

215

LA  
CIENCIA  
PARA  
TODOS

# El rompecabezas de la ingeniería

Por qué y cómo  
se transforma  
el mundo

CIENCIAS  
APLICADAS

DANIEL RESÉNDIZ NÚÑEZ



## La Ciencia para Todos

Desde el nacimiento de la colección de divulgación científica del Fondo de Cultura Económica en 1986, ésta ha mantenido un ritmo siempre ascendente que ha superado las aspiraciones de las personas e instituciones que la hicieron posible. Los científicos siempre han aportado material, con lo que han sumado a su trabajo la incursión en un campo nuevo: escribir de modo que los temas más complejos y casi inaccesibles puedan ser entendidos por los estudiantes y los lectores sin formación científica.

A los diez años de este fructífero trabajo se dio un paso adelante, que consistió en abrir la colección a los creadores de la ciencia que se piensa y crea en todos los ámbitos de la lengua española —y ahora también del portugués—, razón por la cual tomó el nombre de La Ciencia para Todos.

Del Río Bravo al Cabo de Hornos y, a través de la mar Océano, a la Península Ibérica, está en marcha un ejército integrado por un vasto número de investigadores, científicos y técnicos, que extienden sus actividades por todos los campos de la ciencia moderna, la cual se encuentra en plena revolución y continuamente va cambiando nuestra forma de pensar y observar cuanto nos rodea.

La internacionalización de La Ciencia para Todos no es sólo en extensión sino en profundidad. Es necesario pensar una ciencia en nuestros idiomas que, de acuerdo con nuestra tradición humanista, crezca sin olvidar al hombre, que es, en última instancia, su fin.

Y, en consecuencia, su propósito principal es poner el pensamiento

Científico en manos de nuestros jóvenes, quienes, al llegar su turno,

crearán una ciencia que, sin desdeñar a ninguna otra, lleve la impronta de nuestros pueblos.

Comité de Selección

Dr. Antonio Alonso

Dr. Francisco Bolívar Zapata

Dr. Javier Bracho

Dr. Juan Luis Cifuentes

Dra. Julieta Fierro

Dr. Jorge Flores Valdés

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Leopoldo García-Colín Scherer

Dr. Adolfo Guzmán Arenas

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Jaime Martuscelli

Dra. Isaura Meza

Dr. José Luis Morán López

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. José Antonio de la Peña

Dr. Ruy Pérez Tamayo

Dr. Julio Rubio Oca

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Dr. Elías Trabulse

Daniel Reséndiz Núñez

---

# EL ROMPECABEZAS DE LA INGENIERÍA

Por qué y cómo  
se transforma el mundo



la  
**ciencia/215**  
para todos

Primera edición, 2008

Reséndiz Núñez, Daniel

El rompecabezas de la ingeniería. Por qué y cómo se transforma el mundo /  
Daniel Reséndiz Núñez. — México FCE, SEP,

CONACyT, 2008

393 p. ; 21 x 14 cm — (Colec. La Ciencia para Todos ,215)

ISBN 978-968-16-8444-0

1. Ingeniería 1. Ser. II. t.

LC TA155 Dewey 508.2 C569 V.215

Distribución mundial

La Ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Comentarios y sugerencias:

[laciencia@fondodeculturaeconomica.com](mailto:laciencia@fondodeculturaeconomica.com)

[www.fondodeculturaeconomica.com](http://www.fondodeculturaeconomica.com)

Tel. (55) 5227-4672 Fax (55) 5227-4694

Empresa certificada ISO 900 1:2000

Diseño de portada: León Muñoz Santini

D. R. © 2008, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco, 227; 14738 México, D. E

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra

—Incluido el diseño tipográfico y de portada—, sea cual fuere el medio, electrónico o mecánico, sin el consentimiento por escrito del editor.

ISBN 978-968-16-8444-0

Impreso en México • Printed in México

# ÍNDICE

## Prólogo

### Primera parte

#### LOS PROCESOS INTELECTUALES DE LA INGENIERÍA

##### I. Preludio: cómo armar un rompecabezas infinito.

1. Dos hechos obvios
2. Una actitud sensata
3. Las reglas del juego

##### II. El quehacer del ingeniero (y por qué se transforma el mundo)

1. Introducción
2. Qué es la ingeniería
3. Las dos funciones centrales del ingeniero
4. La diversidad de actividades del ingeniero
5. El nacimiento de las ingenierías la aparición de los ingenieros y la interacción con la naturaleza.
6. Por qué se transforma el mundo: la gama infinita de necesidades humanas

### III. Los métodos de la ingeniería (o cómo cambiar racionalmente el mundo)

1. ¿Qué debe saber hacer un ingeniero?
2. Los procesos intelectuales del diagnóstico
3. Conocimientos y capacidades necesarios para el diagnóstico
4. Los procesos intelectuales del diseño
5. La verificación o revisión del diseño
6. La obligación de optimizar y especificar
7. Conocimientos y capacidades necesarios para diseñar
8. La inevitable incertidumbre

### IV. El juicio profesional

1. La incertidumbre y la obligación de decidir
2. El juicio y la necesidad humana de certeza
3. El papel del juicio profesional
4. Naturaleza del juicio profesional
5. Desarrollo del juicio profesional
6. El trabajo en equipo

### V. La razón no basta: otras capacidades del ingeniero

1. Limitaciones de la razón
2. El territorio de la razón
3. Papel de la imaginación
4. Papel de la laboriosidad
5. Voluntad y afecto como capacidades profesionales
6. La función psíquica de la laboriosidad y el afecto

## VI. La formación de ingenieros

1. El punto de partida
2. Importancia de las formaciones escolarizada y práctica
3. El papel de la escuela de ingeniería
4. El profesorado y los planes de estudio
5. Los instrumentos de trabajo
6. Actitudes ante la tecnología
7. Género e ingeniería

### Segunda parte

## EL ENTORNO DE LA INGENIERÍA

## VII. Ciencia e ingeniería

1. Las dos fuentes de conocimiento objetivo.
2. Galileo y el método científico
3. El poder que da el conocimiento
4. Los costos del conocimiento
5. Las diferencias entre ciencia e ingeniería



## VIII. Desarrollo sostenible e ingeniería

1. La perturbación del entorno por el hombre.
2. ¿En qué consiste el desarrollo?
3. Un ejemplo: el debate sobre las grandes presas
4. Los argumentos del debate
5. El concepto de desarrollo sostenible
6. El desarrollo sostenible exige esfuerzo
7. No todo puede preverse durante el diseño
8. Una definición operativa de lo sostenible
9. El carácter evolutivo de los proyectos
10. Lecciones de la historia
11. Conclusiones

## IX. Competitividad e ingeniería

1. ¿Competir o cooperar?
2. Papel de la ingeniería
3. Condiciones necesarias en el gremio
4. Condiciones necesarias en el gobierno
5. Condiciones necesarias en el empresariado
6. Condiciones necesarias en las instituciones académicas
7. Pertinencia y suficiencia de las condiciones identificadas
8. El camino hacia la competitividad

## X. Humanismo e ingeniería

1. La misión de los profesionales
2. El humanismo: nacimiento y Renacimiento. . . .
3. Dignidad de todos los hombres libres
4. Reconocimiento de la individualidad
5. La voluntad y el libre albedrío
6. Vitalidad y cultura
7. Un fundamento humano para la ética
8. El humanismo y sus avatares
9. El humanismo hoy

## XI. Ética e ingeniería

1. Definiciones y esclarecimientos
2. Relaciones entre ingeniería y ética
3. La ética en la historia de la ingeniería
4. Ética y legislación
5. Profesionalismo y códigos de conducta profesional
6. La educación ética y otros requerimientos. . . .
7. Obstáculos que enfrenta el comportamiento ético

## Tercera parte

### EL CONTEXTO DE LA INGENIERÍA

#### XII. La tecnología y los valores sociales

1. Ingeniería, tecnología y valores
2. Lo peculiar de nuestra especie
3. Naturaleza de los valores sociales
4. Progreso y circularidad
5. Naturaleza de la tecnología
6. De la angustia inerte a la angustia tecnológica.
7. La tecnología es una cosa, no un sujeto
8. Temor y riesgo
9. Con la incertidumbre volvemos a topar
10. El retorno es imposible

#### XIII. Los sistemas socio-técnicos

1. Sistema y subsistemas
2. Evaluación de proyectos
3. El enfoque y el lenguaje de sistemas
4. Dinámica de los sistemas socio-técnicos
5. Retrasos y desestabilización
6. Falsas soluciones y círculos viciosos
7. El problema de los recursos comunitarios

#### XIV. La incertidumbre y su manejo

1. Aceptar la incertidumbre
2. La incertidumbre objetiva
3. La incertidumbre subjetiva
4. Ventajas de la incertidumbre
5. Manejo de la incertidumbre en la ingeniería
6. Uso de la teoría de probabilidades

#### XV. Las fallas en ingeniería

1. Los límites de la seguridad
2. El factor de seguridad
3. Trascendencia de las fallas
4. ¿Hay fallas socialmente aceptables y aceptadas?
5. El error humano en diseño
6. Incompetencia y negligencia
7. Presiones injustificadas
8. Fallas por mecanismos desconocidos: el precio de la innovación .

Bibliografía

Índice de autores

Índice de materias

*In memoriam*

Fernando Hiriart (1914-2005) Raúl J. Marsal (1915-1990)

Emilio Rosenblueth (1926-1994)

## **PRÓLOGO**

La ingeniería ha venido transformando el mundo durante siglos, sea por iniciativa de la sociedad o con su anuencia tácita. Sus creaciones poseen rasgos ambivalentes, pues por un lado resuelven problemas y satisfacen variadas e importantes necesidades de la humanidad y por otro tienen ciertas repercusiones negativas, a veces imprevistas.

Este libro trata de la ingeniería, pero no es un libro especializado; está dirigido a todos los lectores cultos y curiosos (incluso ingenieros) interesados en que la ingeniería, a la vez que siga atendiendo las necesidades humanas, ponga atención creciente en hacer mínimas las repercusiones indeseables de sus proyectos. Para esto es necesario que la sociedad conozca la manera como funciona la ingeniería y que los ingenieros piensen su quehacer desde la óptica de la sociedad; es decir, hace falta que ingenieros y no ingenieros compartan ciertas nociones sobre la ingeniería. Contribuir a ello es el propósito del libro. Si se avanza en este sentido, la ingeniería podrá cumplir mejor su misión al servicio del hombre.<sup>1</sup>

Sin importar vocación, ocupación o posición social, todos tenemos intereses puestos en la ingeniería, pues nadie está excluido de los beneficios y los riesgos derivados de lo que ella hace. Todos necesitamos saber de la ingeniería lo suficiente para cuidar que sus proyectos respondan a nuestras necesidades, lo mismo las de hoy que las mediatas. La búsqueda de creaciones técnicas para resolver los nuevos problemas de la humanidad no debe detenerse, pero es deseable que esa búsqueda sea más participativa, y esta tarea es de todos. Los proyectos de ingeniería no son obra sólo de ingenieros, sino también de quienes los demandan, especifican o condicionan, sean sus dueños, el público, o quienes actúan en representación de ellos. Conviene entonces que los no ingenieros conozcan los criterios de decisión de la ingeniería, igual que es deseable el conocimiento de las leyes por los no abogados, de la higiene por los no médicos, de la ciencia por los no científicos y de la ética por los no filósofos. Por su parte, los ingenieros debieran saber más de las relaciones entre su profesión y otros campos. Ambas cosas contribuirían a corregir el mayor vicio de nuestro tiempo: la especialización exagerada, que tanto en la educación como en la vida práctica confina a cada uno dentro de un saber particular y priva a todos de lo que debiera ser el objetivo central de la educación y de la vida: una visión ancha del conocimiento universal y de las relaciones entre especialidades. En algún momento el individuo educado debiera levantar la vista para mirar más allá de su propia ocupación y adquirir un panorama general del mundo.

Puesto que mi intención es que el libro pueda ser leído por el público general, uso en él un lenguaje no especializado. Espero que los más exigentes de mis colegas ingenieros y otros conocedores de los temas que aquí abordo disculpen las pequeñas simplificaciones a que esto obliga, porque a cambio de ellas eximo al lector de explicaciones engorrosas. Así, a

---

<sup>1</sup> Pese a cierta moda reciente, el término más apropiado para referirse al conjunto de los dos géneros de nuestra especie es hombre, cuya primera acepción es precisamente ser humano. Decir “hombres y mujeres” o “ellos y ellas” cuando nos referimos a lo que ambos tienen en común es contrario al propósito de reconocer la igualdad de los géneros, pues implica que éstos son tan diferentes que no se les puede abarcar con una misma palabra. ¿Habría entonces que reescribir las obras de todos los filósofos, teólogos y antropólogos que han existido desde la Antigüedad y han hablado del hombre como el conjunto indivisible de mujeres y varones? ¿O cabría dejar que los escritos de todos esos pensadores se interpretaran como excluyentes de las mujeres?

los no iniciados en los principios de la tecnología y la ingeniería, el libro puede servirles de introducción al tema; a los estudiantes de ingeniería, la imagen global que aquí se da de esta profesión les ayudará a orientarse dentro de ella y puede salvarlos de perderse en los mil detalles que deberán aprender durante sus estudios; finalmente, a los ingenieros experimentados quizá les resulte interesante comparar sus propias ideas y vivencias con lo que aquí digo.

Ahora bien, la ingeniería es inabarcable; por tanto, tuve que ser selectivo al decidir qué cabría aquí y qué no. Usé para este fin dos reglas sencillas: 1) incluir lo mínimo necesario para dar una visión general del quehacer, los métodos y los criterios del ingeniero, y de cómo todo ello se relaciona con los intereses de la sociedad; 2) dar cabida a tópicos muy importantes que suelen tratarse poco en escritos asequibles al público y a la profesión, como la naturaleza del juicio profesional o la relación entre la ingeniería, el humanismo y la ética. Me propuse, pues, escribir un pequeño libro que sirviera a ingenieros y no ingenieros; que fuese útil para estos últimos porque contuviese el conocimiento indispensable que de la ingeniería debiera tener una persona culta, y que para los profesionales y estudiantes de cualquier rama de la ingeniería constituyese un complemento a su saber especializado; esto es, un conjunto coherente de nociones sobre la profesión en sí y sobre sus relaciones con el entorno social. El lector dirá en qué grado logré mis propósitos.

Para estimular a los lectores a explorar por su cuenta otros textos sobre los temas aquí tratados, incluyo algunas notas a de página con conexiones a escritos más especializados. A veces también uso tales notas para breves digresiones que creo pertinentes o para tocar cuestiones de corte un poco más académico que el tono general del libro.<sup>2</sup> <sup>2</sup>Por lo demás, todo lo que digo basa en mi propia experiencia y asumo la responsabilidad por lo que de ella infiero, aunque reconozco lo mucho que de mis ideas básicas debo a mis mejores maestros y colegas.

Poco más de la mitad de mi vida profesional la he dedicado a la investigación científica y a la educación (en el laboratorio, el gabinete, el aula, la dirección de instituciones especializadas y la conducción de políticas públicas); el resto, al ejercicio profesional de la ingeniería. Como investigador me he concentrado en pocas líneas de trabajo científico dentro de un par de disciplinas de la ingeniería civil, mientras que como ingeniero he sido partícipe o responsable de una gama de proyectos que excede mi campo de formación inicial. Esa diferente extensión de mi actividad en uno y otro campos no es arbitraria, sino consecuencia natural de que la ciencia permite, y por eficiencia aun impone, grados altos de especialización y reduccionismo, mientras la ingeniería demanda resolver cada problema tal cual es, integralmente y en su propio contexto, sin mutilaciones y haciendo caso omiso de casillas disciplinares. Por tanto, el ingeniero tiene que hacer ciertas incursiones en territorios que en principio pueden parecer ajenos, y cuanto más seriamente busca comprender éstos como campos conexos, y más amplia es la gama de proyectos en que participa, más expuesto está a ganar sensibilidad y buen juicio aplicables a proyectos subsecuentes. Consecuencia de mis contactos con ramas muy diversas de la ingeniería es mi convicción de que los conceptos de este libro son aplicables por igual a todas ellas, con abstracción de los conocimientos y tópicos especializados de cada una. Como el del ingeniero no es trabajo solitario, sino de equipo, esos mismos contactos profesionales con jefes, colegas y subordinados de variadas trayectorias me hicieron deudor intelectual de todos ellos; cualquier intento de dar a cada quien el crédito que merece resultaría

---

<sup>2</sup> Esto, por cierto, constituye el único rasgo del presente texto que puede asemejarlo a una obra especializada. El lector que no se interese en detalles puede omitir del todo la lectura de las notas de pie de página sin perder la comprensión general de lo que se expone. Por el contrario, quien quiera profundizar en algún tópico haría bien en leer dichas notas y, hasta el grado en que le interese, el contenido de las respectivas referencias.



imposible o injusto: baste decir que la observación cercana de los métodos, capacidades, hábitos y logros de cada uno contribuyó, en el contexto de mis propias responsabilidades y vivencias, a forjar lo que sé y a fundar lo que creo. Sin embargo, debo particularizar la influencia que sobre mí ejercieron tres personajes decisivos: primero Raúl J. Marsal y Emilio Rosenblueth por lo mucho que ambos hicieron en pro de mi formación y desarrollo, por los desafíos intelectuales que me plantearon y por la amplia libertad que me dieron para abordar sus retos. Los dos pusieron en mí un interés tan grande y cordial que su trato se tradujo no sólo en aprendizaje, sino en gozo existencial; de ellos aprendí no sólo en mi juventud, sino durante todos los muchos años que para mi fortuna los tuve cerca; habiendo sido los supervisores de mis primeros pasos en la ciencia, ellos mismos me indujeron a participar en proyectos de ingeniería paralelos a mis investigaciones, en búsqueda de sinergias entre una y otra actividad. Esta circunstancia me allanó el acceso al tercer personaje: Fernando Hiriart, hombre a la vez reflexivo y de acción, siempre interesado en ensayar la aplicación práctica de nuevos conocimientos y métodos. Participar tempranamente en los equipos de trabajo que Hiriart encabezaba me dio la posibilidad de observar sus métodos personales y fomentó mi aprecio por la profesión, que según él mismo nunca acaba de aprenderse, pero conforme se ejerce va mostrando con nitidez cada una de sus múltiples facetas. Fue Hiriart, con su ejemplo silencioso y sonriente, quien quizá sin proponérselo más me enseñó acerca de la práctica rigurosa de la ingeniería; después me daría también un privilegio que duró muchos años y casi hasta los últimos días de su vida: sostener con él regularmente breves diálogos cuyo tema inicial podía ser cualquiera, aunque siempre desembocaba en algún aspecto específico de un proyecto de ingeniería en marcha, un resultado de investigación reciente, o un tópico importante de la profesión. Por lo mucho que les debo, el libro está dedicado a la memoria de estos tres grandes ingenieros.

Dicho el tema y el talante del libro, más las influencias que incluso inconscientemente puede haber en él, cabe explicar sus motivaciones. Desde mis tiempos de estudiante hallé en la ingeniería interrogantes que me producían fascinación, inquietud o perplejidad, y después he topado con muchas más de ellas. Entre las cuestiones viejas y nuevas a que aludo están las siguientes: ¿cuán seguro puede estar un ingeniero de que sus diseños no van a fallar y a causar muertes u otros daños? ¿Qué es necesario y suficiente para ser un buen ingeniero? ¿Qué de lo que el ingeniero sabe que se aprende en la escuela y qué en otros contextos, y en cuáles específicamente? ¿Cómo puede hacerse más eficaz cada uno de esos aprendizajes? ¿Cuál es el peso relativo del conocimiento científico en el saber de la ingeniería y qué otros tipos de conocimiento se usan en ella? ¿Qué efectos tienen las dudas del ingeniero en lo que diseña, y cómo las mismas afectan a sus clientes y a la sociedad en general? ¿Debe intervenir alguien más que los propios ingenieros en las decisiones de la ingeniería, y en caso afirmativo quién, porqué, cómo y en cuáles decisiones? ¿Quién ejerce control sobre lo que la ingeniería hace? ¿Qué es en ingeniería lo malo, lo bueno y lo mejor, y cómo interviene en ella la ética? ¿Tiene el humanismo relevancia en la ingeniería? ¿Caben en ella las preocupaciones ambientales y, en caso de que sí, qué papel específico corresponde a la ingeniería en la búsqueda de modos sostenibles de desarrollo? La lista de preguntas de este tipo es infinita; su importancia radica en que la respuesta puntual a cada una puede revelar a los ingenieros cómo atender más

atinadamente las necesidades humanas, y a los no ingenieros cómo hacer de la ingeniería un recurso a la vez más útil para el presente y menos gravoso para el futuro de la humanidad.

Cada capítulo del libro se refiere a la ingeniería desde un ángulo distinto, a fin de poner en evidencia aspectos de ella que interesan tanto a los ingenieros como a otros actores sociales. Si a muchos la ingeniería les parece lejana, y hay quienes la ven como amenaza irremediable que pende, por ejemplo, sobre lo que queda de los ambientes naturales del planeta, es porque tópicos como los que aquí se discuten no suelen exponerse en términos asequibles a todos, ni son motivo de diálogo serio entre los ingenieros y el resto de la sociedad. En efecto, esta profesión casi nunca es tema de discusión pública profunda, aunque sus obras y productos son temas frecuentes de charla insustancial (carreteras, puentes, presas, edificios, automóviles, aviones, vehículos de exploración espacial, aparatos electrónicos, equipo médico sofisticado, robots, computadoras, internet, medios de telecomunicación instantánea y de fácil acceso, etc.). No me propongo exponer las aventuras intelectuales específicas que han conducido a tales creaciones de la ingeniería, pues lo que al ciudadano ordinario le sería útil saber no es lo anecdótico de cada uno de esos desarrollos, sino lo que todos ellos tienen en común. Importa que la ingeniería salga de la oscuridad conceptual en que siempre ha estado a los ojos del ciudadano común, y que se divulgue lo que todas sus realizaciones comparten; a saber: a) la intención y los procesos intelectuales con que fueron desarrolladas; b) las preocupaciones, los métodos y los criterios generales de la ingeniería; c) el lugar de la ética en ella; d) la soterrada raíz humanista subyacente en todos sus proyectos; e) el papel del conocimiento científico y del juicio profesional en el trabajo del ingeniero; f) las condiciones para lograr que sean sostenibles sus realizaciones; g) la probabilidad, nunca nula pero siempre susceptible de acotarse, de que falle cualquier obra o artefacto de la ingeniería; h) la necesidad de que sus proyectos tengan cierto seguimiento social que permita corregir desviaciones indeseables, etc. De que la sociedad conozca, discuta y atienda estas cuestiones dependen los buenos o malos resultados últimos de la ingeniería. Hace falta, pues, que los ciudadanos entiendan su propio papel activo en los proyectos de ingeniería; sólo así se logrará que los ingenieros, por una parte, y, por otra, las grandes organizaciones que usan la ingeniería para sus propios fines, sean socialmente responsables.

