden ser razonables las estimaciones menos catastrofistas de la Unión para la Conservación Mundial; esta sociedad mantiene una “lista roja”, bien documentada, de especies extinguidas y en peligro de extinción. Los datos no son optimistas: se prevé que el 0.7% de todas las especies se extinguirán en los próximos 50 años, a un ritmo de unas 2.250 al año. Aunque muy lejos de las estimaciones antes mencionadas, la cifra sigue siendo preocupante.

De todos modos, la cuestión de la conservación de la biodiversidad no se reduce a estimar el número de especies desaparecidas, sino que es mucho más compleja y requiere un tratamiento más profundo, donde el énfasis debería ponerse en la conservación de hábitats, no en el mero mantenimiento del número de especies.

9

Casi el 90% de nuestras fuentes de energía actuales no son renovables y lo mismo ocurre con distintos tipos de recursos, entre los que destacan muchos de los principales minerales y metales. A lo largo del siglo XX, se han venido repitiendo ominosos augurios que vaticinaban la rápida extinción de estos

recursos. Respecto a la energía: en 1914, las reservas de petróleo se cifraban en 10 años al ritmo de consumo del momento; en 1939, la estimación era de 13 años; en 1951, de otros 13 años; y en 2000, de 40 años. Del mismo tenor han venido siendo los vaticinios relativos a diversos recursos no energéticos. Resulta ilustrativo que en el famoso best-seller *The limits of growth*, biblia de los catastrofistas publicada en 1972, Meadows et al.⁴ predecían el fin de las reservas de oro para 1981, las de mercurio y plata para 1985, y las de zinc para 1990.

A pesar de que el consumo anual de casi todos estos recursos no renovables ha ido aumentando sin cesar, el hecho es que sus reservas estimadas han ido creciendo a un ritmo aún mayor, de tal modo que el inventario de fin de milenio es mucho más favorable que cualquiera de los que le precedieron. Esto no debe llevarnos a aceptar una conocida frase del jeque Yamani: “La Edad de Piedra terminó, pero no porque se acabara la piedra, y la era del petróleo terminará, pero no por falta de petróleo”. O, para la caso, la aún más perversa de James Watt, Secretario del Interior en el Gobierno Reagan: “No hay que preocuparse por los recursos no renovables porque el Juicio Final está al caer”.

10

Respecto a la posible evolución del clima, el informe del IPCC (grupo de trabajo interdisciplinar dependiente de la Organización Meteorológica Mundial y la ONU), constituye un marco razonable para la discusión.

La base científica del llamado efecto invernadero es bastante simple y es comúnmente aceptada: el CO₂ (y otros gases) tienen capacidad de atrapar calor que de otro modo sería irradiado al espacio. En consecuencia, si la concentración de estos gases aumenta, la temperatura de la atmósfera también debe aumentar. Se sabe que en otros períodos geológicos la temperatura del planeta ha sido mayor que la actual y en esos casos se ha visto una concordancia entre la temperatura y la concentración atmosférica de CO₂. Es un hecho que la concentración de CO₂ ha aumentado aproximadamente un 30% desde la revolución industrial –debido, al menos en parte, a las emisiones de origen humano– y que se ha producido un aumento de la temperatura media en el

⁴ D. H. Meadows et al., *The limits of growth*, Potomac Associates, 1972.

último siglo, pero existe incertidumbre sobre qué parte del calentamiento tiene origen antropogénico.

Las principales conclusiones del mencionado informe son en esencia las siguientes: 1) La tierra se ha calentado aproximadamente 0,6 grados en los últimos 50 años, principalmente debido a la liberación de gases con efecto invernadero; 2) La temperatura podría aumentar entre 1,4 y 5,8 grados durante el siglo XXI. 3) Las precipitaciones también aumentarán globalmente, aunque en algunas regiones disminuirán. 4) El nivel del mar podrá subir entre 0,09 y 0,88 metros; 5) Otros cambios posibles, aunque difíciles de valorar, son el aumento en los “extremos” climáticos, la reducción o parada de la circulación termo-salina y cambios en los monzones y en los fenómenos asociados a “El Niño”. Se postulan diferentes “escenarios”, que constituyen hipótesis sobre cómo podrían transcurrir los acontecimientos, pero no se asigna una probabilidad a cada uno de ellos, ya que hasta cierto punto, constituyen “opciones” sobre cómo el mundo va a responder en el futuro a este reto.

11

En resumen:

La migración démica terminó hacia mediados del siglo XX y a la humanidad se le ha quedado estrecho el planeta. Aumentan la población y el consumo per cápita. Hemos roturado ya todo lo que era razonable roturar y millones de hectáreas que nunca debían haberse tocado, consumimos ya el 40% de la producción vegetal (en suelo cultivado, pastos y bosque) y más del 50% del agua dulce renovable que es accesible; somos responsables del 20% del CO₂ generado y el N₂ fijado artificialmente es ya el 58% del fijado de modo natural⁵.