Achacar maleficios a la ingeniería es un hecho viejo que perdura: comenzó cuando los *ludditas* ingleses sintieron que su empleo era amenazado por las primeras máquinas de la Revolución industrial y pugnaron por destruirlas. Hoy tal actitud suele reaparecer con frecuencia y de modo más intenso, pese a que no sobreviviríamos sin la compleja red de infraestructura, servicios y artefactos creados y operados por la ingeniería. El ciudadano, supuesto beneficiario de todo ello, se angustia porque, a la vez que se sirve de tales creaciones, intuye que éstas pueden comprometer su futuro o ya lo han comprometido, y supone erróneamente que son los ingenieros por sí quienes ejercen control sobre la ingeniería y sus productos. La angustia del hombre, indefenso ante sus propias creaciones y a la vez dependiente de ellas, constituye el más hondo malestar colectivo que Freud identificó en la modernidad;<sup>3</sup> pero la patología va más allá, pues, según ha

---

<sup>3</sup> S. Freud, *El malestar en la cultura*, Alianza Editorial, Madrid, 1973, pp. 7-88.

documentado Pappenheim,<sup>4</sup> ese malestar se vuelve enajenación en muchos individuos; esto es, insensibilidad extrema ante los problemas del prójimo y concentración ciega de cada uno en su función especializada dentro de la trama social. Ambos males, angustia y enajenación, se manifiestan en el desatino con que suelen diagnosticarse problemas prácticos como los siguientes: 1) se culpa a la tecnología de los males que causa (contaminación, agotamiento de recursos, etc.), pero no se reconoce que la tecnología no es un ente autónomo, sino un instrumento, y que, por tanto, el origen de esos males está en las decisiones de la propia sociedad y sus líderes; 2) del caos urbano se responsabiliza al automóvil, no a las políticas públicas que estimulan su proliferación irracional; 3) se culpa a los grandes embalses de agua por los daños que causan a la naturaleza, y se ignora que esto se debe a la manera en que algunas de tales obras se han diseñado u operado en el pasado, y que esa manera es susceptible de perfeccionamiento; 4) se da el grito de alarma ante la perspectiva de que se agoten ciertos recursos naturales, como los hidrocarburos y el agua, pero se mantiene el uso dispendioso de los mismos y se defiende a ultranza el dogma de que en ningún caso debe interferirse con la libertad irrestricta de la oferta y la demanda, etc. Esas actitudes, evidentemente irracionales, se explican porque no hay comunicación entre los ingenieros como tales y la sociedad, y por tanto ésta no se percata de que con sus propias decisiones puede controlar los efectos de la ingeniería y la tecnología, principalmente si lo hace en colaboración con el ingeniero.

---

<sup>4</sup> E Pappenheim, *La enajenación del hombre moderno*, Era, México, 1965, 152 pp.

La enajenación ante la tecnología debilita el control que la sociedad debe tener sobre ciertos proyectos de ingeniería y la manera en que éstos se usan, pues una sociedad enajenada deja en manos de grupos de interés el poder para desviar a su propio favor los beneficios y dejar a la sociedad los costos de aquellos proyectos, especialmente si estos costos son grandes y pueden transferirse a generaciones futuras, como es el caso de los daños ambientales. La falta de participación social hace de la ingeniería un instrumento de intereses parciales, y vuelve al ingeniero incapaz de rendir cuentas como profesional a la sociedad misma. Es posible al menos atenuar tales consecuencias si el ciudadano logra cierta comprensión de la ingeniería, cualesquiera que sean sus prejuicios iniciales. Puesto que todo mundo ha visto las obras y usado los artefactos que la ingeniería produce, cada quien tiene su propio concepto de esta profesión; habrá quien diga que esas múltiples nociones personales son por necesidad erróneas en su mayoría, y que cada quien tendría que comenzar por erradicar la suya para luego hacerse una idea atinada de lo que la ingeniería realmente es. Dudo de que ese sea un camino viable. Mi concepto de esta profesión no es tan unívoco: sostengo que ella incluye y exhibe infinidad de aspectos. Por tanto, la noción que sobre la ingeniería tenga cada quien más probablemente pecará de incompleta que de impertinente. Mi propuesta a los lectores no es que descarten lo que sepan o imaginen de la ingeniería, sino que lo amplíen y maticen con lo que sobre ella puedan encontrar de interés en otras fuentes, comenzando con este libro, y que lo hagan con la parsimonia típica de quien arma un rompecabezas. Si la nueva visión que de ello les resulte no llega a fascinarlos, puede al menos serles útil.

Para cerrar este prefacio falta expresar mi gratitud a la Universidad Nacional Autónoma de México, donde tuve el tiempo y el apoyo necesarios para ordenar ideas y antiguas notas sobre los tópicos del libro hasta terminar la tarea. También debo reconocimiento al Fondo de Cultura Económica y especialmente a María del Carmen Farías, quien me presionó amable pero continuamente durante varios años hasta lograr, casi al final de su responsabilidad en esa editorial, que me sentara a escribir este libro; similar agradecimiento guardo al personal responsable de la colección La Ciencia para Todos: María Eugenia Aguilar, Verónica Fuentes, Leticia García y Axel Retif. Con especial afecto dejo constancia de mi aprecio a Martí Soler por el profesional esmero puesto en la producción de ésta y todas las obras que pasan por sus manos.

D.R.N.

Ciudad Universitaria, noviembre de 2006

PRIMERA PARTE

LOS PROCESOS INTELECTUALES  
DE LA INGENIERÍA

## ***I. Preludio: cómo armar un rompecabezas infinito***

*La ingeniería es una esfera infinita:  
su centro está en cada uno de sus proyectos  
y su periferia es inalcanzable.*

*Paráfrasis de Blas Pascal (Pensées, 72)  
y Jorge Luis Borges ("La biblioteca de Babel", Ficciones)*

### **1. DOS HECHOS OBVIOS**

El título del libro sugiere que la ingeniería puede verse como un rompecabezas, y la definición de este término en el diccionario es «juego en el que se compone, arma o integra una figura o imagen a partir de pedazos irregulares de ella. Por el hecho de anteceder al juego e introducirnos en él, este capítulo se llama preludio (praeludium, de prae = antes y ludus juego) y es el más breve de la pequeña obra que el lector tiene en sus manos.

Por otro lado, que la ingeniería es infinita (según reza el epígrafe) resulta evidente porque, como ocurre con cualquier campo del saber, interesarse en ella da lugar a infinidad de preguntas, y conforme éstas se contestan el campo de que se trata va creciendo indefinidamente en extensión y en profundidad o detalle. El rompecabezas de la ingeniería no es, por tanto, algo tan singular, sino solamente uno de los muchos rompecabezas infinitos que existen.

### **2. UNA ACTITUD SENSATA**

Tomar lo infinito con Solemnidad o reverencia es casi una tradición, pero proceder así puede ser perturbador. La actitud sensata ante cualquier cosa infinita debiera ser lúdica, con tal de que ello no impida jugar seriamente si viene al caso. Conviene entonces que el lector, en efecto, tome como un juego el examinar en las páginas de este libro algunas piezas de ese rompecabezas que es la ingeniería, y que al hacerlo recuerde que el rompecabezas de que se trata es ilimitado, aunque el contenido del libro no lo sea. Verá entonces que proceder lúdicamente conduce muy pronto a descubrir cosas interesantes; por ejemplo, que armar rompecabezas infinitos es muy usual y fácil, aunque tiene sus propios trucos, y que es preferible hacerlo con parsimonia que con prisa; finalmente descubrirá que explorar cualquier otro tema distinto de la ingeniería es un juego similar que él mismo ha jugado antes, y le complacerá saber que el jugador siempre tiene el control, ya que puede continuar jugando indefinidamente o parar en el instante en que lo desee.

### **3. LAS REGLAS DEL JUEGO**

Se entenderá mejor lo que quiero decir si comenzamos por plantearnos una situación hipotética: ¿qué haríamos ante el evento improbable y problemático de que alguien nos regalara un rompecabezas de extensión infinita? Supongo que intentaríamos armarlo poco a poco, siguiendo una estrategia similar a la que usamos ante un rompecabezas ordinario: colocaríamos primero cualquier pieza al azar y luego iríamos agregando las siguientes, escogidas con cierto criterio, quizá no consciente pero sí racional, hasta vislumbrar una porción del todo cuyos patrones visuales tuvieran sentido para nosotros; tales patrones nos darían

elementos de juicio adicionales para seguir seleccionando y agregando, pieza a pieza, nuevos elementos que progresivamente fueran haciendo más comprensible el cuadro.

Pero detengámonos un momento. El que nuestro rompecabezas sea infinito impondría una condición muy peculiar: podríamos poner al azar la primera pieza, como hacemos casi siempre que comenzamos a armar un rompecabezas; pero seleccionar piezas adicionales resultaría imposible a menos que estuviéramos dispuestos a invertir un lapso infinito en escoger cada una, pues sería absolutamente nula la probabilidad de hallar, en un plazo acotado y entre el conjunto desordenado de las infinitas piezas que en cualquier momento quedarían por acomodar, aquella que cumpliera nuestro criterio de selección. Concluimos, pues, que un rompecabezas infinito es imposible de armar, incluso parcialmente.

Tal conclusión, sin embargo, nos deja perplejos. ¿Acaso el universo no es infinito, el más grande de los infinitos que existen? ¿Y no es cierto que pese a ello los seres humanos, tanto colectivamente como en lo individual, hemos ido armando poco a poco algunas partes de ese rompecabezas universal hasta poder decir que conocemos o entendemos en cierto grado nuestra casa, nuestra ciudad, nuestro sistema planetario, nuestra familia, el idioma que hablamos, etc.; es decir, algunas limitadas porciones del universo? ¿Cómo ha sido posible esto si no está a nuestro alcance poner juntas siquiera dos piezas de un rompecabezas infinito? La respuesta está en un pequeño detalle, y éste tiene qué ver con el modo como en la vida práctica nos hacemos de las piezas por armar: no se nos dan (o no las tomamos) todas de una vez, sino en pequeños paquetes que captamos mediante nuestros sentidos y con base en nuestra experiencia, limitada cada vez a una porción no muy grande del universo infinito. Más aún, tal apropiación de piezas no es instantánea, sino que nos toma tiempo lograrla: el necesario para observar y explorar con nuestros sentidos la porción limitada del universo que escogimos conocer. Habiendo captado esas pocas piezas de conocimiento, buscamos averiguar cómo están interrelacionadas; esto es, comenzamos a armar una porción del rompecabezas. ¿Cuánto puede avanzar la humanidad en el proceso de armar el rompecabezas infinito del universo? Tanto como queramos y la duración de nuestra especie lo permita, reuniendo y acomodando cada vez un número finito de piezas, preferiblemente pequeño. Así podemos avanzar indefinidamente en el conocimiento de cualquier cosa, aunque ésta sea infinita, pues si bien nuestro conocimiento avanzaría a pequeños pasos, la acumulación de éstos no tendría límite. Éste es precisamente el modo en que lo hace la ciencia, y por eso el conocimiento humano ha crecido con tanta rapidez desde que se inventó el método científico. Antes la humanidad se abrumaba buscando de una sola vez respuesta a preguntas totalizadoras o demasiado amplias, (¿Qué es el universo? ¿Por qué existimos? ¿A qué se deben los avatares de nuestras vidas?, etc.), lo que impedía concentrarse y tener éxito en reunir un número pequeño de piezas conexas referentes a una cuestión limitada, y una vez entendida ésta abordar otra pequeña cuestión a fin de conseguir progresivamente imágenes más amplias del universo. Esto no quiere decir que las preguntas totalizadoras hayan perdido interés; lo siguen teniendo, pero incluso ellas son más abordables en el contexto de los conocimientos que aporta la ciencia.



El hecho de que las nuevas experiencias que vamos adquiriendo sean cada una de alcance limitado es lo que luego nos permite armar poco a poco el rompecabezas infinito. Acomodamos nuevas piezas guiados por los patrones identificados en las porciones armadas con anterioridad, y así sucesivamente. De ningún modo podemos obtener de una sola vez todas las piezas de un rompecabezas infinito, y, si pudiéramos nuestro éxito sería ambiguo, pues, como ya vimos, el solo hecho de poseer un número infinito de piezas vuelve inviable cualquier intento de acomodarlas. Entonces, alegrémonos de no recibir ese regalo que nos condenaría a la impotencia. Conformémonos con la modesta pero auténtica gracia que como seres humanos tenemos: la capacidad de allegarnos cada vez un número limitado de nuevos pedazos de conocimiento y hacer con ellos una imagen coherente aunque de extensión limitada. Poner en juego esta virtud nos brinda el placer de participar continuamente en un proceso llamado aprendizaje, cuya importancia radica en que parece ser lo único que con propiedad podemos considerar nuestro destino; es decir, el fin predeterminado e inevitable de todos los seres humanos: ir armando continuamente rompecabezas infinitos a sabiendas de que no terminaremos jamás.

Así, pues, ¿cómo leer este libro? ¡jugando! ¿Qué esperar de él? ¡Lo que cada quien busque, más algunos hallazgos inesperados! Los diccionarios dan a rompecabezas además de la acepción con que comienza este preludio, otros significados como “acertijo, enigma enredo, misterio; algo que causa perplejidad, irresolución, vacilación”. Es posible que un poco de todo esto encuentre en la ingeniería quien se aproxime a ella, y que por tanto la ambigüedad que la palabra rompecabezas impone al título no resulte ociosa. Según veremos al adentrarnos en el tema, la ingeniería es, además de inabarcable, incierta, diversa, compleja, rica e inacabada, pero comprensible. En consecuencia, dejar abiertas muchas posibles visiones de ella ayudará a que cualquiera, aun sin ser ingeniero pueda acercarse al tema, sea que lo haga con el propósito de examinar una a una diversas facetas de esta profesión, o que se interese en mirar simultáneamente y de conjunto varias de ellas, como en un cuadro cubista (otro ejemplo de rompecabezas). El rompecabezas de la ingeniería es infinito; sin embargo, el libro no aporta más que un número limitado de piezas cuya colocación alcanzará a delinear apenas una de las muchas imágenes posibles de nuestro objeto focal: la ingeniería.

Podemos comenzar el juego de inmediato y por cualquier parte, según las reglas que acabamos de barruntar. Cada individuo alienta la expectativa (o tiene la necesidad) de descubrir una visión personal de las cosas, y de hacerlo a su manera, sea mirando parsimoniosamente cierto aspecto del objeto de su interés o, al contrario, dando sólo un vistazo que capte una imagen general. Cada lector encontrará un modo particular de aproximarse al contenido (las piezas para armar) de este libro y adquirir su propia imagen global de la ingeniería o la de ciertos aspectos de ella. Es posible que ninguna de esas imágenes resulte rigurosa o completa, pero todas serán válidas en algún grado, al menos para el propósito personal de quien las busque y descubra.

Como en el juego del rompecabezas, el lector se percatará pronto de que es innecesario tener todas las piezas acomodadas en su lugar para lograr una buena idea, sea global o local, de la imagen que se está

armando. Éste es uno de los atractivos del juego, y confío en que lo sea también del libro. Se percibirá, en el juego y en el libro, que hay un umbral (un grado de avance en el proceso de armar la imagen que se busca) después del cual se puede atinar de primera intención a identificar las piezas que faltan para completar la figura. Este umbral es diferente para cada jugador. El ingeniero experimentado descubrirá la imagen que de la ingeniería he querido dar con sólo repasar el índice del libro; incluso identificará de inmediato los énfasis que

Intencionalmente he puesto en algunas facetas y los vacíos que he dejado en otras. El lector inicialmente ajeno al tema, en cambio, requerirá avanzar un poco más en la lectura para comenzar su propio proceso de identificación de patrones; empero también lo logrará, y aunque su comprensión final quizá sea menos profunda no será menos coherente.

El propio contenido del libro constituye mi propuesta para armar una primera imagen integral de la ingeniería pero no hay que tomar esta propuesta a pie juntillas pues tiene cierta subjetividad inevitable; además, no ofrece sino una de muchas posibles visiones de la ingeniería: una de las que yo tengo de la misma. Como he buscado que los capítulos sean autosuficientes y cada uno se refiera a una sola faceta de la ingeniería otras imágenes pueden armarse si sólo se leen algunos de ellos, o si se aborda todo el libro en orden distinto, por ejemplo el orden que el lector escoja en función del interés que para él tengan los temas de que se trata. Finalmente, se puede usar el índice general como guía para buscar lecturas sobre cada tema en otras fuentes, o las notas a pie de página para profundizar en los tópicos que se discuten.

Hasta aquí el preludio. Cualquiera que sea el enfoque que el lector quiera escoger, lo invito a probar uno y comenzar el juego.

## ***II. El que hacer del ingeniero (y por qué se transforma el mundo)***

### **1. INTRODUCCIÓN**

¿Qué funciones cumplen la ingeniería y los ingenieros? La respuesta es menos obvia de lo que esta sencilla pregunta sugiere y no la agotaré en este capítulo, pues la ampliaré en los capítulos III a V y luego volveré a ella en otros subsecuentes para complementarla y matizarla. Abordaré el asunto apoyándome en lo que sobre algunas de sus facetas he expuesto en otras publicaciones.<sup>5</sup>

Comencemos por distinguir entre las funciones del ingeniero, esto es, las finalidades de su labor, y las actividades que desarrolla para cumplirlas, que son mucho más numerosas. Son tantas y tan diversas las actividades que los ingenieros suelen realizar que incluso ellos mismos pueden llegar a confundirlas con los fines, cuando no son sino los medios con los que éstos se alcanzan. Con más razón es comprensible que haya esa confusión entre los no ingenieros, pues muy pocas personas tienen oportunidad de observar

---

<sup>55</sup>D. Reséndiz, “Los procesos intelectuales de la ingeniería”: Parte I: “El quehacer y los métodos” Ingeniería Civil, núm. 421, México, mayo de 2004, pp. 20-26; Parte II: “El juicio profesional y otros atributos”: Ingeniería Civil, núm. 422, México, junio de 2004, pp. 28-37.

con suficiente detalle y detenimiento cómo surge la necesidad de un proyecto de ingeniería y cómo, en consecuencia, éste se gesta y desarrolla; tampoco suele haber testigos de los procesos intelectuales más complejos o trascendentes que el ingeniero realiza para ese fin. Igual que ocurre con otros procesos creativos, los que realiza la mente del ingeniero no son visibles. Sus labores mismas, en sus aspectos medulares, suelen no estar expuestas a la vista del público; casi siempre se realizan en equipo, en un grupo de profesionales compuesto mayoritariamente por integrantes del propio gremio. No es que su trabajo sea incomprensible para los demás, sino que el modo de organizarlo y llevarlo a cabo es poco propicio para ser observado con profundidad por quienes no participan en él. Así pues, aunque las obras y productos de la ingeniería son en nuestra época lo más perceptible de cuanto rodea a cualquier persona, la sociedad en general desconoce qué hace el ingeniero para concebir y producir lo que crea. En consecuencia, de la ingeniería se conoce el resultado final, pero no la manera como éste se concibe y desarrolla. Ocurre algo muy diferente con los médicos, cuya actividad y ambiente laboral todos tenemos ocasión de observar, al menos en condición de pacientes suyos. Esto da lugar a vivencias que incluyen el sentir la labor del médico en carne propia (literalmente).

De tal manera, todos adquirimos una idea clara de los métodos del médico. Además, la medicina impone al paciente una obligación imposible de eludir: la de participar en la definición y evaluación de sus fines y sus medios; tal es el caso no sólo cuando exponemos nuestro problema de salud, sino también cuando, en respuesta a las alternativas terapéuticas que, en su caso, el médico propone, expresamos nuestra preferencia por alguna de ellas, o cuando conjuntamente con él evaluamos los efectos del tratamiento.

Como primera respuesta a la pregunta con que comienza este capítulo, digamos de inmediato que la ingeniería tiene dos funciones principales, o una función central que se realiza en dos etapas: en primer lugar, analizar y entender ciertos problemas que alguien le plantea, y luego concebir las soluciones más apropiadas para los mismos. A la primera etapa se le llama diagnóstico y a la segunda diseño. El ingeniero diagnostica problemas que tienen relación con necesidades o insatisfacciones materiales de la sociedad y sus integrantes individuales; luego diseña con todo detalle cómo resolverlos mejor, y vierte ese diseño en especificaciones detalladas, necesarias para que se fabrique o construya la solución respectiva, pues las soluciones de la ingeniería generalmente incluyen o requieren obras o artefactos materiales.

Así, de esta manera tan sencilla pueden explicarse las funciones que todo ingeniero desempeña, sea cual sea su ocupación o responsabilidad profesional específica; la explicación, sin embargo, aunque clara y verídica, es insuficiente. Una más plena comprensión de lo que esto abarca y significa, así como de sus múltiples implicaciones, se irá integrando poco a poco en este y los siguientes capítulos.

A todo lo largo del libro me estaré refiriendo a la ingeniería en general, no a una rama particular de ella; es decir, estaré hablando de lo que todas sus ramas comparten: sus comunes objetivos, métodos de trabajo y criterios de decisión. No obstante, por los ejemplos que daré para ilustrar ciertos puntos, seguramente se traslucirá mi propia formación

como ingeniero civil. Me interesa, sin embargo, discutir la ingeniería en general, tanto porque el libro está destinado al público no especializado como porque la comprensión de las funciones de esta profesión no exige entrar a las particularidades de cada una de sus ramas; además, abundan las publicaciones donde se abordan las cuestiones específicas de cada rama de la ingeniería. Es claro que hay aspectos peculiares en cada rama, pero ello no invalida lo que se diga sobre sus atributos generales. La experiencia me ha mostrado que, con variantes sólo de matiz, lo que aquí diré es aplicable a la ingeniería toda.

Las funciones, métodos y demás aspectos que en el libro se presentan como rasgos compartidos por todas las ingenierías son equiparables incluso en las disciplinas y subdisciplinas dentro de cada rama. Por ejemplo, una de las disciplinas de la Ingeniería civil es la geotecnia, cuyo campo de estudio son los suelos y las rocas como materiales en los que se apoyan todas las obras de ingeniería civil o con los que se construyen partes de algunas; al contrario de los demás materiales que las ingenierías usan, suelos y rocas no se fabrican y, por tanto, no cumplen especificaciones impuestas por el ingeniero; más bien los suelos y las rocas de la corteza terrestre local constituyen condiciones externas a las que debe adaptarse la solución de cada problema de ingeniería civil. Pese a que por esta peculiaridad la geotecnia resulta muy distinta de otras disciplinas de la ingeniería, sus métodos y criterios son también, en general, los aquí descritos.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> 2 D. Reséndiz, Los métodos de la geotecnia, edición inglés-español, Decimotercera Conferencia Nabor Carrillo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, 996, 102 pp.

## 2. QUÉ ES LA INGENIERÍA

Emilio Rosenblueth, uno de los más destacados ingenieros mexicanos del siglo xx, dio la siguiente definición de la ingeniería, y de paso hizo una clarificación tan aguda como necesaria del atributo indispensable para que una actividad se denomine profesión:

*La ingeniería es una profesión, no un arte, no una ciencia ni una técnica. Estas categorías comparten herramientas, capacidades y propósitos. Sus diferencias son cuestión de énfasis. En un arte el propósito sobresaliente es la expresión; en una ciencia el acercamiento a la verdad; en una técnica el servicio al cliente, y en una profesión el servicio a la sociedad. Los conocimientos que requiere un técnico se hallan en manuales; lo que le interesa de cualquier problema de su incumbencia está resuelto. En cambio para el profesional cada problema es nuevo.*<sup>7</sup>

Decir que los problemas que se plantean a los ingenieros son siempre nuevos no es una expresión retórica, sino plena de significado y con hondas repercusiones, algunas de las cuales tocarán con más amplitud en los capítulos III y XV. Cada problema de ingeniería es diferente y tiene algún grado de novedad con respecto a sus precedentes, pues cada uno responde a necesidades sociales y circunstancias específicas. Incluso si se trata de necesidades que se resuelven con la misma clase de obra o producto, los problemas son siempre distintos: dos puentes del mismo tipo y material diferirán en sus dimensiones, en el clima del sitio, en el terreno sobre el que se apoyan,

La naturaleza y magnitud de las cargas que soportan o las avenidas que pueden pasar bajo cada uno, etc.; por tanto, serán distintos los problemas que uno y otro plantee, así como los conocimientos y las técnicas a usar en su diseño y construcción. Otro ejemplo: una sola clase de automóvil no resuelve las necesidades de todas las personas ni se adapta a cualquier clase de terreno; cada nuevo modelo que se quiera diseñar planteará problemas novedosos.

Además, los diseños con que la ingeniería responde a las necesidades humanas cambian con el tiempo porque evolucionan conforme la ciencia aporta nuevo conocimiento o la tecnología nuevos materiales y nuevas maneras de hacer las cosas. Otra causa que otorga novedad a cada problema de la ingeniería es la naturaleza humana, que con el paso del tiempo percibe nuevas necesidades o se inclina voluntariosamente por gustos nuevos y variados, y ejerce sobre la ingeniería presión en pro de cambios, incluso algunos muy poco sustanciales. Tal presión y la novedad que introduce en los problemas de ingeniería pueden tener justificaciones sólidas o muy cuestionables, pero el hecho es que existen.

## 3. LAS DOS FUNCIONES CENTRALES DEL INGENIERO

Ya dijimos que las dos funciones que definen el alcance y constituyen la sustancia del ejercicio profesional en la ingeniería son diagnóstico y diseño. Curiosamente, las de la medicina son casi idénticas, salvo una diferencia de nombre, pues la segunda en medicina se denomina

---

<sup>7</sup> E. Rosenblueth y J. Elizondo, “Una reflexión sobre los logros y alcances de las ciencias de ingeniería en México”: México: ciencia e ingeniería en el umbral del siglo xxi, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México, 1994, pp. 347-357.

prescripción. Dado que todos tenemos una noción de lo que hacen los médicos, aprovecharemos tal analogía para explicar las funciones del ingeniero.

La labor de médicos e ingenieros comienza cuando se les plantea un estado de cosas insatisfactorio: deficiencias de salud en el caso médico, e insuficiencia de ciertos medios o recursos materiales en el caso ingenieril. Al médico el problema le es planteado por su paciente; al ingeniero, por su cliente; pero los problemas que uno y otro tratan tienen repercusiones que rebasan al paciente o al cliente, y no pueden ser abordados sino en el marco de los intereses de la sociedad toda.

Una vez reconocido el problema, el profesional procede a identificar sus relaciones con diversos factores para descubrir las causas. Es precisamente al proceso de identificación de las causas del problema a lo que se le llama diagnóstico, pero el modo de hacerlo dista de ser directo, pues se da en un contexto en que las relaciones entre causa y efecto están oscurecidas o complicadas por múltiples factores y variables circundantes.

Una vez hecho el diagnóstico, tanto el médico como el ingeniero se abocan a idear y especificar las acciones necesarias para corregir o superar las causas del problema, proceso que se denomina prescripción en la medicina y diseño en la ingeniería. Dos ejemplos del campo de la ingeniería civil ayudarán a clarificar lo descrito:

*Ejemplo A: Una localidad o una región sufren problemas recurrentes de inundación (estado insatisfactorio). El ingeniero debe hacer primero un estudio que identifique y correlacione las características de las inundaciones con variables y factores topográficos e hidrológicos diversos para descubrir las causas del problema (diagnóstico). Logrado tal objetivo, debe idear y especificar ciertas obras materiales que permitan resolver el problema (diseño).*

*Ejemplo B: Una obra de ingeniería en operación —puente, presa, edificio, etc.— exhibe comportamiento disfuncional o riesgoso (estado insatisfactorio). El ingeniero debe identificar qué relaciones tiene ese comportamiento con diversos factores presentes en el problema para identificar las causas de éste y correlacionarlas cualitativa y cuantitativamente con sus efectos (diagnóstico). Después tiene que idear y especificar cómo corregir el mal funcionamiento observado (diseño).*

Ahora bien, cuando aseveramos que el diagnóstico que practican los médicos es análogo al que realizan los ingenieros solamente queremos decir que tanto los fines como los razonamientos de ambos son, grosso modo, similares, ya que en los dos casos el objetivo es correlacionar racionalmente los efectos observados con las variables que constituyen su entorno, y en particular con sus causas subyacentes. Sin embargo, los conocimientos y las capacidades específicos en que se basan los respectivos procesos de diagnóstico son distintos, y los del ingeniero incluyen procesos de cálculo; es decir, son predominantemente cuantitativos.

Del mismo modo, cuando decimos que la función llamada prescripción en medicina es análoga a la de diseño en ingeniería queremos decir principalmente que el propósito de ambas es especificar la solución del correspondiente problema. Acudiendo a la analogía con la prescripción en medicina, evocamos un proceso intelectual de cuya naturaleza tenemos cierta noción porque muchas veces hemos observado cómo lo realizan

nuestros médicos respectivos. También en este caso una característica sustancial de la etapa de prescripción en ingeniería es que en ella predominan los procesos cuantitativos.



No sería válido llevar la analogía más allá de este punto, pues pese a las similitudes apuntadas tanto la sucesión de actividades como los conocimientos, capacidades, criterios, métodos y técnicas que conducen al diagnóstico y a la solución del problema en una y otra profesión son muy distintos.

Antes de analizar los procesos intelectuales o modos de razonamiento mediante los cuales se realizan el diagnóstico y el diseño, conviene explicar las diversas actividades a las que suelen dedicarse los ingenieros pues éstas determinan los tipos de problemas o proyectos a los que diagnóstico y diseño se aplican.

#### **4. LA DIVERSIDAD DE ACTIVIDADES DEL INGENIERO**

Los ingenieros se desempeñan en todos los sectores de la economía: el primario, que produce insumos básicos minerales y agropecuarios; el secundario, que transforma esos insumos en productos diversos, y el terciario, que presta servicios de todo tipo. A su vez, en cualesquiera de tales sectores los ingenieros pueden ocuparse de a) la identificación, evaluación y programación de inversiones, que abreviadamente se denomina planeación; b) la concepción y especificación de nuevas obras y productos, que por antonomasia se llama diseño c) la construcción y fabricación de obras y productos diseñados, y d) la operación de las instalaciones o sistemas que resultan de las actividades anteriores.

El diagnóstico y el diseño que, según hemos indicado, son las funciones centrales del ingeniero, efectivamente lo son en cada una de las cuatro actividades enumeradas en el párrafo anterior, aunque el término diagnóstico no aparezca en la descripción de ninguna y la palabra diseño dé nombre sólo a la b). En efecto, las funciones de diagnóstico y diseño son centrales en las cuatro actividades, pero en cada una de ellas el objeto focal del diagnóstico y el diseño son diferentes. En la planeación, lo que es objeto de diagnóstico y diseño es el conjunto de proyectos cuya planeación se realiza; en la actividad de diseño, lo es el nuevo producto u obra; en la construcción y fabricación, el procedimiento que una y otra deben seguir es lo que se diagnostica y diseña, y en la operación, el objeto de diagnóstico y diseño es el conjunto de procedimientos operativos.

Así pues, la ingeniería es una profesión que, en cualquiera de sus actividades, busca satisfacer ciertas necesidades humanas de orden material mediante el diagnóstico y el diseño aplicado a los problemas que deben abordarse para alcanzar ese propósito. En general, las necesidades humanas se derivan de la insuficiencia de algunos satisfactores: habitación, agua para cualquiera de sus usos, transporte (terrestre, aéreo, interplanetario, etc.), medios de telecomunicación, energéticos, etc. Para satisfacerlas, el ingeniero hace primero un diagnóstico que aclare y delimite el problema, sus alcances, sus circunstancias, las diversas variables que intervienen, y sus relaciones causa-efecto. Con base en el diagnóstico hace luego un diseño que busca definir la mejor solución con todos los detalles necesarios para que pueda llevarse a la realidad (proceso de fabricación o construcción que igualmente es actividad de ingenieros, como también lo es después la operación de los proyectos que la ingeniería planifica, diseña y construye o fabrica).

Es claro que en el diagnóstico se requerirá la participación de quienes han planteado el problema, tanto clientes como otros actores que intervienen en representación de los intereses de la sociedad. Se necesita la participación de tales actores porque las necesidades que se busca resolver son precisamente de ellos, no del ingeniero, y es indispensable que éste las entienda a plenitud para un diagnóstico acertado. Similarmente, en el diseño será indispensable que el criterio del ingeniero no sea el único que determine el grado en que las distintas alternativas de solución resuelven el problema planteado, sino, otra vez, que intervenga el criterio de los interesados. El asunto con frecuencia es más complejo de lo que parece, pues en cualquier proyecto grande o trascendente hay personas o grupos beneficiados con él, otros que son perjudicados, y entre ambos toda la gama imaginable en la distribución de costos y beneficios, inmediatos y mediatos. Puede ser incluso que deba reconocerse un interés legítimo a quienes no tienen posibilidad de participar en modo alguno en la discusión y las decisiones, como cuando el proyecto tiene efectos sociales o ambientales que repercutirán en las generaciones futuras; algunos de los representantes sociales y el propio ingeniero deben entonces asumir la representación de los intereses de quienes aún no nacen.

La compleja red que en torno a cada proyecto de ingeniería entrelaza esos tan diversos intereses, en principio todos con facetas legítimas, determina que en casi ningún caso el ingeniero pueda decirse que está al servicio exclusivamente de su cliente. Por eso la ingeniería no es simplemente una técnica, sino una profesión, y sirve en primer lugar a la sociedad; su servicio al cliente consiste en conciliar los intereses legítimos de todos los demás actores de esa complicada red con los intereses igualmente legítimos del cliente. Conforme las cosas diseñadas proliferan, en respuesta a nuevas necesidades humanas, van interactuando cada vez más intensamente con las cosas naturales, restringiendo a veces e incluso amenazando la disponibilidad futura de éstas y el equilibrio de la naturaleza que nos sustenta; por tanto, cada vez es más necesario, durante el diagnóstico, cuestionar lo que antes no solía cuestionarse: la necesidad humana misma que está en el origen de cada problema de ingeniería. Hace falta una discusión racional, a la luz de información amplia y balanceada, para que la necesidad que los proponentes del proyecto postulan se compare con otras necesidades presentes y futuras de diversos grupos y de la sociedad toda; esto es lo que, por ejemplo, está ocurriendo ya en el caso de los grandes proyectos hidráulicos y la explotación de recursos naturales en cualquier parte del mundo. Por este motivo, antes de analizar con más detalle el qué hacer del ingeniero conviene detenerse a considerar la naturaleza y diversidad de las necesidades humanas.

Todo proyecto de ingeniería tiene, además de los efectos benéficos que expresamente busca, otros no deseados que se revierten sobre la naturaleza y la sociedad. Contra toda lógica, es frecuente que la discusión y la crítica sobre los efectos no deseados de ciertos desarrollos de la ingeniería se centren en los desarrollos mismos y no en la necesidad que éstos buscan satisfacer. La única manera de resolver racionalmente los conflictos de interés en torno a un proyecto, cuando éstos surgen, es clarificar primero la necesidad que el proyecto busca satisfacer, su importancia relativa frente a otras necesidades no satisfechas, y las alternativas de solución. Sólo después de hacer esto se podrá emprender el diagnóstico y el diseño de proyectos que causan conflictos de interés.



## 5. EL NACIMIENTO DE LA INGENIERÍA, LA APARICIÓN DE LOS INGENIEROS Y LA INTERACCIÓN CON LA NATURALEZA

Cuando los ancestros del hombre abandonaron las copas de los árboles y comenzaron a desplazarse erguidos sobre sus pies, nació una nueva modalidad de la evolución biológica que significó un cambio cualitativo en la relación entre el animal y la naturaleza. La relativa indefensión de aquellos ancestros del homo sapiens frente a los carnívoros que podían ser sus depredadores habría sido suficiente para que desapareciera su especie; pero poseían un cerebro más grande que el del resto de los Primates y, gracias a su postura erguida, disponían libremente de sus manos, que, controladas por su cerebro, les permitían adaptar de modo intencional el ambiente según sus propias necesidades, en vez de simplemente adaptarse ellos a las condiciones impuestas por el entorno. A diferencia de los demás animales, el hombre es consciente de sí mismo y de lo que lo rodea, por lo que su relación con la naturaleza no es de simple adaptación, sino de adaptación creativa e insumisa en un tipo de relación sujeto-objeto que no existía antes de la aparición de nuestra especie. Otros animales solamente se acomodan a las condiciones que la naturaleza les impone; su efecto sobre el entorno es de carácter cuantitativo, derivado de su simple presencia; en cambio, el hombre cambia la naturaleza intencionalmente para hacerla servir a sus propios fines. Esto implicó una ventaja enorme para sobrevivir y prosperar, pero más recientemente ha llegado a transformarse también en una responsabilidad, de la que, según parece, muchos seres humanos aún tienen que cobrar conciencia plena; se trata de algo muy directamente relacionado con la ingeniería: la responsabilidad de no rebasar ciertos límites en la modificación del entorno natural, so pena de poner en riesgo la calidad de vida de las generaciones subsecuentes y aun la supervivencia de la especie.

La ingeniería debe de haber nacido antes que cualquier civilización, cuando, por primera vez, un ser humano insatisfecho con cierta condición específica de su entorno o su calidad de vida, decidió no conformarse y aplicó sus ventajas comparativas sobre el resto de los seres vivos; es decir, su ingenio conceptual (su cerebro) y su laboriosidad (sus manos) para modificar aquella limitación que consideró inaceptable. Acaso produjo entonces el primer artefacto utilitario, o un modo de protegerse de la intemperie, o un método para pescar o cazar. Sin embargo, los ingenieros todavía no eran necesarios, pues la tarea de adaptar el entorno a las necesidades humanas era casi trivial y, por tanto, estaba uniformemente distribuida entre todos los miembros: de la especie.

Los ingenieros como individuos diferenciados por su ocupación surgieron muchos milenios después de que en forma rudimentaria se practicara la ingeniería por todos los miembros de la especie; esto es, los ingenieros han existido apenas en la última pequeña fracción del lapso en que la especie humana ha ido labrando su nicho en el planeta mediante su capacidad de hacer ingeniería. Antes tuvieron que alcanzar cierto umbral de desarrollo las tres facultades distintivamente humanas: el lenguaje, la habilidad de concebir y construir herramientas, y la capacidad de cooperar, que crecieron en paralelo y conjuntamente dieron lugar a la creación de ciudades; es decir, a la constitución de organizaciones sociales de cierta complejidad. En efecto, la lucha por la supervivencia obligó a los seres humanos a expandir su capacidad cerebral más allá de sus límites

naturales, lo que lograron sobre la base de que muchos cerebros son mejores que uno; tal es el origen del trabajo intelectual en equipo, que hizo de la inteligencia humana un bien social y dio una nueva ventaja a nuestra especie sobre las demás. La capacidad de cooperar en actividades cada vez más amplias y sofisticadas, característica distintiva del hombre, representó, en efecto, un salto cualitativo en su evolución y produjo una forma nueva de interacción entre los humanos y el resto de la naturaleza. Sin el desarrollo de la cooperación no habría sido posible el lenguaje ni la habilidad instrumental, y viceversa. Las tres características propiamente humanas (herramientas muy elaboradas, lenguaje, y sofisticada cooperación) son los componentes de otro atributo humano fundamental: la producción, cuya trama es la sociedad y cuyo medio es la ingeniería.

La diferenciación ocupacional que produjo la aparición de los ingenieros debe haber ocurrido hace apenas seis o siete milenios, al tiempo que en la Mesopotamia se creaban las primeras ciudades, en Egipto se desarrollaba la aleación de metales y el Mediterráneo comenzaba a ser surcado por embarcaciones que intercambiaban productos entre diversos pueblos.<sup>8</sup> El surgimiento de los ingenieros decenas de milenios después de que nació la ingeniería obedeció a la evolución de las necesidades del hombre. El aumento de la población y la creciente complejidad de las organizaciones sociales acrecentaron la magnitud y la diversidad de los bienes y servicios requeridos para satisfacer aquellas necesidades; en consecuencia, la provisión de los correspondientes satisfactores ya no podía lograrse con el conocimiento y las capacidades comunes a todos los miembros del grupo social; se requirió que algunos de ellos, apoyados en las posibilidades expresivas y comunicativas del lenguaje, para entonces ya suficientemente desarrolladas, codificaran, acumularan, ordenaran, preservaran, estudiaran y ejercieran sistemáticamente el conjunto de conocimientos y capacidades necesarias para idear y concretar la satisfacción de la diversidad de necesidades materiales de la sociedad. Nacieron así los ingenieros, y con su aparición la humanidad dio otro salto en su capacidad para contender con lo inhóspito que para ella resulta el entorno natural (piénsese en lo que la especie humana tuvo que sufrir durante la Edad de Piedra, cuando la Tierra pasó por varias glaciaciones).

Durante los pocos milenios en los que hacer ingeniería ha sido una función diferenciada de quienes se llaman ingenieros, la historia humana ha estado entrelazada de manera muy íntima con la transformación material del mundo; es decir, con la historia de la ingeniería. Durante este lapso se hizo patente el alto grado de control que el hombre podía ejercer sobre su entorno y se produjo un proceso de mejora continua en múltiples aspectos: vivienda, alimentación, salud, longevidad, urbanización, movilidad física, control territorial, organización social, etc.; como consecuencia de todo ello crecieron exponencialmente tanto la población mundial como la rapidez de modificación de la naturaleza por acción del hombre. La transformación del planeta a su vez ha ido produciendo consecuencias secundarias no previstas, cuya acumulación da lugar ya a cambios cualitativos de nuestro entorno, muchos de ellos preocupantes por su posible efecto desestabilizador de la naturaleza misma, de la que depende nuestro sustento.

---

<sup>8</sup> B. Grun, *The Timetables of History*, Simon & Shuster, Nueva York, 1979, 676 pp.

Ese largo proceso de nuestra historia nos ha traído a una situación insospechada: la supervivencia de la raza humana comienza a estar amenazada por causas novedosas, antítesis de las que motivaron el nacimiento de la ingeniería. Esto es, las amenazas ya no provienen de las ingentes necesidades insatisfechas, sino de una plétora de desarrollos que transforman el mundo quizá más allá de lo prudente, porque la naturaleza ya no los puede asimilar, y finalmente dañan más que mejoran nuestra calidad de vida. El ejemplo obvio es la explotación hasta el agotamiento de recursos críticos como los hidrocarburos o el agua; pero hay otros que son más graves aún porque los entendemos menos y son más difíciles de controlar, como el probable desequilibrio climático por acumulación antropogénica de bióxido de carbono y otros gases en la atmósfera. Parece haber llegado ya el momento de considerar insensato el seguir desplegando indiscriminadamente nuestras capacidades de modificación de la naturaleza sin una concienzuda evaluación, caso a caso, de los efectos no deseados que ello puede acarrear.

A esto nos referiremos con mayor detalle en el capítulo VIII, pero se justifica advertir aquí el riesgo que para la habitabilidad del planeta implica asumir a la ligera que las necesidades humanas son todas igualmente atendibles. Lo que procede es que la sociedad tome conciencia del problema y busque mecanismos más racionales para decidir si ciertos proyectos deben emprenderse o no. Se trataría de aquellos proyectos que busquen satisfacer necesidades debatibles o poco sustanciales, y los mecanismos de decisión, además de ser mucho más participativos, deberían basarse en el interés de largo plazo de la especie humana, no en la arbitraria voluntad de algunos ni en conveniencias inmediatas y efímeras.

Criterios igualmente racionales tendrían que adoptarse para decidir, en su caso, con qué criterios emprender y diseñar dichos proyectos y cómo darles seguimiento.