Nuestro conocimiento del habitat global y nuestra capacidad técnica para explotarlo no están en consonancia con nuestra habilidad para gestionarlo de una forma sustentable.

⁵ P. Vitousek *et al.*, *Science* 277, 294, 1997.

12

¿Está la humanidad en la misma tesitura que los elefantes del parque Kruger?

El traslado de jóvenes a circos y zoológicos los convierte en delincuentes, y el de familias enteras a otros habitats capaces de acogerlas es una posibilidad muy limitada. La contracepción no parece hacer el milagro. Después de una moratoria, se ha optado por dejar una parte del parque a lo que el destino le depare, a otra con una población límite y a otra con una población muy por debajo del límite. En las dos últimas no cabe sino el destrío planificado. Eso sí, no se hará como antes, mediante el uso previo de dardos que inmovilizan pero no insensibilizan, sino por disparos certeros a cargo de francotiradores experimentados. En la actualidad, es evidente que en nuestro mundo no faltan los francotiradores con experiencia.

¿Tiene alguien idea de a que alternativa se acogerá nuestra especie?

13

ISLA DE PASCUA

La lluvia detuvo la noche
y el viento empujó la agonía
del amanecer hasta el ocaso
en ese sitio donde la angustia
precedió al hombre
y le sobrevivirá
cuando se extinga
en esa isla sin puerto
ni archipiélago que la atesore
en esa estrella caída
de una oscura galaxia.

En mi recuerdo
el fulgor del caballo

bajo el sol en fuga
y la armonía monótona
de una raza sin memoria
de su hazaña en la piedra.

Natura según Altroío

¿Se desplomará nuestra civilización como lo hizo la de la isla de Pascua?
¿Estamos abocados a un rápido declive, a convertirnos en una especie diezmada que vagamente recuerde nuestro conflictivo presente como pasado esplendor?

En el siglo XVIII, los navegantes europeos que llegaron a la Isla de Pascua encontraron una población reducida que había olvidado su pasada historia. Habían desaparecido los árboles y los pájaros, presumiblemente, por este orden. Sugieren Rolett y Diamond⁶ que la ciega y enajenada competencia entre los distintos clanes por superarse en la ingeniería de la piedra fue tal vez la causa final del desastre.

14

En 1785 el mecánico Oliver Evans puso en funcionamiento en el Redclay Creek de los bosques de Delaware un singular dispositivo de madera y hierro, de tres pisos de alto, que él había construido con sus propias manos: un molino sin molinero, la primera instalación productiva totalmente automática del mundo. Hans Magnus Enzensberger⁷ nos recuerda el primer molino sin molinero para subrayar que un autómatas no sólo hace superfluo el trabajo, sino también al trabajador. Para Enzensberger, no sólo la evolución biológica y la histórica son inconscientes, sino también la técnica lo es; y el inventor es su ciego ayudante: la ingeniería como gallina ciega. Viene a decir: Pasó mucho tiempo hasta que la humanidad empezó a devanarse los sesos sobre los medios... Primero el lenguaje después la gramática, la retórica, la filosofía del lenguaje; primero la escritura y después la reflexión sobre la escrituralidad; primero la moneda y después la numismática. La teoría va cojeando

⁶ B. Rolett y J. Diamond, *Nature* 431: 443-446, 2004.

⁷ H. M. Enzensberger, *Los elixires de la Ciencia*, Anagrama, 2002.

detrás de su objeto... y los medios técnicos no sólo adelantan a la teoría sino también a la práctica. Gutenberg sólo quería escribir una hermosa biblia... Bell sólo pensó en los sordos... El telégrafo interesó primero a militares y especuladores, y el cine y la radio, a Hitler. Los inventores mueren en el asilo, superados por sus juguetes.

No le falta razón a Enszemberger y sus ejemplos están bien traídos, pero se le puede matizar aduciendo que hubo visionarios que acertaron y que la nómina de inventores e ingenieros que se adelantaron a su tiempo... *and laughed all the way to the bank* es interminable.

15

Martín Rees⁸, Señor de Greenwich, ha cambiado su solemne capa de Astrónomo Real por el cónico capirote de astrólogo popular para turbarnos con la conjetura de que tal vez sea éste nuestro último siglo. Al cambiar el telescopio por la bola de cristal, Rees no sólo adopta una nueva profesión sino una escala de tiempos distinta

De acuerdo: tenemos suerte de haber sobrevivido tanto tiempo. Entre otros peligros, hemos sobrevivido al de devastación nuclear, que todavía pende sobre nosotros y que durante la guerra fría estuvo más próximo a concretarse de lo que somos conscientes. Sin embargo, son nebulosos los peligros que, según Rees, nos puede plantear la nueva ciencia. Es cierto que, por primera vez en la historia de la especie, el ser humano ha dado un salto más allá de la capacidad de modificación de su forma de vida para incidir directamente sobre su propia naturaleza, y que esta nueva capacidad no estará exenta de peligros –ningún avance de la humanidad lo ha estado–, pero está lejos de ser evidente que éstos vayan a tener las dimensiones que le atribuye.