## **6. POR QUÉ SE TRANSFORMA EL MUNDO: LA GAMA INFINITA DE NECESIDADES HUMANAS**

Es enorme la variedad de invenciones y desarrollos del hombre y su ingeniería. Solamente en los Estados Unidos, durante los dos últimos siglos se han patentado más de cinco millones de cosas y procesos no naturales; tal cantidad es al menos tres veces mayor que el número de las especies vivientes que la evolución darwiniana ha sido capaz de crear desde que la vida surgió en nuestro planeta. Es decir, la diversidad de las cosas diseñadas es ya mucho mayor que la biodiversidad.<sup>9</sup>

Las cosas naturales mismas han sido objeto de cierta innovación o modificación, inducida por el hombre, aun antes de la ingeniería genética: los cereales, para incrementar el número y tamaño de los granos que cada planta produce; el ganado vacuno, para aumentar la producción de leche o carne; los perros, para fomentar cierto apego a sus amos y a la vez mantener sus habilidades cazadoras y su capacidad de defensa ante extraños; la rosa, para aumentar su belleza y su tamaño, etc. Es obvia la conexión entre muchas de estas innovaciones y las necesidades básicas de los seres humanos. No obstante, si interpretamos todas ellas a la luz del proverbio “la necesidad es la madre de la invención”; es decir, si vemos cada una de ellas como un satisfactor de alguna necesidad humana, se ocurre de inmediato preguntar si en verdad tenemos necesidades tan diversas que se miden en millones. Y la respuesta depende de la definición de necesidad humana. Si nos referimos a las necesidades básicas: comida, techo, vestido, salud, seguridad y poco más (que, por cierto, millones de habitantes del planeta aún no tienen satisfechas), contaríamos no más de 10. Pero no somos nada más seres biológicos, sino entes con compulsiones psicológicas y espirituales. Esto incrementa enormemente la diversidad de necesidades que el conjunto de los individuos de una sociedad puede sentir, por cuya satisfacción se esforzará y por las que ejercerá presión para que la ingeniería diseñe y produzca los correspondientes satisfactores. Finalmente, si tomamos en cuenta que estamos dotados de libre albedrío, y que por tanto nuestra voluntad basta para desear y decidir allegarnos cualquier cosa imaginable, el número de “necesidades” que la sociedad siente y busca satisfacer se torna infinito.

---

<sup>9</sup> H. Petroski, *The Evolution of Useful things*, Alfred A. Knopf, 1992, pp. 23-24.

Conforme la riqueza de las naciones o los individuos se incrementa, es un hecho que a tasa mayor crece la demanda de satisfactores para necesidades antes no sentidas. En algún momento del proceso la "necesidad" de algo ya no aparece ligada a su utilidad en el sentido estricto o biológico, sino a lo psicológico o espiritual, y comienzan a ser demandados satisfactores que poco antes eran considerados no utilitarios, desde objetos ornamentales hasta otros cuyo atributo principal es su novedad. Algunos de estos bienes, como los producidos por las artes, son productos culturales muy importantes por cuanto enriquecen y mejoran la calidad de nuestra vida individual y nuestra convivencia; pero es evidente que otros son menos valiosos que los recursos naturales cuya preservación está en riesgo. Este puede ser el punto en que quizá conviene comenzar a resistir la presión por satisfacer algunas de las nuevas "necesidades": las generadas por el simple hecho de que nos ofrecen supuestos satisfactores. En este caso es obvio que ya no es la demanda la que genera la oferta, sino a la inversa: el simple deseo de diseñar de los diseñadores o el imperativo de fabricar de los fabricantes multiplica la oferta; la propaganda hace el resto para que crezca la demanda de creaciones cada vez más diversas y artificiosas, destinadas a segmentos de mercado cada vez más numerosos y diferenciados. "Los diseñadores diseñan, los fabricantes fabrican, los consumidores consumen": el consumismo, una cadena de inercias que poco tiene que ver con la mejora de la calidad de vida, y que contribuye más bien a lo contrario, por sus efectos en la depredación de la naturaleza, la marginación de los desfavorecidos por la fortuna, y la atrofia de la razón de los demás.

Algunos estudiosos de la historia de la técnica concluyen con razón que lo que mueve a la sociedad a pedir nuevos productos a la ingeniería y la tecnología no es sólo la necesidad en sentido restringido (carencia de las cosas que son menester para tener una vida digna) sino la insatisfacción con el mal funcionamiento de lo que existe. La falla y no la necesidad en sí sería, pues, la madre de la invención.<sup>6</sup> Como el buen o mal funcionamiento es relativo, cabría esperar entonces que al menos en algunas cosas se cumpliera el dicho clásico: "Si fungi munere, non movere" (si funciona, no lo arregles); pero no es el caso. Hasta las cosas con mejor funcionamiento están sometidas sin mayor justificación a transformaciones por la acción humana, con la pretensión de "perfeccionarlas". Así vamos transformando continuamente tanto las creaciones de la naturaleza como las humanas. Y como la idea de la perfección no es inmutable, sino al contrario, todo lo que nos rodea está expuesto al cambio voluntarioso del hombre.

Nada de esto puede condenarse a priori, pues es consustancial a la naturaleza humana. Es evidente, sin embargo, que en la medida en que todo ello consume recursos, o exagera la desigualdad de oportunidades para todos los seres humanos, o modifica el equilibrio de la naturaleza, primero aquí o allá en prado peligroso y luego globalmente de modo incierto e incontrolable, lo prudente es hacer juicios de valor para jerarquizar o relativizar las "necesidades humanas". Más que en cualesquiera de los asuntos en los que ingeniería y sociedad interactúan, en éste la responsabilidad está sobre todo del lado de la sociedad; en la medida en que ella misma se involucre en el esfuerzo de jerarquizar sus necesidades seguramente renunciará a algunas de las más triviales en aras de su bienestar presente, el de las generaciones futuras y la supervivencia de la especie. No obstante, la ingeniería y los ingenieros, pese a su papel finalmente subordinado a las exigencias sociales, pueden ser actores



importantísimos para hacer consciente del problema al resto de la sociedad y para proponer los métodos y criterios con los que ésta pueda lidiar con las nuevas condiciones de nuestro planeta, en muchos casos tan cercanas al límite de lo permisible.

### ***III. Los métodos de la ingeniería (o cómo cambiar racionalmente el mundo)***

#### **1. ¿QUÉ DEBE SABER HACER UN INGENIERO?**

Ya hemos dicho que las funciones más sustanciales del ingeniero son diagnosticar los problemas que se le plantean y diseñar soluciones a los mismos. Pero siempre me ha inquietado la pregunta que encabeza este apartado debido a que los procesos intelectuales que un ingeniero realiza para llevar a cabo esas funciones son en algunos aspectos difíciles de describir explícitamente. Sentí por primera vez la inquietud cuando, habiendo decidido estudiar ingeniería, comencé a sentirme abrumado por los objetivos de aprendizaje de los planes oficiales de estudio, tan excesivos y poco integradores, según mi entonces inmaduro criterio; quise, por tanto, tomar sobre la marcha algunas decisiones propias poniendo por mi cuenta mayor empeño en los cursos y asuntos que me parecían más importantes para mi futura capacidad profesional, pero no pude resolver mi perplejidad sino a medias. Poco después de graduarme renació la inquietud con más intensidad: mientras estaba yo absorto en actividades de investigación, mis mentores me propusieron participar en ciertos proyectos de ingeniería; me asaltaban dudas sobre mis capacidades para tal actividad, dado que ni siquiera estaba seguro de cuáles serían necesarias y cuáles poseía. Después, como profesor y ya con cierta experiencia práctica, me seguí preguntando qué importancia merecía cada objetivo de los cursos a mi cargo en función de su trascendencia para la vida profesional de mis estudiantes. Activo como ingeniero, siguió inquietándome la cuestión cuando reflexionaba sobre cómo apoyar el desarrollo profesional de los jóvenes colegas que trabajaban bajo mi supervisión. Muchos años más tarde, habiendo adquirido confianza en mi formación, la inquietud volvió cuando tuve la responsabilidad de dirigir una escuela de ingeniería y quise revisar críticamente lo que estábamos haciendo para cumplir nuestra misión. Recurrentemente me he seguido haciendo la misma pregunta hasta la fecha. En cada una de tales ocasiones me he dado una respuesta tentativa para mi propio uso, y al paso del tiempo la he ido complementando con nuevos elementos y matices. Hoy mismo sigo considerando tentativo todo lo que pueda decirse sobre el saber-hacer del ingeniero, pues el asunto es complejo y sutil.

Los procesos mentales de los ingenieros se vuelven automatismos, porciones de nuestro modo de ser que luego utilizamos sin estar conscientes de cómo procedemos paso a paso. Sabemos aplicarlos, pero no explicarlos. Incluso quienes en esta profesión se distinguen por su capacidad para llevar a cabo esos procesos con el máximo de maestría suelen no poder describirlos completamente. Es comprensible, pues, que para el público general, aun el más educado, y para los estudiantes de ingeniería, los métodos de trabajo y los criterios de decisión de los ingenieros sean desconocidos casi por completo.

Si el público desconoce los procesos intelectuales del ingeniero y éste encuentra difícil describir racional y detalladamente algunos de ellos, pero el mundo sigue tan campante, está más que justificado preguntarse si se requiere o vale la pena hacer explícitos tales procesos. No tengo duda de que hace falta y vale la pena. La comprensión por la sociedad de los procesos y criterios de decisión del ingeniero propiciaría una más franca

participación social en las decisiones que la requieren en cada proyecto de ingeniería; a la vez, contribuiría a eliminar prejuicios derivados de dos posiciones radicales y antagónicas de nuestro tiempo: una que pone en duda los beneficios de la tecnología, y otra que soslaya los costos no reconocidos (casi siempre indirectos y diferidos) que la sociedad termina pagando por casi todo proyecto de ingeniería. Para el propio ingeniero, una conciencia más plena de los procesos intelectuales implícitos en sus decisiones no podría resultarle sino benéfica, por cuanto le ayudaría a reforzar su dominio de tales procesos. Además, para los estudiantes de ingeniería y los ingenieros en maduración, conocer explícitamente esos procesos contribuiría a clarificar y adquirir las capacidades profesionales necesarias.

Si interesa saber en qué consiste y cómo se adquiere el saber- hacer de cierta profesión, lo natural es acudir al testimonio de miembros calificados del propio gremio; es decir, a lo publicado sobre las funciones y actividades del ingeniero' y sobre la vida y obra de personajes destacados del respectivo campo.<sup>2</sup> Desafortunadamente, muchas de las fuentes de información testimonial sobre los métodos de trabajo de ingenieros individuales no clarifican lo que interesa al experto bien informado, mientras que al lego le resultan casi incomprensibles. El conocedor percibe de inmediato que tales fuentes suelen ser poco explícitas al describir los procesos intelectuales más creativos, complejos y recónditos de la profesión, y que aquellas que ponderan el papel de un ingeniero en particular soslayan el valor sinérgico del trabajo en equipo. Además, las que se concentran en un estilo de trabajo personal, o en cierta faceta de él, suelen dejar en la oscuridad otros aspectos y la visión integral de las funciones del ingeniero, por lo que cada testimonio da una imagen de la ingeniería muy diferente de otras. Por haber sido escritos para el gremio, tales relatos son poco comprensibles para el no especialista, ya que dan por sentado un conocimiento de la ingeniería que no tiene quien es ajeno a la profesión. Por añadidura, casi ningún documento testimonial escapa a la legítima tentación de hacer una apología de la actividad a que se refiere; esto sesga la información a los ojos del lector, pues nadie tiene suficiente credibilidad cuando pondera el valor de su propio quehacer.

Por tanto, sin negar la utilidad de tales fuentes de información, y en muchos casos quizás usando inconscientemente lo valioso que ellas encierran, aquí sigo otra vía para abordar la cuestión. Me baso en lo que durante años y para diversos fines he inferido sobre el tema de tres maneras principales: a) observando el hacer y los métodos de los más destacados ingenieros con quienes he tenido la ocasión de colaborar, algunos de los cuales fueron mis inductores y maestros en la práctica de la profesión; b) averiguando lo necesario para integrar, a partir de esas observaciones y de la introspección sobre mi propia experiencia, una concepción integral y explícita de los procesos intelectuales que intervienen en la práctica de esta profesión, y c) sometiendo mis inferencias a pruebas de dos tipos: su aceptación por ingenieros experimentados y su comprensión por personas cultas ajenas a la ingeniería. Para este último propósito he encontrado útil, por cierto, apoyarme en el hecho aludido en el capítulo II: el conocimiento de primera mano que todos tenemos de las funciones, actividades y responsabilidades del médico en su práctica clínica, pues ocurre que, en efecto, el médico es también un profesional y sus funciones tienen una notable analogía con las del ingeniero. Por lo demás,

buscaré no incurrir en la debilidad de ser apologético, pues quien pretende justificar con grandes razones su ocupación personal puede ser tan trivial como una piedra que explicara por qué la fuerza de la gravedad la hace caer.

Dicho lo anterior, y habiendo clarificado en el capítulo u que las dos funciones sustanciales del ingeniero son, por un lado, el diagnóstico de problemas derivados de las necesidades materiales de la sociedad y, por otro, el diseño de artefactos que los resuelvan, en este capítulo y los dos subsiguientes buscaremos responder las siguientes siete preguntas:

- ¿Cuáles son los procesos intelectuales mediante los cuales se cumplen aquellas funciones?
- ¿En qué contexto se desarrollan tales procesos?
- ¿Qué conocimientos y capacidades se requieren en cada caso?
- ¿Cómo se adquieren esos conocimientos y esas capacidades?
- ¿Qué métodos y ambientes son más idóneos para cada objetivo de aprendizaje?
- ¿Qué de lo que debe saberse se aprende mejor en la escuela?
- ¿Qué se puede aprender mejor en la práctica o solamente en ella?

## 2. LOS PROCESOS INTELECTUALES DEL DIAGNÓSTICO

El diagnóstico en ingeniería se apoya en conocimientos tanto científicos como empíricos y tiene por finalidad establecer la relación que en el problema planteado existe entre causas y efectos. Los pasos iniciales y más trascendentes hacia el diagnóstico se dan siguiendo procesos lógicos llamados de abducción.<sup>3</sup> Partiendo del caso particular en estudio, y de otros que se le asemejen, el ingeniero infiere qué teorías generales son tentativamente aplicables a explicar lo observado; esta etapa, que podemos llamar **conceptualización del problema**, constituye el meollo del diagnóstico. En seguida viene un **proceso que puede denominarse de validación**, que procede en un sentido lógico inverso; es decir, ensaya la teoría o teorías generales identificadas provisionalmente como aplicables y busca determinar, ahora mediante la deducción, cuál de ellas permite establecer con mayor fidelidad cuantitativa las relaciones causa-efecto que se investigan.

Así pues, el diagnóstico en ingeniería es una excursión intelectual de ida y vuelta. El primer trayecto es de carácter esencialmente cualitativo; el segundo es cuantitativo por excelencia. Tal excursión circular, en su primera etapa, permite alcanzar una comprensión provisional del problema, atribuyéndolo a causas plausibles. En el viaje de retorno, por su parte, se busca probar si la teoría identificada en el paso anterior como tentativamente aplicable es o no capaz de predecir de modo cuantitativo los efectos observados. Para ilustrar el punto, volvamos al problema de las inundaciones usado como ejemplo A del capítulo anterior. Supongamos que en la primera parte del diagnóstico, la de conceptualización del problema, el ingeniero infiere que las inundaciones se deben a que las dimensiones del cauce en cierto tramo son insuficientes para conducir las avenidas del río, y que la teoría del tránsito de avenidas por canales es una representación plausible del fenómeno. Entonces en la etapa de validación debe verificar que, con los datos hidrológicos y topográficos del caso, dicha teoría puede reproducir la magnitud y frecuencia de las inundaciones observadas.

Si el ciclo conceptualización-validación descrito no es exitoso; es decir, si en la fase de validación no se consigue verificar cuantitativamente las relaciones causa-efecto postuladas durante la conceptualización, la falla de diagnóstico se puede atribuir sin duda a que la inferencia por abducción en que consistió la primera fase, aunque parecía plausible, fue errónea. En efecto, si el concepto que nos forjamos del problema en el primer trayecto

del diagnóstico fuese errado, validarlo en el segundo tramo sería imposible, pues la teoría sometida a prueba no sería la pertinente; el proceso de diagnóstico tendría entonces que rehacerse por completo hasta lograr resultados positivos.

### **3. CONOCIMIENTOS Y CAPACIDADES NECESARIOS PARA EL DIAGNÓSTICO**

¿Qué conocimientos y capacidades necesita el ingeniero para diagnosticar? En ambas etapas del proceso, para ser capaz de realizar el diagnóstico, el ingeniero echa mano del acervo de conocimientos científicos o teorías generales que se aprenden principalmente en la escuela. Conceptualizar el problema exige además destreza lógica, que se adquiere de modo incipiente en la escuela y luego se agudiza en la práctica. Tal destreza le permitirá inferir por abducción cuál puede ser el fenómeno genérico al que pertenece el hecho observado e identificar la(s) correspondiente(s) teoría(s) explicativa(s); ésta es obviamente la parte crucial del diagnóstico. Luego, en la etapa de validación, el ingeniero necesita habilidad para aplicar deductivamente las teorías generales postuladas como pertinentes al caso particular que se está estudiando; esta habilidad se adquiere sobre todo en la escuela, pero se afina en la práctica.

Por otra parte, en ambas etapas del diagnóstico el ingeniero lidia con la incertidumbre, una especie de neblina más o menos densa que impide apreciar con nitidez o certeza la realidad que nos rodea; esto significa que cada dato del conjunto que constituye la información disponible puede no ser estrictamente fiel; en consecuencia, cualquier aspecto del problema al que enfoquemos la mirada puede ser en la realidad algo diferente de como lo vemos. La capacidad para contender con la incertidumbre se puede desarrollar sólo en el trabajo práctico, aunque el conocimiento de la teoría matemática de la probabilidad ayuda a aceptar y procesar como incierta la información que en efecto lo es, así como a ver a través de la neblina que la envuelve.

### **4. LOS PROCESOS INTELECTUALES DEL DISEÑO**

En ingeniería se llama diseño a lo que en medicina se denomina prescripción. El diseño constituye la función paradigmática de la profesión; consiste en un ejercicio laborioso y complejo en tres etapas, de las cuales la de diseño conceptual es la primera.<sup>4</sup> Las otras dos son complementarias de aquella y tienen por objetivos 1) la verificación de que el diseño conceptual es idóneo y 2) la optimización y especificación del mismo.

El diseño conceptual es una suerte de chispazo creativo, un acto de síntesis mediante el cual el ingeniero concibe de una sola vez e integralmente, aunque con carácter apenas cualitativo, aproximado y tentativo, una solución al problema diagnosticado.

Por su parte, la verificación del diseño es una actividad de análisis en que aquella teoría cuya aplicabilidad fue probada durante el diagnóstico, y otras mediante las cuales se estima la respuesta del diseño conceptual a las solicitudes previstas, se aplican de modo iterativo hasta verificar deductivamente que el diseño concebido en efecto resuelve el problema y tiene una altísima probabilidad de salir bien librado (es decir, de no fallar) ante cualesquiera de las circunstancias por las que pasará durante su vida útil. La tercera etapa, de optimización y especificación, tiene los fines obvios indicados por su nombre, y más adelante se explicarán su justificación y métodos.

El proceso mental que conduce al diseño conceptual es el más complejo y sutil de cuantos realiza un ingeniero, y aquel cuyos métodos menos se han estudiado y clarificado. Suele asimilarse al acto de creación en el arte, pues es un ejercicio imaginativo y de expresión personal. En dicho acto el ingeniero articula mentalmente una propuesta sintética denominada diseño conceptual. Por ser un acto de creación, tal propuesta es subjetiva por excelencia, aunque, a diferencia de una obra de arte, el diseño conceptual está sujeto a una fuerte restricción racional, pues debe ser consecuente con el diagnóstico al que responde.

La congruencia plena entre el diagnóstico y la solución generada durante el diseño conceptual se asegura en la etapa del diseño que aquí denominamos de verificación, durante la cual dicha solución debe ser analizada, corregida, precisada, reanalizada y depurada por el ingeniero de manera rigurosa, sistemática y exhaustiva, tomando en cuenta los modos en que pueden combinarse las posibles variantes de dicho proyecto y la gama de condiciones y solicitudes que debe soportar durante su vida útil. Después de la etapa de diseño conceptual, la de verificación es la más trascendente de las actividades de un ingeniero, y la más rigurosa desde el punto de vista racional.

Finalmente, el diseño se optimiza y especifica mediante comparación de sus variantes, a fin de escoger y prescribir la que resulte mejor, con cierto criterio que generalmente es el beneficio neto que la referida variante aporta; esta búsqueda del óptimo es necesaria porque la responsabilidad social del ingeniero, como la del médico, no se reduce a recomendar algo que resuelva el problema, sino aquello que lo haga de la mejor manera posible. Tanto en la etapa de verificación, como en ésta de optimización, el ingeniero trabaja en el ámbito de la ciencia, aplicando teorías para deducir de ellas, primero, el comportamiento esperado de las diversas variantes de su diseño, luego sus costos, beneficios y riesgos, y a partir de ellos, su beneficio neto (beneficios menos costos). El diseño óptimo será aquel cuyo beneficio neto sea máximo.

Lo que se sabe de los procesos racionales que conducen al diseño conceptual es poco e impreciso; por tanto, en diversas partes del libro nos seguiremos refiriendo a tal etapa del diseño como acto de creación artística. En cambio, procede tratar con mayor detalle las otras dos etapas; esto es, por un lado, la verificación del diseño conceptual y, por otro, su optimización y especificación, actividades que concentran la mayor parte del tiempo y la atención del ingeniero durante el diseño.

## **5. LA VERIFICACIÓN O REVISIÓN DEL DISEÑO**

Toda falla de una obra de ingeniería se gesta durante la revisión del diseño, a veces culposamente y otras sin culpa alguna. Ello bastaría para considerar que esta actividad es la más trascendente del ingeniero y la que concentra la mayor parte de su responsabilidad; esta fase del trabajo ingenieril, considerada conjuntamente con el diseño conceptual, conjuga facetas de arte y de ciencia, que constituyen la ocupación más creativa que un ser humano pueda tener. Sin embargo, el diseño no es un dechado de racionalidad; no puede serlo por dos contundentes razones: primero, porque el acto del que nace el diseño conceptual es, sobre todo, un acto de inspiración e intuición; en segundo lugar, el diseño siempre tiene objetivos múltiples (economía de inversión, economía de operación y mantenimiento,



seguridad, belleza, durabilidad, etc.) y éstos son contradictorios; por tanto, no hay manera lógica de conciliarlos para que todos se cumplan; más bien al contrario, el diseño es siempre, finalmente, un compromiso entre todos esos objetivos, ninguno de los cuales puede satisfacerse a plenitud.