No ha podido eludir Rees el examen de la posibilidad de que en este siglo se acceda al nebuloso ámbito de los implantes cerebrales, las moléculas de la inteligencia y los robots superhumanos, esas máquinas que, según Hans Moravec, podrían tomar el relevo de nuestra especie: algo así como el molino sin molinero a que se refería Enzensberger llevado a su dimensión apocalíptica.

Pensamos que al mezclar los problemas de aquí y ahora con otros de ciencia-ficción, estrafalarios o no, puede ser en extremo contraproducente.

⁸ M. Rees, *Nuestra hora final*, Crítica, 2003.

¿Qué podemos esperar del terror y del error en el nuevo siglo? Coincidimos con Rees en que del terror sólo podemos esperar incidentes de magnitud creciente en las próximas décadas. Sin embargo, no creemos que cualquier científico en su sano juicio pueda aceptar que las consecuencias del error científico, que se han producido en el pasado y se producirán en el futuro, hayan seguido o vayan a seguir el mismo patrón cuantitativo y temporal que las del terror. Resulta difícil admitir que a medida que aumentamos nuestro conocimiento sobre el mundo natural vaya a aumentar en paralelo nuestra capacidad de equivocarnos. Terror y error nunca deberían ponerse en el mismo saco.

16

¿Puede el pensamiento puro decir los años que le quedan a la Humanidad? Es obvio que no. El del Apocalipsis es un reloj que puede atrasar o adelantar, incluso acelerar, pero no funcionar en reverso. La humanidad ha llegado a su tamaño actual a través de un proceso inconsciente y complejo, y es absurdo tratar de resolver los problemas del futuro volviendo a soluciones del pasado.

De modo explícito o implícito, los agoreros profesionales parecen postular que la Ilustración, con el nacimiento de la ciencia moderna, ha traído consigo la voluntad de controlar la naturaleza y, con ello, su destrucción. Para llegar a esta conclusión, hay que convertir el reino anterior en una Arcadia feliz, cuando en realidad fue una era oscura de hambres catastróficas y pestes asoladoras, en la que la esperanza de vida no superaba los 35 años.

El día del Apocalipsis es una fecha incierta y debemos actuar como si fuéramos capaces de posponerla. Luego, nos sucederán las bacterias.

ÚLTIMO SIGLO

El millón de milenios es la unidad de oro
de todos los cálculos sobre la hora última
que ha de llegarle a cada reino... dicen:
sólo falta uno para que sangre y savia
se extingan sin remedio,

tal vez en dos se vacíen los mares
con sus restantes tesoros,
en no más de siete todo acabará fundido
en un sol rojo y gigante.

Dilatado sería entonces el plazo de nuestra enmienda,
incontables los dulces días dispuestos para el placer
y favorable el augurio:
como la más sabia de las especies, seríamos
los últimos en saltar del barco en llamas,
sabríamos engañar a nuestro sino,
eludir su sentencia hasta el último segundo.

Pero ahora tú, Martin, Señor de Greenwich,
nos turbas cuando aventuras
que tal vez sea éste nuestro último siglo
y que la cruz de la moneda en el aire
decidirá si veremos el principio del siguiente.
Propones que los otros mamíferos nos sobrevivirán
porque carecen del puñal ya afilado para el suicidio,
que del pedernal y el fuego a la célula y el cosmos,
el camino sólo sigue hasta un inmediato exitus.

Según tu terrible conjetura, la inocente Naturaleza,
como último árbitro de nuestra intensa búsqueda,
lejos nos llevó de la barbarie
en una amplia órbita circular
que pronto se anudará bajo un cadalso.
Dices que, en unas décadas, tanto sabremos
sobre nosotros mismos que cualquier individuo,
lúcido o lunático,
tendrá el poder de dar por concluida nuestra jornada.

Imagina el huracanado suspiro de alivio
del resto de las especies.

Espero, Martin,
que para esa hecatombe seremos tan torpes
como lo hemos sido en la inútil búsqueda
de la felicidad.

Bienaventurados, entonces,
los contados supervivientes
porque de ellos sería
el reino nuevo y liberado
que surgiría de las ruinas.

El mar congelado
Glosas y Tergiversos

Fundación EL MONTE

Presidente de la Caja de Ahorros El Monte:

José María Bueno Lidón

Presidente de la Fundación El Monte:

Ángel M. López y López

Directora General de la Caja de Ahorros El Monte:

María Luisa Lombardero Barceló

Secretario de la Fundación:

Rafael Lamet Dornaletche

Jefe del Gabinete del Presidente:

Fernando Vega Holm

Director del Centro Cultural El Monte:

Antonio Cáceres Salazar

Edita: Fundación El Monte

Maqueta: Pedro Bazán

© de la edición, Fundación El Monte

© de los textos, sus autores

ISBN: 84-8455-190-3

Depósito Legal: SE-261-2006

Impresión: PINELO. Talleres Gráficos, S.L.

Este libro
se terminó de imprimir
en Pinelo Talleres Gráficos
el 3 de febrero de 2006,
festividad de
San Blas.