Paradójicamente, y pese a que no puede satisfacer con rigor ninguno de sus objetivos, el diseño debe cumplir dos exigencias que son condiciones de racionalidad. Por un lado, se exige que sea compatible con el diagnóstico que lo precedió; dicho de otro modo, el diseño debe basarse precisamente en la teoría que en el tramo final del diagnóstico se consideró que explicaba a satisfacción el problema a resolver. Por otra parte, se pide probar que el objeto diseñado sea capaz de sobrevivir sin falla durante toda su vida útil. Discutiremos ahora cómo se procede para satisfacer esta segunda condición, que constituye el esfuerzo final para lograr que el diseño en efecto resuelva el problema planteado.

Mientras no sea posible explicarlo y codificarlo, el diseño conceptual seguirá siendo un acto más que un proceso: un fenómeno instantáneo de creación muy poco propicio para ser descrito racionalmente y menos aún para responder a requisitos de racionalidad plena. Por eso es necesaria la etapa de verificación, que busca eliminar toda posibilidad de que resulte disfuncional por cualquier motivo, o que no sea factible, o que lo sea a muy alto costo o riesgo. Para esto se requiere verificar primero que el diseño conceptual es factible y luego que responde en lo general al propósito que se busca, de acuerdo con la teoría que durante el diagnóstico se probó aplicable al problema. En el caso de las inundaciones (ejemplo A de la sección 11.3), si la solución propuesta es rectificar y ampliar cierto tramo del cauce, la teoría probada durante el diagnóstico se usaría para simular el funcionamiento del cauce rectificado y verificar que la rectificación diseñada en efecto evita inundaciones ante las avenidas de diseño previstas.

En todo diseño se adoptan factores de seguridad, a fin de reducir la probabilidad de que las incertidumbres de cualquier tipo den lugar a una falla. La manera convencional de hacerlo es multiplicar las cargas o solicitaciones (o dividir las resistencias o capacidades) por un factor mayor que la unidad, denominado factor de seguridad. En proyectos ordinarios, la experiencia de muchos casos del mismo tipo ha permitido establecer cuál es el factor de seguridad necesario para que la frecuencia de fallas sea tan baja que resulte aceptable para la sociedad. En proyectos de carácter más singular, es responsabilidad del ingeniero proponer el factor de seguridad con base en su juicio profesional, así como acumular y compartir con el gremio la experiencia resultante. Hecho el diseño con un factor de seguridad apropiado para un mecanismo de falla, en seguida se debe analizar el comportamiento del proyecto ante todos y cada uno de los otros mecanismos de falla posibles; en el ejemplo que hemos venido usando, los mecanismos de falla serían aquellos que pueden cambiar la geometría del cauce rectificado, como erosión de las riberas o el fondo, acumulación de sedimentos en algunas porciones del cauce, fallas de los taludes del mismo, etcétera.

En la revisión del diseño, el análisis del comportamiento debe ser lo más realista posible; es decir, no deben agregarse durante ella supuestos conservadores adicionales a los factores de seguridad ya incorporados. Con base en los resultados de tal análisis se hacen entonces ajustes al diseño según se requiera, a fin de que el proyecto alcance el nivel de seguridad

deseado ante cada posible mecanismo de falla. Esta revisión debe tener características opuestas a las del diseño conceptual; esto es, debe ser un proceso analítico, deductivo, cuantitativo, ordenado, sistemático, científicamente fundado y, para mayor seguridad, redundante. Además, debe basarse en conocimiento comprobado, preferiblemente teorías científicas. “La teoría es el lenguaje por medio del cual se pueden expresar las lecciones de la experiencia. Cuando no hay teoría [...] no hay saber integral; sino fragmentos incompresibles’: Mediante deducción a partir de teorías, se verifica que ante cada uno de los mecanismos de falla imaginables el diseño es seguro. La teoría representa el grado de validez más alto que el conocimiento puede alcanzar, y el procedimiento deductivo es el tipo de inferencia lógica más confiable, por lo que, salvo un posible error humano y/o eventos desfavorables impuestos por la omnipresente incertidumbre de la naturaleza, esta revisión lleva el diseño al grado de seguridad deseado. La probabilidad de falla lograda tras esta etapa nunca será absolutamente nula, pero se habrá reducido a un valor aceptable en virtud de cierto compromiso prudente entre economía y seguridad.

La revisión del diseño para evitar fallas no sólo es la tarea más trascendente de la ingeniería, sino también la más laboriosa. Esto se debe a que ha de realizarse para todos y cada uno de los mecanismos de falla potenciales, en cada caso con idéntico rigor deductivo y con el mismo grado de detalle. Más aún, cuando en la revisión se descubre que para impedir cierto mecanismo de falla es necesario reforzar el diseño en algún aspecto, esto no puede hacerse sino por aproximaciones sucesivas: se hacen ciertas modificaciones, se reanaliza el nuevo comportamiento del proyecto y, si éste no es satisfactorio, se hacen nuevas modificaciones y se repite el ciclo; así para cada mecanismo. Antes de las modernas computadoras esta labor era tan tediosa, que el análisis se hacía con modelos numéricos muy simples y poco fieles. Debido a lo laborioso del análisis, era usual suspender las iteraciones tan pronto como se confirmaba que el factor de seguridad alcanzado superaba al mínimo estipulado, sin intentar mejores aproximaciones que minimizaran el costo; por tanto, los diseños normalmente resultaban conservadores, a veces en alto grado. Hoy se pueden afinar muchísimo mediante modelos más fieles y mayor número de iteraciones, aprovechando la rapidez con que las computadoras hacen operaciones numéricas.

Sin embargo, la mayor rapidez y la simplificación que las computadoras han traído a esta parte del diseño no están libres de riesgos. En muchas empresas de ingeniería las computadoras han introducido una nociva forma de división del trabajo. Los ingenieros más experimentados se concentran en el diseño conceptual y dejan casi toda la responsabilidad de la revisión y especificación del diseño en manos de los llamados “analistas”. Si éstos permanecen mucho tiempo en esa y sólo esa actividad, y no participan en las actividades de diagnóstico, diseño conceptual, supervisión de la construcción y monitoreo del comportamiento del proyecto terminado, se convertirán en “especialistas” con experiencia y juicio profesional muy limitados; carecerán, pues, de una visión integral de los problemas de la ingeniería. Dado que el objetivo central de la revisión del diseño que estamos discutiendo es identificar modos de falla potenciales y adecuar el proyecto para que ninguno de éstos se materialice, es imposible confiar en que tal división del trabajo permita incorporar integralmente el saber de la profesión en esa crucial tarea. Si por motivos de eficiencia resulta conveniente encomendar los análisis en computadora a jóvenes analistas diestros en el manejo de este instrumento, es indispensable que, a la vez, tales analistas sean ingenieros integrados al equipo de trabajo y enterados de todas las facetas del proyecto respectivo, y que tengan continuamente oportunidad de ampliar su experiencia y nutrir su juicio participando en actividades donde se compartan las vivencias y se discutan los resultados del trabajo integral.<sup>7</sup> Además, en tales casos el proceso de revisión del diseño debe ser supervisado de cerca por ingenieros experimentados; esta supervisión tiene que incluir la identificación de los mecanismos de falla a revisar, la selección de los métodos de análisis de cada uno de ellos, la adopción de supuestos y parámetros de entrada del análisis, y la evaluación de los resultados. Dado que las fallas enseñan más que los éxitos, el mejor momento para aprender de ellas es tempranamente. Uno de los métodos educativos más eficaces para conseguir tal aprendizaje es exponer a los miembros más jóvenes de los equipos de trabajo al riesgo de cometer errores de juicio menores en esta etapa del diseño, que serían detectados por sus supervisores más experimentados y que luego el equipo de trabajo discutiría en forma colegiada.



## 6. LA OBLIGACIÓN DE OPTIMIZAR Y ESPECIFICAR

Se justifica considerar con cierto detenimiento la optimización, pues si bien sus fines son obvios, su necesidad no suele serlo para todos.

Como se apuntó antes, el diagnóstico y el diseño están interconectados de manera lógica, pues la propuesta de solución postulada por el segundo debe corresponder a las relaciones causa-efecto que se identificaron durante el primero. Sin embargo, no hay relación biunívoca entre diagnóstico y diseño: a cada diagnóstico puede acomodarle más de una solución; es decir, no un solo diseño, sino varios. En efecto, todo diagnóstico abre un abanico de posibles soluciones, ya que a) entre el diagnóstico y la solución está ese proceso altamente subjetivo que hemos llamado diseño conceptual, y b) las variables de todo problema de ingeniería son inciertas en alto grado, lo que impide que diagnóstico y diseño partan de premisas y arriben a conclusiones categóricas y plenamente determinadas. Pongamos por caso que, en el ejemplo A de la sección 11.3, que hemos venido usando para ilustrar esta discusión, el diagnóstico corroboró las relaciones cualitativas y cuantitativas entre las inundaciones observadas y las variables topográficas e hidrológicas. Tal diagnóstico puede dar pie a varias soluciones conceptuales diferentes, ya que ingenieros igualmente capaces podrían idear proyectos muy distintos como medios para evitar las inundaciones; por ejemplo, aparte de la opción consistente en una rectificación del cauce que le diera suficiencia, podrían proponerse obras de control de avenidas aguas arriba del sitio de interés, u obras en la cuenca tributaria para incrementar la infiltración de agua en el terreno y alargar el tiempo de llegada del agua de lluvia al cauce, o una combinación de las tres anteriores, etc. Y cualquiera que sea la opción escogida, ella también tendrá sus propias variantes; por ejemplo, si se opta por construir una presa para control de avenidas, ésta puede ser de un tipo o de otro, etcétera.

El proceso de optimización permite seleccionar entre la gama de soluciones posibles la que maximiza la diferencia beneficio menos costo o, con mayor rigor, maximiza el valor presente de dicha diferencia, considerando explícitamente la naturaleza incierta de las variables involucradas. La comparación de opciones debe hacerse, entre aquellas que resulten factibles, después de haber definido para cada una sus plazos de ejecución, sus costos y sus riesgos, de modo que en efecto puedan estimarse los beneficios que rendirían y lo que tendría que pagarse por ellas.

Ahora bien, la optimización no es una tarea que pueda o deba realizar el ingeniero a solas, por sí y ante sí mismo. Mas bien debe llevarla a cabo conjuntamente con el dueño de la obra y con representantes de los intereses de los principales grupos sociales a los que el proyecto afectará positiva o negativamente; además, debe ajustarse a ciertas regulaciones, cuya función principal es tomar en cuenta los intereses de la sociedad en su conjunto y traducirlos en requisitos mínimos que las obras de ingeniería deben cumplir. La necesidad de incluir esa diversidad de puntos de vista al seleccionar la solución óptima se debe a que, en cualquier proyecto, la distribución de beneficios y costos entre grupos sociales puede ser muy diferente de una solución a otra y a que, además, los costos que

indirectamente repercuten sobre el conjunto de la sociedad suelen ser cuantiosos.

Finalmente, la especificación del diseño, que sigue a la revisión del mismo y a su optimización, consiste en prescribir con todo el detalle necesario la solución óptima, de modo que ésta pueda materializarse con apego a las consideraciones y conclusiones del diseñador. Para el correcto funcionamiento del proyecto diseñado, especificarlo de manera completa y fiel es crucial, pues su construcción o fabricación normalmente estará a cargo de un equipo de ingenieros distinto del que fue responsable del diseño. Mejor dicho, la construcción o fabricación de un producto diseñado constituye por sí misma otro proyecto de ingeniería y, por tanto, exige la integración de otro equipo de trabajo con las capacidades conjuntas apropiadas. En este nuevo proyecto el objeto focal habrá cambiado: ya no será concebir una creación material que satisfaga las necesidades humanas de origen, sino los procedimientos para fabricarla o construirla según las especificaciones producidas en el proyecto antecedente. Por antonomasia, el primer proyecto se llama de diseño, aunque también la fabricación y la construcción impliquen diseño de sus respectivos procesos; el segundo se denomina lógicamente de construcción o fabricación. Es obvio, entonces, que una transición exitosa entre ambos proyectos exige asegurar una comunicación sin errores ni omisiones entre los dos equipos de trabajo; esto es, entre los diseñadores y los fabricantes o constructores. Ésa es la importante función que cumple la especificación del proyecto diseñado. Las deficiencias de comunicación entre el equipo responsable del diseño y el de fabricación o construcción pueden ser suficientes para producir la falla del proyecto diseñado y, por tanto, tornar inútiles todos los esfuerzos del diseño.

En resumen, el diseño, igual que el diagnóstico, es una excursión intelectual de ida y vuelta, con forma de un ciclo cerrado. El ciclo es más largo y laborioso en el diseño que en el diagnóstico, y mucho más trascendente por cuanto del diseño depende tanto el tino como la seguridad de la solución. Apoyándose en el diagnóstico, durante el diseño el ingeniero echa a volar las capacidades creativas de su imaginación para concebir una solución integral a grandes rasgos, llamada diseño conceptual; después de probar con rigor científico que ésta en efecto resuelve el problema y es suficientemente segura ante todas las eventualidades previsibles, la optimiza para hacer máximo el beneficio neto que la sociedad recibirá del proyecto, y termina especificándola en detalle para que pueda ser construida o fabricada.

## **7. CONOCIMIENTOS Y CAPACIDADES NECESARIOS PARA DISEÑAR**

Para diseñar, el ingeniero debe estar dotado de a) intuición y creatividad que le permitan generar diseños conceptuales atinados y compatibles con el diagnóstico del problema al que se enfrenta; b) un amplio cuerpo de conocimientos pertinentes, tanto científicos como empíricos; c) capacidades lógicas y habilidad para combinar con sentido pragmático el uso de dichos conocimientos; d) la misma capacidad que se requirió en el diagnóstico para lidiar con la incertidumbre, y e) sensibilidad para adoptar, en los procesos de verificación y optimización, hipótesis que simplifiquen el problema sin omitir o distorsionar lo esencial de los fenómenos involucrados.

La mayor parte de los conocimientos necesarios, sobre todo los de carácter científico, se pueden adquirir óptimamente en la escuela; algunos de los de tipo empírico se aprenden en la escuela y muchos más en los años de práctica profesional. Las capacidades lógicas y la creatividad necesarias para diseñar sólo pueden desarrollarse y afinarse en la práctica, pero se apoyan y nutren en aptitudes y destrezas mentales adquiridas en el estudio de la ciencia, en particular las llamadas ciencias de la ingeniería, por lo que sin tal estudio resulta imposible desarrollar aquellas capacidades. Ello explica tanto la importancia de una buena formación escolarizada como el peso relativo que la formación científica en general, y en particular la enfocada a las ciencias de la ingeniería, tienen en los planes de estudio de este campo, pues ellas constituyen el cuerpo principal de conocimientos que el ingeniero usará durante el resto de su vida activa, con particular intensidad en la etapa inicial de formación práctica con la que comienza la vida profesional. Para no perder la oportunidad de aprender en su momento la teoría, y sufrir luego la imposibilidad de asimilar la experiencia práctica, es crucial que los estudiantes de ingeniería comprendan desde que comienzan sus estudios que teoría y práctica son complementarias y no pueden sustituirse mutuamente.

La sensibilidad para adoptar hipótesis que simplifiquen la modelación formal de los problemas sin distorsionarlos también se adquiere en la práctica, y es una de las manifestaciones del llamado juicio profesional; el principal método para hacerse de esta capacidad consiste en aprovechar todo diseño que se materializa para hacer predicciones teóricas de su comportamiento, luego medir en el prototipo las mismas variables que se predijeron, y finalmente comparar lo predicho con lo observado y extraer de ello conclusiones.

Todo lo hasta aquí dicho acerca del diseño apunta a la conclusión de que el ingeniero aprende a diseñar predominantemente en el ejercicio práctico de su profesión.

## **8. LA INEVITABLE INCERTIDUMBRE**

Hemos dicho reiteradamente que la incertidumbre está presente en todos los aspectos de la ingeniería, desde la información de entrada hasta las especificaciones del diseño. Se trata, en efecto, de un hecho insoslayable en el que debe enfocar su atención el ingeniero durante todas las etapas de su trabajo. Tan inevitable y trascendente es el manejo de la incertidumbre en esta profesión, que algunos experimentados ingenieros expresan abiertamente que decidir ante ella constituye la responsabilidad primordial de la ingeniería. A reserva de ampliar en el capítulo xv la discusión del tema, consideremos aquí sólo esquemáticamente los orígenes, naturaleza y consecuencias que la incertidumbre tiene.

El origen de la incertidumbre está en la naturaleza misma: vivimos en un mundo incierto y tenemos que actuar a sabiendas de ello.<sup>8</sup> En consecuencia, el conocimiento, que es a la vez nuestro modelo de la realidad y nuestro medio para actuar racionalmente sobre ella, es siempre imperfecto e insuficiente: toda teoría tiene una probabilidad finita de ser falsa y hay grandes porciones de la realidad cotidiana acerca de las cuales no poseemos teoría alguna, sino acaso postulados empíricos fragmentarios en espera de ser abarcados por una hipótesis explicativa y luego

comprobados o rechazados científicamente. Y aunque dispusiéramos de conocimiento teórico para comprender y explicar todos los fenómenos (cosa que nunca acabaremos de tener) y tal conocimiento fuera absolutamente cierto (lo que nunca será), la certeza en nuestras decisiones de diagnóstico y de diseño seguiría siendo inalcanzable, pues sería imposible reunir toda la información que demandarían tales teorías exhaustivas para caracterizar completamente el estado que en un instante futuro guardará cualquier porción de la naturaleza que interesara. Con más razón seremos incapaces de allegarnos la información necesaria para prever con exactitud todas las eventualidades que el futuro pueda deparar a un sistema como los que trata la ingeniería, algunas de cuyas variables dependen de la voluntad de una o muchas personas.

Todo lo dicho en el párrafo anterior se refiere a las incertidumbres del conocimiento universal; agréguese a ello la imperfección e insuficiencia del conocimiento personal de cada quien y se tendrá un panorama más completo del insuperable conjunto de factores que impiden la certeza

Por otra parte, debemos reconocer que el conocimiento cierto y claro es una preferencia o deseo natural del ser humano<sup>9</sup> y, por lo mismo, debemos evitar conscientemente que esta necesidad nuestra de certeza nos empuje a negar la incertidumbre de la realidad y/o la realidad de la incertidumbre. Las consecuencias que para la ingeniería tiene la incertidumbre son múltiples. Las más notables son las siguientes: a) obliga a comprometer una opinión explícita o implícita sobre la probabilidad de eventos futuros, sea con base en la información disponible en el momento o después de un plazo razonable en el cual habría que allegarse datos adicionales; b) vuelve legítimo acudir a fuentes empíricas de información de múltiples orígenes, si las de carácter científico no existen o tienen lagunas o incongruencias; c) impone, tanto a la primera fase del diagnóstico (aquella basada en un razonamiento abductivo) como al diseño conceptual, carácter de procesos poco explícitos y no formalmente rigurosos, sino basados en inferencias apenas plausibles, durante los cuales de modo zigzagueante se ensayan diversas decisiones antes de llegar a una conclusión que, además, no será sino tentativa. Las consecuencias a) y b) provienen directamente de la incertidumbre, pero también del hecho de que en ingeniería cada problema es nuevo e integral: por ser nuevo no hay información a posteriori sobre él y, por ser integral, todas y cada una de sus variables significativas son imprescindibles, tengamos o no datos confiables para caracterizarlas, determinarlas o acotarlas y conocer sus efectos. Por su parte, la consecuencia c) pone las cosas en un estado que, aunque incómodo para los propios ingenieros y la sociedad, ha de ser aceptado conscientemente por unos y otra: ni el diagnóstico ni el diseño conceptual son susceptibles de prueba irrefutable, pues, por un lado, ni la abducción ni la inducción conducen a conclusiones que puedan considerarse verdaderas, sino plausibles o probables, respectivamente, y, por otro, si ciertos datos de la información de partida o algunos pasos del proceso son imperfectos, la solución misma lo será necesariamente. Esto explica por qué, aunque con una frecuencia muy baja, en todo tipo de obras o productos de la ingeniería suelen ocurrir fallas, algunas debidas a que *errare humanum est* y, la mayoría, a la simple e insuperable incertidumbre.

Dado el origen y las consecuencias de la incertidumbre, el ingeniero no debe pretender la certeza absoluta en las variables que estudia, sino



buscar evidencias de la incertidumbre y procesarlas para luego acotarla. La necesidad de reducir la incertidumbre a niveles aceptables obliga a reunir información con cierto grado de redundancia, que luego debe ser pasada por los tamices de la ciencia, el conocimiento empírico y el juicio profesional, para finalmente discernir y conciliar evidencias contradictorias.

#### ***IV. El juicio profesional***

##### **1. LA INCERTIDUMBRE Y LA OBLIGACIÓN DE DECIDIR**

Extraer conclusiones categóricas de premisas bien definidas es un problema menor, que un buen técnico puede resolver siguiendo procedimientos de un manual; es obvio que no consiste en eso la función central del ingeniero. La incertidumbre de las variables con que trata la ingeniería y el carácter parcialmente heurístico del diagnóstico y el diseño hacen mucho más complejo el papel del ingeniero. Su obligación es llegar a un diagnóstico y un diseño pese a que la información disponible sea incierta e incompleta. Para ello no sólo debe seguir los procesos lógicos descritos en el capítulo precedente, sino aplicar su buen juicio a superar la incertidumbre inevitable.

En este punto la analogía con la medicina sigue siendo válida: no se consulta a un médico para que a partir de los síntomas del paciente concluya mecánicamente cuál es la enfermedad y cuál la prescripción unívoca. Más bien se espera que, ante la incertidumbre que siempre está presente en los síntomas, en la posible enfermedad y en los supuestos remedios, el profesional de la medicina ponga en juego su juicio experto para acotar lo más posible el diagnóstico y luego, al prescribir, adopte una estrategia que conduzca a descartar posibilidades espurias y finalmente logre la cura del paciente. Si no hubiera incertidumbre, acudir al médico sería innecesario, pues cualquiera podría entrar al índice de un manual de medicina e identificar en él la enfermedad y la prescripción a partir de un conjunto de síntomas inequívocos. Igual que en ingeniería, si no hubiera incertidumbre todo problema médico se reduciría a una cuestión meramente técnica.

Lo central del quehacer de un ingeniero no es, pues, seguir al pie de la letra procedimientos establecidos de antemano para pasar sin sombra de duda de las evidencias nítidas de un problema al diagnóstico indudable del mismo y de éste a la especificación de la obra de ingeniería necesaria. Es verdad que el ingeniero en efecto aplica algunos procedimientos de este tipo, pero ellos constituyen sólo una parte, y no la más valiosa o trascendente, de un conjunto mucho más amplio y complejo de procesos intelectuales. La responsabilidad principal del ingeniero es, primero, aplicar su juicio experto a interpretar, de manera subjetiva pero racional, la incierta información con que cuenta, hasta convertirla en un insumo útil para la parte científica de sus tareas; después, seguir apoyándose en su juicio para procesar esa información rigurosamente, pese a la incertidumbre que seguirá teniendo, hasta llegar con base en ella a un diagnóstico y un diseño. Es claro que tanto el diagnóstico como el diseño a que llegue tendrán la huella de la subjetividad personal del ingeniero que los ha realizado, pero ambos serán racionales por cuanto tendrán congruencia en sí y entre sí; esto es, por un lado, diagnóstico y diseño serán, cada uno, concordante con

el respectivo conjunto incierto de indicios y evidencias que lo determinaron y, por otro, el diseño será congruente con el diagnóstico al que responde.

Para el ingeniero, poner en juego esa capacidad llamada juicio profesional es una necesidad, en vista de que a) la incertidumbre es inherente a todo conocimiento, sea conocimiento personal o conocimiento compartido, aunque sea compartido universalmente, y b) la obligación de resolver un problema práctico está por encima de purismos metodológicos y no se puede eludir por el hecho de que haya cierta incertidumbre. La consideración a) implica que, si el saber científico disponible no basta para el caso, es legítimo acudir a otras fuentes de conocimiento, como el registro de precedentes documentados por la profesión, la experiencia personal, los datos empíricos aportados por informantes calificados, experimentos y estudios ad hoc realizados por el propio ingeniero, etc., todo ello normado por el juicio profesional. Ninguna fuente de conocimiento dentro de esta amplia gama puede ser descartada a priori por la ingeniería; cada una se debe valorar y usar según el ingeniero juzgue que es aplicable y se requiera. El ingeniero experimentado debe poder hacer un diagnóstico de un problema de su profesión y diseñar la correspondiente solución a partir de la información asequible, cualquiera que ésta sea: datos fragmentarios, evidencias circunstanciales, e incluso lo que algunos podrían considerar simples dichos y rumores; pero podrá hacerlo apropiadamente sólo si posee buen juicio en el campo a que el problema pertenece.

Adecuadamente filtrado, interpretado y compatibilizado por el buen juicio del ingeniero, cada uno de esos datos y todos ellos juntos pueden aportar la información necesaria y suficiente para resolver un problema. En esas circunstancias es obvio que el quid está en el filtro experto a través del cual se hace pasar la información. Se tiene que proceder así porque, al contrario de lo que ocurre en la ciencia, en la ingeniería los problemas no son susceptibles de reproducirse completamente mediante un experimento controlado: el único modelo confiable de un proyecto de ingeniería completo es el proyecto mismo. Para probar el diagnóstico o el diseño en su totalidad es necesario ensamblar suficientes evidencias parciales de que la solución es correcta, y esto se logra aplicando el juicio profesional a bus— carlas, seleccionarlas e integrarlas.

## **2. EL JUICIO Y LA NECESIDAD HUMANA DE CERTEZA**

Igual que la astronomía, la ingeniería trabaja con escenarios que no se pueden reproducir en el laboratorio; pero al contrario de aquélla, ésta no puede suponer que los sistemas con que lidia responden solamente a fenómenos del mundo inanimado, pues la sociedad y sus individuos siempre interactúan con las obras y artefactos que el ingeniero concibe y crea, que así se transforman en sistemas de carácter socio-técnico (o socio-técnico-ambiental si además, como ocurre casi siempre, participan dinámicamente en ellos subsistemas de la naturaleza viva). Estos tipos de sistemas se discuten, a propósito del desarrollo sostenible, en el capítulo VIII, y con enfoque más general, en el capítulo XIII.

Así pues, el ingeniero tiene necesidad y obligación de apoyarse en su juicio profesional para salvar la falta de certeza referida, y ante cada nuevo proyecto debe reunir la información necesaria para complementar la de

carácter científico a fin de concebir y desarrollar una solución al problema que se le plantea.

De la aplicación del juicio profesional se derivan a) decisiones del ingeniero, tácitas o explícitas, relativas al diagnóstico o el diseño, y b) decisiones del cliente sobre disyuntivas planteadas por el ingeniero. En cualquier caso tales decisiones se basan en el conocimiento, siempre imperfecto o incompleto, que el profesional responsable del proyecto tiene en ese momento. Tal estado de conocimiento puede ser ligeramente distinto entre diversos profesionales similarmente capaces, y en cada uno variará con el tiempo. Por tanto, las decisiones de diferentes ingenieros pueden diferir en cierto grado según cada uno haya asimilado, interpretado y asignado valor relativo al conocimiento y la experiencia que lo nutrieron durante su formación y su ejercicio profesional, por una parte, y, por otra, según' haya adquirido y procesado información sobre el caso en estudio; asimismo, con el tiempo pueden variar sus decisiones en la medida en que se acumule nuevo conocimiento objetivo. El juicio experto es, por tanto, específico del individuo que lo posee y del momento en que se expresa; es una facultad humana de naturaleza un tanto oscura que, sin embargo, en cuanto a su función, ha sido agudamente definida en el siguiente párrafo de Locke "El juicio es la facultad que Dios ha dado a los humanos para que puedan satisfacer su deseo de conocimiento claro y cierto cuando éste no es inmediatamente asequible; mediante el juicio, la mente asume cada aseveración como verdadera o falsa aun sin tener a mano una prueba fehaciente"<sup>10</sup>

Durante los más de tres siglos que nos separan de Locke, apenas si en los últimos decenios las ciencias del conocimiento comienzan a desentrañar un poco mejor cómo opera el juicio experto, aunque no específicamente en la ingeniería sino en otras profesiones o actividades, como la medicina, y en general en la toma de decisiones.<sup>11</sup> Por ejemplo, se ha confirmado que para diagnosticar, los médicos expertos realizan procesos mentales muy complejos, que a su vez se apoyan en variados modelos y representaciones mentales pocas veces explícitos.<sup>12</sup> Estos modelos y representaciones tienen que ser, por una parte, de precisión bastante para permitir una amplia evaluación de la consistencia de sus conclusiones y, por otra, de suficiente flexibilidad para dar cabida a reinterpretaciones sucesivas conforme se obtiene nueva información.<sup>13</sup> Es imaginable que el buen juicio ingenieril funcione de modo similar, lo que no invalida la aguda conjetura de Locke sobre el papel que el juicio juega e la manera como toda persona toma decisiones; las investigaciones recientes a que nos referimos más bien arrojan luz sobre un aspecto que aquel pensador no se detiene a considerar: la naturaleza de los mecanismos operativos de esa misteriosa capacidad llamada juicio.

---

<sup>10</sup> 'J. Locke, Ensayo sobre el entendimiento humano, XIV, 3, 1689.

<sup>11</sup> 2K. A. Ericsson y J. Smith (eds.), *Toward a General Theory of Expertise*, Cambridge University Press, Cambridge, G. B., 1991, 344 pp.'

<sup>12</sup> V. L. Patel y G. J. Groen, "The general and specific nature of medical expertise: critical look" en K. A. Ericsson y J. Smith (eds.), op. cit., 1991, pp. 93-125.

<sup>13</sup> Aunque inconsciente, el proceso parece ser análogo al que formalmente se realiza cuando se aplica el teorema de Bayes para recalcular la probabilidad de ocurrencia de cierto evento una vez que se sabe que otro hecho ligado a él ha tenido lugar. Véase, por ejemplo, el apartado sobre el teorema de Bayes en R. M. Dawes, *Rational Choice in an Uncertain World*, Harcourt Brace Jovanovich, Orlando, Florida, 1988, pp. 323-326.

Otra característica del juicio profesional sobre la que parece haber consenso es que tal capacidad no se adquiere ni desarrolla mediante el aprendizaje de hechos codificados y reglas, sino por la larga exposición del sujeto a relaciones interpersonales y su participación en actividades colectivas sobre la materia. De aquí la importancia que para el desarrollo de esta facultad tiene el trabajo en equipo, que es característico de la ingeniería. El juicio es “el componente tácito o implícito del conocimiento, el ingrediente que, además de no estar expresado en proposiciones, es inexpresable. Es la parte del conocimiento que no se comunica en forma de reglas ni mediante aseveraciones categóricas y que, por tanto, no se puede reducir a información ni puede codificarse de la manera que es característica de la información”.<sup>14</sup>

---

<sup>14</sup> M. Oakeshott, “Learning and teaching”, en *The Concept of Education*, editado por R. S. Peters, Routledge and Keagan Paul, Londres, 1967, p. 167.

### 3. EL PAPEL DEL JUICIO PROFESIONAL

Cabe preguntar ahora qué relaciones guarda el juicio profesional con el resto del acervo mental del ingeniero y con el conjunto de los procesos intelectuales que éste realiza. El cuerpo de conocimientos que un profesional de la ingeniería posee constituye el marco conceptual en el que desarrolla sus diagnósticos y diseños, a la vez que le sirve de guía para identificar la información, adicional que en cada momento necesita. Para que le sea útil, la información que va obteniendo al abordar cada nuevo problema debe ser incorporada al mismo marco conceptual, y el medio principal para ello es el juicio. El buen juicio de un ingeniero se manifiesta entonces en su capacidad de a) distinguir la información que es relevante para cada problema entre el cúmulo de la que no lo es; b) buscar expresamente y de modo certero la evidencia adicional que es necesaria; c) conciliar información contradictoria, y d) ponderar y aprovechar datos diversos según su percepción personal sobre el significado de ellos. Entonces, el juicio es lo que permite hacer inferencias pertinentes a partir de las experiencias previas y en el contexto de la incertidumbre que siempre existe en los datos asequibles y en el conocimiento de que se dispone. El juicio es, pues, un atributo subjetivo, inseparable tanto del individuo que lo ejerce como de sus vivencias profesionales.

Con un dejo de sabiduría popular podría decirse que ante lo bien conocido actuamos con base en el conocimiento, y ante lo incierto, con base en nuestro juicio. Ahora bien, entre lo desconocido y lo que conocemos mejor, como entre lo negro y lo blanco, hay una gradación continua de grises, por lo que la proporción en que se mezclan conocimiento y juicio en cada decisión es variable. Así, la manera de tomar decisiones puede ser cualquiera de las tres siguientes:

1. En cuestiones sobre las que no tenemos conocimiento o información objetiva alguna sólo podemos decidir apoyándonos en nuestro juicio. Como el ser humano tiene necesidad de certeza, según Locke, tales son las decisiones que nos causan mayor desasosiego y, sin embargo, de ordinario sabemos enfrentarlas y resolverlas: lo hacemos transformando nuestro desconocimiento absoluto en certidumbre subjetiva, a veces también absoluta (como en las cuestiones relativas a la fe religiosa, que simplemente asumimos o no).

2. Por otro lado, como veremos en el capítulo xiv, la incertidumbre de los asuntos que conocemos medianamente la transformamos en probabilidades subjetivas. Un ejemplo ingenieril sería el siguiente: por insuficiencia de conocimiento objetivo es imposible fijar la probabilidad de que en cierta localidad ocurra un sismo de tal o cual intensidad, en un lapso dado; en consecuencia, el ingeniero experto enfrenta el problema asignando, mediante su juicio personal, un valor relativo entre 0 y 1 (o entre 0 y 100%) a su grado de convicción personal sobre la probabilidad de tal evento, y luego actúa en consecuencia; es decir, razona y llega a conclusiones que se expresan también en forma probabilista. Del mismo modo procede un no ingeniero ante problemas ordinarios análogos, salvo que en general no asigna probabilidades explícitamente. En cualesquiera de los dos casos, ésta es una manera ingeniosa de resolver el problema; como se ve, consiste en transformar una duda en una aseveración y, así, convertir la

incertidumbre en certeza para satisfacer la necesidad humana diagnosticada por Locke.

3. Finalmente, el modo en que actuamos ante lo que conocemos mejor es ignorando las pequeñas incertidumbres y tratando los problemas en forma determinista; es decir, convirtiendo en blanco o negro la información según esté más próxima a uno u otro extremo de la gradación de grises.

#### **4. NATURALEZA DEL JUICIO PROFESIONAL**

Con base en lo dicho, ya podemos adelantar que el proceso mental implícito en el juicio difiere radicalmente de los razonamientos deductivos. La deducción es un proceso unidireccional que pasa de lo general a lo específico de modo directo en el marco de una teoría, y sus conclusiones son verdaderas si lo son sus premisas. Por su parte, el juicio permite pasar de lo específico a lo general mediante una suerte de razonamiento inductivo o asociativo difícil de codificar, con frecuencia iterativo y zigzagueante, que de una manera no necesariamente rigurosa explora, discierne y adopta como válidas ciertas analogías con base en las cuales decide.

El juicio se asemeja a la intuición, pero difiere de ella en que no es un acto sino un proceso. En efecto, el juicio implica un modo discursivo de conocimiento; esto es, uno en que la razón discurre, a veces arduamente, acerca del objeto hasta completar una noción de él; es, por lo mismo, un conocimiento mediato, que requiere tiempo para alcanzarse. En cambio, la intuición, como indica su etimología (*intuitus* = vistazo, mirada), es un conocimiento inmediato, en el cual el objeto es aprehendido instantáneamente, en una operación similar al simple acto de mirarlo; no exige otro esfuerzo que mirar.

Según la noción de Locke antes transcrita, los seres humanos tenemos necesidad de conocimiento cierto, y cuando éste no es directamente asequible, el juicio interviene para llevarnos de la incertidumbre a la certeza. Entonces el juicio podría definirse como una capacidad que permite transformar con tino los problemas, que por la naturaleza del universo en que vivimos son siempre probabilistas, en asuntos deterministas. Al ejercer el juicio, el cerebro tomaría datos del mundo incierto para transformarlos en un modelo determinista de ese mismo mundo. ¡Prodigiosa facultad que nos permite resolver problemas probabilistas cuando no hay para ellos una formulación formal de este tipo! Debemos reconocer, sin embargo, que por lo complejo de las cuestiones a las que se aplica y por ser una capacidad humana, el juicio es limitado y falible; esto lo sabemos todos. Por eso es deseable, en problemas de ingeniería muy complejos, complementar el juicio con análisis basados en una formulación probabilista formal, si ésta es posible. Sin embargo, si el ingeniero tiene experiencia acumulada muy amplia, por haber analizado formalmente muchos problemas de cierto tipo, es posible confiar en que su buen juicio no lo traicione; aun así, los problemas de la ingeniería en que el juicio profesional queda como recurso único o principal siguen siendo muy numerosos. Y si buscamos un proyecto ingenieril en que el juicio no intervenga en absoluto resulta que ino existe!

De lo anterior podemos concluir que, aunque el ingeniero aplica continuamente conocimientos y métodos científicos, no es esto lo que más vale de su labor. Tampoco procesar matemáticamente las estimaciones numéricas de la probabilidad es lo más valioso de lo que hace, aunque sea complejo y arduo, pues esto no es sino un medio para hacer utilizable la información que el juicio requiere para decidir. Lo más importante del trabajo del ingeniero es entender, estimar y procesar la incertidumbre de las variables que maneja para diagnosticar y diseñar; esto es, contender con lo incierto sin paralizarse ni renunciar a la racionalidad. Ésa es la obligación insoslayable impuesta por los fenómenos y variables que maneja,

tanto sociales como del mundo físico, unos y otras de naturaleza intrínsecamente incierta.

El cumplimiento de esta obligación depende críticamente de una facultad de tipo diferente de la científica: la capacidad de discernir, entre un cúmulo de vagas evidencias y otro de inciertas relaciones causa-efecto, cómo lograr un diagnóstico y un diseño conceptual atinados, y luego un diseño detallado a la vez razonable y robusto (empero, falibles todos ellos, sin importar el cúmulo de conocimiento y herramientas científicas que se ponga en juego). Es muy grande la presión psicológica y social que esta obligación implica; de aquí que, a veces inconscientemente, el propio ingeniero suela subrayar lo laborioso y complejo de su trabajo científico para descargar un poco a los ojos de los demás la responsabilidad derivada de cumplir la obligación inevitable de ejercer su juicio.

Entre todos los recursos que el ingeniero pone en juego para realizar su función, el juicio es el único imprescindible; ni si quiera la ciencia tiene este carácter, pese a su importancia como proveedora de conocimiento rigurosamente validado. Para confirmar esto basta recordar los numerosos casos en que, por no existir el conocimiento científico pertinente, ingenieros de ingenio han resuelto grandes problemas prácticos avanzando por delante de la ciencia, y al hacerlo han dado no sólo temas para que la ciencia investigue, sino también pistas a seguir en el descubrimiento de las leyes del universo. Un ejemplo notable de ello es la máquina de vapor, cuyas versiones iniciales fueron empíricamente diseñadas, una en 1712 por Thomas Newcomen y otras conceptualmente diferentes y mejores por James Watt entre 1755 y 1765. Estos desarrollos, cuya rápida difusión produjeron a partir de 1770 nada menos que la Revolución industrial, motivaron los primeros planteamientos de la termodinámica por Sadi Carnot (1824). Así, los diseños de Newcomen se adelantaron más de un siglo al conocimiento científico de los ciclos termodinámicos, y un lapso aún mayor al planteamiento de la termodinámica como disciplina científica por R. J. E. Clausius en 1865.

Apenas después de esta última fecha la ciencia pudo explicar el funcionamiento de aquellas máquinas y, desde entonces, la termodinámica ha sido la base para el diseño de motores y turbinas impulsados por vapor o por gases calientes, que hoy hacen posible desde la moderna aviación hasta la generación de electricidad.<sup>15</sup>

Los puentes de armadura constituyeron otro caso en que la ingeniería encaró problemas de diseño para los que la ciencia no tenía conocimiento que ofrecer. La construcción de tales puentes con base en el juicio profesional de sus diseñadores, a mediados del siglo xix, dio lugar a que se crearan nuevas disciplinas científicas. Cientos de ellos se tuvieron que construir empíricamente y con altos costos durante varios decenios a partir de 1830, hasta que esto indujo el desarrollo de la mecánica estructural y la ciencia de materiales (del hierro y el acero en este caso) que luego conjuntamente cambiaron para siempre el diseño tanto de puentes como de toda la gama de estructuras reticulares que usa la ingeniería civil.<sup>16</sup>

---

<sup>15</sup> 6 K. J Laidier, *Energy and the Unexpected*, Oxford University Press, Oxford, Gran Bretaña, 2002, 146 pp.

<sup>16</sup> D. C. Jackson, "Railroads, truss bridges, and the rise of the civil engineer", *Civil Engineering*, edición especial sobre la historia de la ingeniería civil, Asca, Nueva York, 1976-1977, pp. 37-41.



Otro ejemplo de cómo la ingeniería ha resuelto problemas prácticos con anticipación de siglos al conocimiento científico es la construcción de grandes bóvedas y muros de contención, hecha con reglas empíricas desde antes del Imperio romano hasta 1773, cuando Coulomb desarrolló métodos para acotar el valor posible del empuje horizontal de arcos y medios pulverulentos.<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> 8C. A. Coulomb. “Ensayo sobre una aplicación de las reglas de máximos y mínimos a algunos problemas de estática relativos a la arquitectura”, memoria presentada ante la Real Academia de Ciencias, vol. 7, París, 1776.

Si bien los anteriores son casos extremos de independencia de la ingeniería con respecto a la ciencia, el hecho general es que esta última raramente tiene disponible la totalidad del conocimiento necesario para que la ingeniería emprenda un proyecto, sea éste cual sea; por tanto, el ingeniero tiene que apoyar- se al menos parcialmente en conocimientos que distan de estar demostrados científicamente, y esto exige un bien desarrollado juicio profesional, único recurso verdaderamente insustituible en la ingeniería.

## **5. DESARROLLO DEL JUICIO PROFESIONAL**

Procede preguntarnos cómo se adquiere y afina el buen juicio profesional, pues la respuesta puede ser la clave para acabar de entender su naturaleza. La cuestión también es trascendente por sus implicaciones en los métodos para la formación de los ingenieros, tanto en la escuela como en la práctica. Un indicio al respecto aparece en una observación de Nietzsche sobre la manera en que ciertos personajes geniales desarrollaron sus capacidades sobresalientes: “No nos apresuremos a hablar de dones y talentos innatos! Pocos hombres de reconocida gran maestría fueron especialmente dotados; más bien adquirieron su grandeza y devinieron geniales ejerciendo capacidades cuyas limitaciones iniciales ya nadie suele recordar. Todos ellos tuvieron la diligente seriedad de un buen artesano, y antes de atreverse a hacer una gran obra aprendieron a construir apropiadamente las partes”.<sup>18</sup>

No es sostenible que el buen juicio profesional sea una capacidad extrarracional, pero es comprensible que a los ojos de muchos lo parezca, pues es evidente que no todos los ingenieros tienen buen juicio o llegan a desarrollarlo suficientemente, y algunos de quienes lo poseen en alto grado suelen ejercerlo de manera tácita; es decir, sin explicar sus procesos y hasta sin estar plenamente conscientes de los mismos.

Con base en evidencia empírica puede afirmarse que el buen juicio profesional del ingeniero es un atributo intelectual cualitativamente diferente de la erudición, el entrenamiento científico, la destreza deductiva y la habilidad matemática o lógica, aunque guarda con todo esto una conexión muy estrecha. A reserva de explicarlo, puede postularse que el buen juicio no sólo es distinto de esas otras capacidades, sino que es un atributo de orden superior derivado de ellas: una especie de destilado que lentamente va surgiendo conforme se ejercen todas las otras capacidades intelectuales requeridas por la ingeniería. Por tanto, las capacidades conocimientos primero enumerados, y su uso práctico, son condición necesaria para que ulteriormente pueda desarrollarse el buen juicio. Si esto es así, la meta a alcanzar durante la parte escolarizada de la formación de ingenieros debe ser que los educandos adquieran un acervo suficiente de conocimientos científicos pertinentes, además de destreza deductiva y habilidad lógica, para que al graduarse estén en condiciones de ejercer, con la guía y supervisión de ingenieros experimentados, las funciones de la profesión con el rigor necesario para ser eficaces integrantes de un equipo de trabajo profesional. Se ha comprobado que jugar durante cierto tiempo este papel subordinado pero activo en el seno de un equipo de ingenieros va dando en seguida oportunidad de desarrollar el buen juicio profesional. Entonces el quid divinum (inspiración propia del genio, según la expresión

---

<sup>18</sup> Nietzsche, Humano, demasiado humano, I, 163, 1886.

clásica) no es tal, sino una educada capacidad que algunos individuos han desarrollado paciente mente a partir del ejercicio riguroso de su profesión, como apunta Nietzsche. La moderna psicología experimental tiende a probar esa noción, pues ha encontrado que el buen juicio suele afinarse con la práctica profesional cuando ésta ocurre de cierta manera que asegure la realimentación; es decir, la posibilidad de comparar estimaciones teóricas a fin de contrastar sus resultados contra los de observaciones o mediciones.<sup>19</sup>

También se sabe que el desarrollo del buen juicio ingenieril mejora si la experiencia práctica abarca una gama de problemas de amplitud suficiente para a) dar sensibilidad sobre el límite de validez de hipótesis, teorías y modelos en campos diversos pero relacionados; b) revelar analogías entre campos diversos, y c) integrar progresivamente una suerte de mapa o catálogo mental de todo ello que con el tiempo pueda irse enriqueciendo con las experiencias del propio profesional.

Puede concluirse que la práctica de la ingeniería es condición necesaria para el desarrollo del juicio profesional de un ingeniero, pero no es suficiente. Se requiere además que esa práctica incluya expresamente los procesos de realimentación que resultan de hacer predicciones teóricas y compararlas con la realidad; solamente así se produce aquel destilado de sensibilidad que llamamos juicio. Debe ser, pues, una práctica basada sistemáticamente en predecir el comportamiento de los proyectos de ingeniería, luego observarlo (medirlo) durante la vida útil de los productos terminados, y finalmente cerrar el ciclo comparando predicciones con observaciones. Esto permite, en el ámbito incierto de la realidad y a plena escala, calibrar el grado de aproximación con el que las diversas teorías y métodos de análisis predicen el comportamiento de lo que el ingeniero diseña; la importancia de este ciclo cerrado de predicción-observación-comparación radica en que constituye una evaluación a la vez integral y sintética de toda la cadena de métodos, hipótesis y decisiones que el ingeniero adopta durante el diseño. Los hallazgos más recientes de la psicología experimental constituyen una confirmación científica de la genial anticipación de Nietzsche<sup>20</sup> acerca de que la maestría en cualquier campo tiene su origen en una diligente laboriosidad y no en dones innatos: hoy los estudiosos del juicio experto coinciden en que “estructurar tales capacidades en la mente requiere un enorme esfuerzo, incluso en los casos de niños prodigio como Gauss en matemáticas, Mozart en música y Bobby Fischer en ajedrez, cuyas respectivas ventajas consistieron más bien en haber comenzado ese esfuerzo más temprano y haberlo emprendido con más empeño que otros..<sup>21</sup>

Es imperativo, pues desde sus comienzos profesionales el ingeniero use una y otra vez teorías que le permitan predecir cómo se comportará lo que diseña, y luego observe y mida el comportamiento para compararlo con su predicción teórica. Sin ello, por inercia se tendería a aceptar a pie juntillas que las teorías tienen capacidad de predicción perfecta, olvidando que éstas se apoyan en supuestos simplificadorios que nunca se cumplen cabalmente. Hacer la comparación indicada es la única manera de poner en

---

<sup>19</sup> K. A. Ericsson y J. Smith, “Prospects and limits of the empirical study of expertise. An introduction”, en K. A. Ericsson y J. Smith (eds.), op. cit., 1991, PP. 1-38.

<sup>20</sup> “Nietzsche, Humano, demasiado humano, op. cit.

<sup>21</sup> 12 P. E. Ross, “The expert mind”, Scientific American, vol. 295, núm 2, agosto de 2006, pp. 46-53.

evidencia el grado en que cada teoría puede predecir lo que ocurre en la realidad. Ir incorporando a la sensibilidad personal, una a una, numerosas comparaciones de semejante tipo es lo que produce el destilado de saber profesional que denominamos juicio experto, el más valioso atributo de un buen ingeniero.

Puede aspirar a poseer este atributo sólo quien se toma el tiempo necesario para realizar sistemáticamente el ejercicio intelectual indicado. El Premio Nobel Herbert A. Simon, estudioso de este tema, acuñó la llamada “regla de los diez años”, según la cual adquirir gran maestría en cualquier campo toma alrededor de una década de intenso trabajo profesional; pero lo que cuenta no son en sí mismos los años, sino el “estudio esforzado” durante ellos (en el caso de la ingeniería, el ejercicio de predecir, medir y comparar el comportamiento de lo que se diseña) para “mantener la mente abierta a juzgar, criticar y mejorar [dichas predicciones] y así acercarse a los estándares de los líderes en cada campo”.<sup>22</sup> Sin las evidencias contundentes que sobre el margen de error de cada teoría aporta el predecir, medir y comparar, se extravía el juicio, pues no hay otra manera de allegarse indicios cuantitativos sobre la imperfección de las teorías. Muchas fallas de la ingeniería y otras profesiones se deben a que las teorías contenidas en los libros de texto se consideran leyes de cumplimiento cabal y obligatorio en todos los casos prácticos.

Aunque el desarrollo del juicio profesional mediante el hábito de comparar predicciones con observaciones es una tarea personal de cada ingeniero, la experiencia ajena puede ser también beneficiosa, siempre que esté cuidadosamente documentada; esto explica por qué la publicación de casos históricos en los que se describen de modo fidedigno y detallado predicciones, mediciones y comparaciones es tan apreciada por el gremio de los ingenieros.

Cabe referirse aquí a otros dos tipos de problemas ingenieriles en los que el predecir, medir y comparar es crucial. Cuando se quiere asegurar que un proyecto de ingeniería es compatible con el concepto de desarrollo sostenible, las incertidumbres asociadas a la interacción del proyecto con la sociedad y con el medio ambiente son críticas e irreductibles; suele adoptarse entonces una estrategia de diseño y rediseño continuos, denominada diseño evolutivo, que mediante seguimiento y evaluación periódica del proyecto permite detectar las desviaciones indeseables y hacer las correcciones pertinentes.<sup>23</sup> Más antigua que el diseño evolutivo es otra estrategia similar para contender con incertidumbres extremas debidas a factores geológicos y geotécnicos; se diseña en estos casos de manera que podríamos llamar tentativa, para luego, conforme se construye, ir modificando o afinando progresivamente el propio diseño con base en nuevas evidencias y en la observación de su comportamiento; este modo de proceder ha sido llamado método observacional.<sup>24</sup> Ambas estrategias tienen la virtud de contribuir no sólo al control de la incertidumbre, sino al desarrollo del juicio profesional.

---

<sup>22</sup> Idem.

<sup>23</sup> Véanse las secciones VIII.7 y VIII.9 del libro.

<sup>24</sup> R. B. Peck, “Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics” *Geotechnique*, Londres, vol. 19, núm. 2, 1969, pp. 171-187.

La acumulación de una experiencia variada, si ésta se organiza a partir de observar y comparar el comportamiento de las obras de ingeniería con las predicciones del propio ingeniero, va decantando en la mente del profesional cierta sensibilidad, que se afina progresivamente conforme su poseedor la aplica en subsecuentes proyectos. Tal decantado es lo que llamamos juicio profesional o juicio experto, cuya racionalización y codificación son tan difíciles que, como hemos visto, han sido consideradas por lo general imposibles. Hay, sin embargo, barruntos y expectativas de que al menos en algunos casos esa dificultad pueda superarse. De hecho, ya se pueden crear los llamados sistemas expertos, que son símiles computarizados, sencillos y limitados pero útiles, que simulan el proceso de acumulación del juicio profesional. Tales sistemas expertos todavía no se aproximan al grado de sofisticación y tino de que es capaz la mente de un ingeniero experto (y es probable que nunca lo hagan suficientemente) pero demuestran que la capacidad de juicio es, en efecto, fruto de un repetido esfuerzo racional y no un don de la naturaleza. Prueba adicional de ello es el hecho de que en algunos ingenieros el juicio profesional se afina mediante la práctica creciente, mientras que en otros casos un ejercicio profesional más prolongado no mejora esa capacidad. Por eso la calidad de un profesional no está dada simplemente por sus años de experiencia, ni su buen juicio depende sólo de lo prolongado de su práctica profesional, sino que influye decisivamente el modo en que ésta se ejerce: solamente la práctica que produce realimentación sobre la capacidad de predicción cuantitativa es útil para desarrollar el juicio.

Establecido lo anterior, poco más hace falta para reconocer que, a fin de estar en aptitud de adquirir buen juicio profesional, las condiciones necesarias y suficientes son:

1. Tener el conocimiento científico de los fenómenos naturales con los que se lidia en el campo de la ingeniería de que se trate.
2. Dominar la lógica de los procesos de deducción, inducción y abducción implícitos en el diagnóstico y el diseño.
3. Aplicar este conjunto de conocimientos y métodos a la predicción rigurosa y detallada del comportamiento de lo que se diseña.
4. Observar y medir el comportamiento de lo diseñado.
5. Comparar las predicciones con las mediciones.

Los párrafos anteriores justifican el dicho de algunos de los mejores ingenieros: quien toma en serio el hacer ingeniería se convierte en un permanente aprendiz, pues el aprendizaje de la práctica es un proceso infinito de mejoramiento del juicio que, sin embargo, no nos hace infalibles. Por cierto, aun después de desarrollar al máximo el juicio profesional, seguirá siendo peligroso saltar a conclusiones sin análisis y cálculo previos, pues desde hace mucho tiempo se sabe que los sistemas socio-técnicos de carácter dinámico, como los que trata la ingeniería, suelen exhibir comportamientos que contradicen la intuición.<sup>25</sup>

## **6. EL TRABAJO EN EQUIPO**

Cualquiera que sea su magnitud, todo proyecto que implique un diagnóstico y un diseño exige que el ingeniero responsable realice, como

---

<sup>25</sup> 16 J• w Forrester (1958), "Industrial dynamics. A major breakthrough for decision makers", Harvard Business Review, Cambridge, Mass., vol. 36, núm. 4, pp. 37-66.

queda dicho, los procesos intelectuales propios de tales actividades, y que en cada uno de ellos ejerza su juicio profesional conforme se requiera. Por otra parte, pocos son los proyectos que pueden ser llevados a cabo completamente por un ingeniero solo (quizá aquí reside una diferencia sustancial entre la ingeniería y la medicina, pues en esta última son abundantes los problemas que suelen ser tratados por un profesional individualmente, con tan sólo el apoyo de especialistas en diversas técnicas de exploración diagnóstica). En ingeniería cualquier proyecto de envergadura mediana o mayor es imposible como obra individual; se requiere casi siempre un equipo de trabajo constituido por numerosos ingenieros. Es usual que varios de los integrantes de un equipo sean profesionales experimentados y con juicio bien desarrollado; uno de ellos será responsable del proyecto y jugará el papel de *primus inter pares* (primero entre iguales). Más rigurosamente dicho, el jefe de proyecto será “primero entre iguales y desiguales” pues todo equipo de trabajo en ingeniería incluye, además de ingenieros maduros y con juicio bien formado, otros en etapas diversas, incluso muy tempranas, de su desarrollo profesional. El jefe de proyecto tiene obligación de abarcar todas las actividades del equipo y responder de ellas en todas sus facetas; incluso debe cuidar de que, como consecuencia del proceso, avance la formación de sus colaboradores, de modo que todos, y principalmente los más jóvenes, sean mejores ingenieros al término de cada proyecto. A él corresponde también tomar las decisiones cruciales; es decir, las que se basan en el juicio experto, y luego responder de ello ante el cliente y la sociedad. Por mi buena fortuna, uno de mis maestros en la práctica de la ingeniería fue Fernando Hiriart, el mejor jefe de proyecto que he conocido, tanto por la eficacia que tenían los equipos de trabajo que él encabezaba como por la tersura con que lograba que funcionaran. Algunas de las reglas que al respecto aprendí de sus lecciones tácitas se pueden expresar como sigue, y seguramente pueden extrapolarse a actividades distintas de la ingeniería:

1. Cada colaborador despliega su capacidad en la medida en que el jefe está dispuesto a mantener bajo perfil en todo, salvo en asumir responsabilidad.

2. Todo problema tiene más de una solución, pero ninguna es buena si no se puede demostrar que lo es.

3. Dentro del equipo de trabajo el único apoyo que del jefe requieren las buenas propuestas es que no las obstaculice; si las apoya muy activamente, alguien puede suponer que él las inspiró, y eso resta mérito a sus autores.

4. El jefe no debe revisar todo lo que hacen los demás, sino sólo dos conjuntos de cosas: las que a su juicio son cruciales y las que él no entiende a primera vista; en cambio, siempre debe dar a revisar lo que él hace, pues todo ser humano necesita supervisión.

Los integrantes del equipo de trabajo colaboran en todos los aspectos sustantivos, pues si bien hay asignación de responsabilidades individuales, no existe división del trabajo en sentido estricto. Cada ingeniero realiza tareas específicas determinadas por su experiencia; pero todos los resultados se discuten luego colectivamente. Por ejemplo, en un proyecto

de ingeniería civil, los integrantes del equipo reúnen, validan y depuran en campo y gabinete la información necesaria para el diagnóstico y luego para el diseño; discuten entre sí los resultados de tales acciones; someten a prueba ciertas hipótesis propias o sugeridas por el jefe acerca de posibles relaciones causa-efecto; hacen análisis y deducciones cualitativas y cuantitativas; repasan mentalmente evidencias y conceptos del proyecto; regresan al campo repetidamente conforme avanza el diagnóstico, el diseño y la construcción para validar, ampliar y reevaluar la información acumulada; limpian el comportamiento de diseños alternativos mediante modelos teóricos y experimentales diversos; conciben la manea de medir durante la construcción y operación de la obra cifras variables del comportamiento para compararlas con la estimación de las mismas (tarea cuya trascendencia ya hemos enfatizado); discuten colegiadamente sus hallazgos y conjeturas; descartan algunos de los resultados que van obteniendo a la vez que afinan otros bajo la guía y supervisión del ingeniero responsable, y así sucesivamente hasta que este último estima, en la primera etapa del proyecto, que el diagnóstico es satisfactorio, y en la segunda, que el diseño se ha optimizado. Los miembros más jóvenes, a la vez que desempeñan el papel personal que se les ha asignado en el equipo de trabajo, se ejercitan en desarrollar su juicio profesional propio.

Así, aunque no todos los integrantes de un equipo tienen la misma responsabilidad, cada uno está efectivamente expuesto a la experiencia profesional completa que el proyecto en cuestión aporta. Este modo de compartir colectiva e integralmente la experiencia agrega valor al trabajo de un equipo de ingenieros en al menos tres aspectos: a) en el educativo, pues permite que todos los participantes aumenten sus conocimientos y capacidades tanto en las cuestiones que cada quien atiende como en las que tocan a los demás; b) en la calidad del trabajo, pues la diversidad de los puntos de vista y opiniones que se confrontan pone a prueba y robustece los juicios de quien funge como jefe del proyecto, a la vez que enriquece el criterio de los demás, y c) mantiene la posibilidad y da la flexibilidad necesarias para que se despliegue la creatividad individual, que finalmente es la fuente de las mejores soluciones a cualquier problema.

No obstante la alta efectividad educativa de este modo de trabajar, no todo ingeniero acaba poseyendo los más altos niveles de juicio profesional, pues para lograrlo no basta la oportunidad, ni son suficientes la dedicación y el deseo. Las evidencias muestran que es necesario, además, un ánimo singular, que se manifiesta en un disfrute del ejercicio profesional en todas sus facetas y en un estado de alerta permanente que permite absorber con plenitud las lecciones derivadas de cada caso. Es cierto que los jefes de proyecto que a la vez son grandes maestros propician en sus colaboradores jóvenes ese tránsito feliz de la subordinación inteligente a la madurez y el liderazgo; pero también es verdad que, a partir de cierto nivel de experiencia subordinada, un ingeniero puede culminar el desarrollo de su juicio profesional con más rapidez y profundidad imponiéndose a sí mismo ciertas normas exigentes de práctica profesional, entre ellas la norma clave para aquel fin: habituarse a predecir sistemáticamente el comportamiento futuro de sus proyectos y luego observarlo y medirlo en el prototipo, pues la comparación de predicciones y mediciones es el único medio eficaz para acumular buen juicio.

Es pertinente hacer una reflexión final sobre el juicio profesional. El conocimiento en general, tanto científico como empírico, por estar codificado, se preserva sin gran dificultad y se propaga de generación en generación mediante el estudio. Incluso si durante muchas generaciones nadie se interesara en aprender el conocimiento acumulado, su dominio por la especie humana podría renacer en cualquier momento recurriendo a los documentos u otros soportes físicos en los que dicho conocimiento está codificado. Por el contrario, el juicio profesional reside, por definición, en la mente de quienes lo poseen, y sólo en ella, pues no está codificado ni es codificable; cada vez que un *jifeskna1* fallece o se retira el juicio que había acumulado se pierde irremediabilmente. Sin embargo, el juicio profesional del ingeniero es un recurso renovable, aunque sólo en la medida en que las sucesivas generaciones de profesionales sepan qué es, cómo funciona, de dónde proviene, como se adquiere y refuerza, qué importancia tiene y, por tanto, quieran hacer lo que a cada quien corresponde para preservarlo y renovarlo. Esa regeneración del juicio profesional depende totalmente del trabajo en equipo.

## ***V. La razón no basta: otras capacidades del ingeniero***

### **1. LIMITACIONES DE LA RAZÓN**

Al analizar los procesos intelectuales de la ingeniería y las capacidades profesionales que demandan, en los tres capítulos anteriores hemos procedido como si la razón fuese la única facultad que interviniera en tales procesos. Esto no es sostenible, aunque tienda a coincidir con cierta noción estereotipada según la cual la ingeniería es una ciencia y el ingeniero una persona absolutamente racional.

Casi todos los filósofos han concordado en que la razón por sí sola no es capaz de producir ninguna acción ni de mover a realizarla; es el deseo y la voluntad lo que nos mueve a actuar. Además, nadie actúa de modo puramente racional; la propensión de nuestras facultades no racionales a intervenir en las decisiones que tomamos constituye la normalidad humana, no una desviación de ella. De aquí proviene la noción empíricamente demostrada de que en realidad el hombre no actúa en el marco de una



racionalidad absoluta, sino acotada; es decir, somos más o menos racionales o aproximadamente racionales. Por ejemplo, en escenarios inciertos las decisiones de la gente normalmente se desvían de la racionalidad de las siguientes maneras: ante un dilema en el que una opción implica una ganancia segura de 100 y otra ofrece ganancia de 300 con probabilidad de un tercio, quienes tienen aversión al riesgo prefieren la primera y quienes gustan de él optan por la segunda, pese a que en términos absolutamente racionales lo que ambas opciones ofrecen es idéntico, pues  $300 \times 1/3 = 100$ . Si en este mismo ejemplo el término ganancia se sustituye por pérdida, en un contexto puramente racional las dos opciones siguen siendo equivalentes, pero la mayoría de las personas normales sigue considerándolas distintas, aunque ahora una porción mucho mayor de ellas optará por la primera; esto denota que si el dilema se enuncia en términos negativos la aversión al riesgo es mucho más frecuente que si se formula en términos positivos. Finalmente, nuestra racionalidad también falla porque muchas decisiones se tienen que tomar en tiempo real, conforme la vida nos plantea las opciones, y por tanto no siempre podemos detenernos a sopesarlas racionalmente con el rigor y la parsimonia debidos; en tales casos las decisiones resultan muy influidas por el azar, por nuestra ideología o por cuestiones circunstanciales de las que incluso podemos no ser conscientes (por cierto, la mercadotecnia, tanto comercial como política, busca aprovechar tales debilidades, y por eso nos repite una y otra vez consignas simplistas o pone ante nuestro ojos imágenes que nos inducen subliminalmente a tomar las decisiones que a otros convienen).

Todo eso prueba que nuestra racionalidad es limitada incluso ante los problemas más simples, como los que sólo involucran al mundo físico. Pero la ingeniería trata también con la gente, y esto introduce de inmediato un grado mucho mayor de complejidad. Aunque el ingeniero pudiera ser siempre absolutamente racional, la razón no le bastaría para cumplir sus funciones; además de la razón, tiene que poner en juego otras facultades que no son específicas de la ingeniería, sino genéricas de la especie humana: en primer lugar, la empatía o capacidad de identificarse con los sentimientos de otras personas, a fin de evaluar y comprender las necesidades y preferencias de quienes reciben los beneficios o pagan los costos de los proyectos de ingeniería, y luego requerirá también de voluntad, laboriosidad, e imaginación. En efecto, las facultades psíquicas mediante las cuales una persona se aproxima al conocimiento de sus semejantes e interactúa con ellos no se reducen a la razón; también intervienen unas u otras de las indicadas facultades genéricas de la especie humana. Haciendo intervenir unas u otras de ellas ante cada situación específica, nos forjamos una noción del mundo, nos vemos motivados para actuar en él y podemos hacerlo eficazmente.<sup>26</sup>

En cierto tipo de asuntos la razón, aunque acotada, tendrá siempre la última palabra; en tales casos, tanto intuiciones como voliciones han de ser validadas por el raciocino y a veces incluso por la verificación experimental.

En cambio, en algunos terrenos sólo podremos admitir como principio de conocimiento la intuición, los sentimientos y la voluntad. “La cuantía imponderable de este principio del conocimiento se manifiesta con toda

---

<sup>26</sup> J Hansen (1925), Teoría del conocimiento, cap. 4, Editores Mexicanos Unidos, México, 2003.

claridad cuando se juzga la historia de la cultura humana”, dice Hansen.<sup>27</sup> Mediante estas potencias cognoscitivas no racionales es como, por ejemplo, percibimos y disfrutamos la belleza, o apreciamos a nuestros semejantes y somos capaces de actos de empatía que nos llevan a comprender sus sentimientos.

En otras instancias tenemos que depender casi absolutamente de la imaginación, como cuando postulamos una tentativa de diagnóstico o un diseño conceptual a ser validados por la teoría u otro tipo de conocimiento.

Finalmente, hay situaciones en las que requeriremos conjuntar la voluntad, la sensibilidad emotiva y la racionalidad, como cuando enfrentamos dilemas éticos.

Antes de explicar la manera en que las facultades extrarracionales intervienen en el trabajo de los ingenieros, es útil decir algo más sobre las circunstancias en las que la racionalidad misma es la facultad predominante.

## **2. EL TERRITORIO DE LA RAZÓN**

En dos aspectos de la ingeniería rige sólo la razón. Uno de ellos es la comprensión del mundo físico, que se logra mediante los métodos racionales de la ciencia, la práctica y la lógica. El otro consiste en asegurar la coherencia interna de los procesos intelectuales y las decisiones que de éstos se derivan. En este segundo aspecto la razón funciona como sigue: aunque los sentimientos y la voluntad influyan en algunas decisiones del ingeniero, éstas deben pasar finalmente la prueba de la racionalidad en cuanto a que a) las decisiones no se contradigan entre sí (principio de no contradicción), y b) cada una de ellas esté plenamente soportada por los razonamientos en que se basó (principio de razón suficiente).

Los principios de no contradicción y de razón suficiente son axiomas o verdades obvias. En efecto, por un lado, dos proposiciones contradictorias no pueden ser simultáneamente verdaderas y, por otro, cada hecho tiene un porqué y éste debe ser suficiente para explicarlo. Basta satisfacer simultáneamente ambos principios para obrar racionalmente. Por cierto, ser racional no es una exigencia exclusiva de la ciencia y la ingeniería; se trata más bien de una virtud generalmente apreciada en nuestra cultura, y que buscamos ejercer en la mayor parte de lo que hacemos, pues todos aspiramos a comportarnos sin contradicciones y admiramos a quienes lo consiguen. Y aunque no siempre parezca así, la racionalidad es el valor fundamental de la llamada Era Moderna, que va del Renacimiento a nuestros días. La adopción primera de la razón como valor supremo de una sociedad se remonta a la Grecia clásica, y su posterior abandono duró gran parte de la Edad Media. Por eso se llama Renacimiento al rescate de la razón como valor central de la sociedad, talante con que nació la Era Moderna. Ahora bien, aun siendo la racionalidad el valor principal de nuestra era, se reconoce que no estamos obligados a ser continuamente racionales; ser conscientes de ello constituye otra invaluable herencia griega: somos *Homo sapiens* pero también *Homo ludens* e incluso *Homo demens*, por lo que nos eximimos de ser racionales (es decir, nos permitimos ser contradictorios y prescindimos de tener un porqué suficiente) cuando

---

<sup>27</sup> Idem

jugamos, cuando amamos y cuando soñamos (en el sentido literal y en el figurado de forjarnos ilusiones, con tal de que en este último caso no pretendamos hacerlas realidad sin someterlas a la crítica de la razón).

Instrumentos principales de la racionalidad son los lenguajes de todo tipo. La ingeniería usa principalmente tres: el geométrico, el matemático y la lengua ordinaria de la sociedad en que cada ingeniero actúa. Los dos primeros son parte de las capacidades especializadas de la ingeniería y otras profesiones; el tercero lo compartimos con el resto de la sociedad y es, para todos, a la vez instrumento y producto de la razón: el logos griego, que denota lo mismo palabra que razonamiento o argumentación.

El lenguaje de la geometría es particularmente poderoso para discurrir relaciones espaciales; el de las matemáticas, mucho más incisivo y eficaz para razonar sobre cuestiones cuantitativas; pero ninguno tiene mayor plasticidad y alcance, y por tanto más poder como instrumento para pensar congruentemente sobre cualquier tema, que el lenguaje ordinario; con él la humanidad ha forjado no solamente todos los productos del entendimiento, sino que también ha logrado expresar los del sentimiento y la imaginación, según consta en la literatura de todas las lenguas. A propósito del lenguaje ordinario como instrumento de la racionalidad, un preclaro español de la Ilustración dejó escrito hace dos siglos lo siguiente: "Como el hombre para pensar necesita de una colección de signos que determinen y ordenen las diferentes ideas de que sus pensamientos se componen, la lengua ha venido a ser para él un verdadero instrumento analítico, y el arte de pensar ha coincidido de tal manera con el arte de hablar que vienen ya a ser virtualmente lo mismo".<sup>28</sup> Por eso es tan obvio que el primer atributo necesario para ejercer una profesión como la ingeniería, que se exige a sí misma racionalidad, es el manejo apropiado del lenguaje con el que todos pensamos: el idioma materno.

### **3. PAPEL DE LA IMAGINACIÓN**

La imaginación es ingrediente sine qua non de la formulación de hipótesis y éstas son el meollo del acto creativo, tanto en el método experimental como en otras formas de inferencia. La imaginación es por ello una colaboradora indispensable de la razón, lo mismo en la ciencia (en el proceso de generar nuevo conocimiento científico) que en la ingeniería (al inferir que cierto conocimiento es aplicable a un problema particular o que un diseño conceptual es capaz de resolver el problema planteado).

Por otra parte, la imaginación resulta peligrosa enemiga de la propia razón cuando se desboca y nos aparta de la verdad objetivamente comprobable; es decir, cuando nos lleva de lo real a lo puramente imaginario, a lo carente de fundamento o de sentido lógico.

La imaginación es la facultad mental que permite la producción de imágenes y su combinación; pero las imágenes que con ella producimos son construcciones mentales que ocurren en el interior de nosotros mismos cuando los objetos a los que nos referimos no están a nuestro alcance; por tanto, las imágenes que nuestra imaginación crea pueden coincidir con la realidad de los objetos que representan o pueden diferir de la misma. A

---

<sup>28</sup> M. G. de Jovellanos (1744-1811), "Memoria sobre educación pública Quinta Cuestión, Sección Primera: Estudio de las Ciencias Metódicas, en Obras escogidas, vol. II, Espasa-Calpe, Madrid, 1935.

diferencia de las imágenes-con-objeto o imágenes objetivas, que percibimos mediante los sentidos cuando tenemos delante el objeto, las imágenes-sin-objeto, que produce la imaginación pura, son actos, no cosas.

La imaginación constituye uno de los recursos de la conciencia cuando quiere razonar sobre un objeto y no dispone de la presencia del mismo. En esto radica su poder y su utilidad, a la vez que su peligro: la imaginación nos ofrece una salida para llegar a lo real cuando estamos privados de observarlo, pero también puede apartarnos de esa realidad; es por tanto un recurso a la vezpreciado y peligroso. Por eso su valoración es ambigua: suele criticarse la falta de imaginación de los ingenieros que no supieron prever la eventualidad que hizo fallar alguna de sus creaciones (un puente, un prototipo de avión o de nave espacial, etc.); pero también se critica la imaginación desbordada de quienes se forjan imágenes mentales muy precisas de condiciones que no se materializaron y a causa de lo cual ciertos proyectos no cumplieron bien su función.

Argumentos idénticamente válidos pueden darse en pro de la imaginación (cuando ésta atina) que en contra de la misma (cuando yerra). La imaginación es a veces la facultad creadora por excelencia (si se le mira al formular una inspirada hipótesis sobre lo desconocido, que luego la experiencia confirma); pero en otras ocasiones (cuando se observan los desatinos a que da lugar si se equivoca) es, según Pascal, “la loca de la casa”, una forjadora de quimeras de la que hay que desconfiar, “tanto más engañosa cuanto sabemos que no siempre miente, pues sería una regla infalible de verdad si siempre fuera una regla infalible de mentira”.<sup>29</sup>

---

<sup>29</sup> B. Pascal, Pensées, 82, 1670.

Así pues, la imaginación puede ser instrumento y artífice del error; por tanto, estamos obligados a temerla, someterla a control y educarla. Pero suele ser también creadora de valor, lo que nos impone la necesidad de recurrir a ella continuamente. En ingeniería se le usa a) cada vez que se hace un diagnóstico, para postular explicaciones tentativas de los problemas que se observan, explicaciones que luego habrán de someterse a confirmación; b) durante el diseño, al proponer una solución conceptual del problema, que después debe validarse deductivamente, y c) cada vez que han de preverse (verse anticipadamente) las condiciones futuras a que estará sometido el diseño y, como consecuencia de ellas, los diversos modos probables de comportamiento de tal diseño, a fin cuidar su eficacia y seguridad. Sin estas varias previsiones no se podrían llevar a cabo el diagnóstico ni el diseño.

La manera en que interviene la imaginación al pasar, como en el diagnóstico, de la observación u obtención de datos a la interpretación de los mismos, no difiere de la forma en que lo hace en el método experimental, que constituye el proceso de la investigación científica. Más aún, del mismo modo participa la imaginación en todos los procesos de razonamiento que conducen de cierto estado de conocimiento a uno superior; por ejemplo a) en el paso de los datos a su interpretación; es decir, en la inferencia de situaciones a partir de datos; b) en el tránsito de la interpretación a la tentativa de diagnóstico, y c) en todo lo que va del diagnóstico al diseño conceptual; esto es, a la propuesta tentativa de solución de un problema. Estas tres transiciones constituyen los procesos intelectuales básicos de la ingeniería, como se expuso en los capítulos III y IV.

Dado que la imaginación puede lo mismo errar que atinar y es indispensable en la concepción de hipótesis o supuestos, podemos concluir que estos actos de concepción constituyen los pasos con máxima probabilidad de error en los procesos intelectuales de la ciencia y la ingeniería. Por eso tanto las hipótesis como los diseños deben ser validados; es decir, ni hipótesis ni diseño son puntos terminales de un proceso, sino principios del mismo.

#### **4. PAPEL DE LA LABORIOSIDAD**

Es debatible cuándo y cómo empezó a predominar en la historia la propensión del hombre al trabajo, pero no que tal transición efectivamente ocurrió: “La indolencia cesa a la vez que cede la valentía salvaje; en su lugar aparece la actividad industriosa [...]; el principio de laboriosidad implica lo opuesto a vivir sólo de lo que da la naturaleza [...] El atributo requerido es entonces la inteligencia, y el ingenio se torna más útil que el mero arrojo”.<sup>30</sup>

La laboriosidad no es un ingrediente exclusivo de la ingeniería, pues interviene en casi todas las formas de actividad física e intelectual de los seres humanos; sin embargo, en su sentido de actividad industriosa, es la definición misma de ingeniería, y condición necesaria, aunque no suficiente, de los logros de ésta. Basta recordar los múltiples pasos de ida y vuelta que caracterizan los procesos del diagnóstico, el diseño, la adquisición de buen

---

<sup>30</sup> G. W E Hegel, *Filosofía de la historia*, I, III, 3, en *Great Books of the Western World*, Encyclopedia Britannica, vol. 46, Chicago, 1942.

juicio y el trabajo en equipo para percatarse de que la laboriosidad es no sólo el origen de la ingeniería, sino una de sus máximas expresiones.

Por eso mismo, hoy la laboriosidad suele considerarse una virtud y sigue dando ventajas a quienes la despliegan. Desde el advenimiento de la modernidad, en los cánones occidentales el trabajo es un modo de afirmación de la dignidad humana, por cuanto permite a cada individuo forjarse el destino de su elección, y a la colectividad liberarse de las limitaciones y amenazas que sufriría si se conformara con los medios de vida que la naturaleza da espontáneamente. Además, al inducirnos a superar con esfuerzo las limitaciones del entorno natural, el trabajo contribuye al conocimiento que la ingeniería requiere; esto es, a la comprensión práctica de la realidad.

## 5. VOLUNTAD Y AFECTO COMO CAPACIDADES PROFESIONALES

Hemos dicho que la ingeniería tiene obligación de maximizar la utilidad social de cada proyecto. Si de veras ha de cumplirse ese designio, estimar aunque sea burdamente dicha utilidad para distintos individuos y grupos sociales exige poner en juego diversas facultades además de la razón, pues ésta no puede dar todos los elementos de la realidad; a ello se refiere Leonardo cuando dice: “Toda cognición principia en los sentimientos”.<sup>31</sup>

Después de él, Pascal abunda en el tópico: “Conocemos la verdad no sólo mediante la razón, sino también con el corazón, y es por él que llegamos a conocer los principios más básicos”.<sup>32</sup> Entonces, es indispensable que el ingeniero despliegue sus propios sentimientos para estimar cómo sus decisiones pueden afectar a los demás, poniéndose en el lugar de éstos. El querer y poder hacerlo se llama capacidad de empatía (identificación mental y afectiva de un sujeto con el estado de ánimo de otro) y es una de las formas de la capacidad afectiva, facultad de la que dependen los vínculos de todo tipo con nuestros congéneres: la relación que nos une y compromete emotivamente con ciertas personas; el amor a nuestra familia, el interés emotivo por nuestra comunidad o nuestra patria; el afecto que nos liga a grupos que comparten nuestra cultura o nuestras preferencias estéticas o ideológicas, e incluso la afinidad con ciertas maneras de concebir y vivir la belleza, la libertad y la vida misma.

Platón atribuye a Sócrates las siguientes palabras con las que pondera ante dos jóvenes la necesidad, importancia y valor que para los humanos tienen las variadas formas de esa relación emotiva llamada amor o amistad, aunque no pueda explicarse a plenitud su naturaleza:<sup>33</sup>

*los sabios han dicho que es de toda necesidad que lo semejante ame a lo semejante [...]*

*[...] y con la misma abundancia de razones se dice que todo ser desea no a quien se le parece, sino al que es opuesto a su naturaleza.*

*[...] pero jamás podría desearse, amarse ni buscarse a otro si no se encontrase en él alguna conveniencia [...]*

*[Aunque] quizás nos hemos puesto en ridículo [...] pues los que han presenciado nuestra conversación dirán que siendo amigos no hemos logrado dilucidar qué es la amistad.*

---

<sup>31</sup> L. da Vinci (1452-1519), “Pensamientos” en Escritos literarios, traducción de Guillermo Fernández, Instituto Mexiquense de Cultura, México, 2003, p. 83.

<sup>32</sup> B. Pascal, Pensées, 282, 1670.

<sup>33</sup> Platón (siglo iv a.C.), “Lysis o de la amistad” Diálogos, 214-223.

Por lo dicho, las capacidades especializadas no son suficientes para ejercer una profesión como la ingeniería. Se requieren también capacidad de afecto y compromiso hacia ciertas personas o grupos; empatía hacia todos los demás; fidelidad a las ideas e intereses que compartimos y, finalmente, respeto a cada ser humano, independientemente de las diferencias que nos separen de él. Como se discute en el capítulo x, este último imperativo moral proviene de que todos tenemos una idéntica dignidad original según el famoso alegato renacentista inspirado por la filosofía de la Grecia clásica: la dignidad de la persona humana reside en el hecho sencillo y evidente de que somos la única especie cuyos individuos pueden labrarse cada uno su propio destino, personalísimo y distinto del de sus congéneres, mediante el ejercicio de su libertad de elegir y su voluntad de enfrentar las consecuencias de su elección.

Al resolver un problema de ingeniería se ponen en juego no sólo habilidades especializadas, sino también capacidades afectivas genéricas. Antes de tomar sus decisiones profesionales, sea en el servicio público o en los negocios privados, el ingeniero debe, mediante su capacidad de empatía, identificarse transitoriamente con quienes van a ser afectados por dichas decisiones y esforzarse por entender los intereses y las conveniencias inmediatas y de largo plazo de las personas anónimas que constituyen los grupos sociales a quienes el proyecto que desarrolla busca servir. No está fuera de lugar en tales momentos pensar incluso en la patria, cuya noción unifica nuestros intereses personales más inmediatos con los de largo plazo de nuestros hijos, con las aspiraciones que nuestros ancestros pusieron en un proyecto histórico colectivo y con las esperanzas de quienes hoy lo comparten con nosotros. Por más que consideremos que nuestros intereses nacionales se asemejan a los de cualquier otra nacionalidad, nunca terminarán por coincidir del todo, pues unos y otros dependen de las historias respectivas de cada nación. Esto no contradice ni se opone a los designios de la globalización y la interdependencia, sino que los fundamenta; a la vez, incorpora el imperativo de reciprocidad que es inherente a ambas y que poderes diversos suelen atropellar. En efecto, del concepto de dignidad original del ser humano se desprende que los valores de cada quien son importantes por el solo hecho de ser suyos, y que por tanto no preservamos nuestra dignidad si prescindimos de nuestros valores personales, familiares, comunitarios, nacionales; recíprocamente, atropellamos la dignidad de otros si pretendemos imponerles los valores nuestros. El límite racional que debe imponerse al patriotismo y en general al aprecio de lo propio consiste en evitar el chovinismo (nacional, regional, institucional o de cualquier otro tipo). El chovinismo es desprecio de lo ajeno más que aprecio de lo nuestro; consiste en manipular los sentimientos de pertenencia, en sí mismos legítimos y necesarios, para validar un afán egoísta y discriminador: el interés de apropiarse, en un acto de alarde personal, de las creaciones, la historia, las virtudes, las instituciones y otros activos tangibles o intangibles pertenecientes a un patrimonio colectivo, a la vez que se niegan los valores de otros. En síntesis, para entender a los demás se necesita tomar conciencia de que son diferentes de nosotros en algunos aspectos, pero no en todos; es decir, se debe saber que cada ser humano tiene cierto conjunto de atributos que constituyen su identidad, y que ésta nunca es unidimensional, pues cada uno tenemos sentimientos de pertenencia diversos y de hecho nos identificamos sin contradicción con grupos muy variados, con cada uno de los cuales compartimos algo: en un caso



relaciones familiares, en otros ocupación, preferencias estéticas, convicción religiosa (o no religiosa), barrio de residencia, patria, ideología, etcétera.

Para poder responder ante la sociedad de sus decisiones como profesional, el ingeniero debe tener en consideración todo esto. La facultad de afecto no es, pues, un aditamento prescindible, sino algo inherente a lo humano, que si faltara afectaría radicalmente el desempeño de cualquier persona en todas sus funciones, incluso las profesionales. ¿Cómo podría un ingeniero cumplir la responsabilidad de maximizar para la sociedad la relación beneficio/costo de un proyecto si no es capaz de entender los intereses de quienes van a recibir los beneficios y pagar los costos? ¿Cómo se puede tener motivación para servir a otras personas si no se ama en primer lugar a las más cercanas? ¿Cómo servir a la sociedad si no se tiene la convicción de que las nociones de comunidad y de patria son prolongaciones inevitables de la idea de familia y, en última instancia, constituyen parte de nuestro ser y nuestra personal identidad? Porque sin capacidad de afecto no se puede respetar ni servir a nadie, ni a sí mismo, tal capacidad y su consecuencia lógica, la identidad múltiple de cada ser humano, constituyen partes inseparables del humanismo (véase el capítulo x).

Por otra parte, el ingeniero debe estar consciente de que quienes tienen derecho a intervenir en un proyecto o ven que sus intereses están involucrados en él (sean dueños, beneficiarios indirectos o perjudicados por el mismo) pueden en cualquier momento asumir actitudes tendientes a defender exclusivamente tales intereses particulares; estas actitudes son legítimas como punto de partida de un proceso, pero luego deben irse ajustando como consecuencia de diálogos y negociaciones. El papel del ingeniero en todo ello es propiciar la expresión honesta y clara de tales intereses de modo que puedan conciliarse entre sí y con los más amplios intereses de la sociedad en su conjunto. A la vez, debe saber el ingeniero que las mayores presiones en pro de intereses particulares, lo mismo burdas que sutiles e igual de su propio yo que externas, provienen normalmente de la supuesta obligación de satisfacer sólo al cliente de manera absoluta y acrítica. Son estas presiones psicológicas las que con más frecuencia alejan al ingeniero de su obligación con la sociedad. Sería el caso de quien diseñara, por ejemplo, un conjunto habitacional cumpliendo con la obligación de minimizar los costos del inversionista inmobiliario sin considerar la seguridad de los futuros habitantes del inmueble. El ingeniero que cede a estas presiones y no logra conciliar los intereses de su cliente con los de la sociedad puede alegar que actúa bajo una norma expresamente escrita en documentos aplicables en todo el mundo (por ejemplo, las normas de la International Organization for Standardization [iso], que para fines de certificación de calidad dan al cliente la máxima jerarquía en el conjunto de criterios que deben regir el trabajo de una empresa), pero estaría degradando la ingeniería del rango de una profesión al de una técnica (la diferencia entre una y otra actividad se señaló en el capítulo u). De proceder así, la visión profesional se tornaría inevitablemente miope, y las consecuencias se podrían revertir en el mediano plazo en contra tanto del cliente como del propio ingeniero.

Empero, las contrapartes del ingeniero en este proceso no son sus adversarios, sino partícipes legítimos a quienes ha de tratar caballeramente. El papel del ingeniero no es combatir o menospreciar los intereses de tales contrapartes, sino conciliarlos con los del resto de la sociedad, para lo que debe desplegar a la vez una refinada flexibilidad y una firme convicción de la importancia que para todos tiene el no soslayar los

intereses sociales más amplios. Vista en esta perspectiva, la ingeniería es un noble deporte que se disfruta en la medida en que todos los partícipes juegan con apego a las reglas.

## 6. FUNCIÓN PSÍQUICA DE LA LABORIOSIDAD Y EL AFECTO

Una de las mayores hazañas de la ciencia del siglo xx fue descubrir que quien pone en práctica la laboriosidad y la capacidad de afecto no sólo está en condiciones de cumplir mejor ciertas funciones de responsabilidad social como las del ingeniero, sino que al ejercer esas capacidades pone en marcha un círculo virtuoso con el máximo de repercusiones benéficas sobre él mismo. No es que esto fuese absolutamente desconocido antes, pues desde Aristóteles ha sido la razón que justifica el comportamiento apegado a la ética; sin embargo, no había una prueba que pudiera considerarse tan bien fundada como la aportada por el trabajo clínico de Freud al respecto. Nadie lo ha expresado mejor que el propio autor de dicho descubrimiento: “Lo que el comportamiento de los humanos revela es que como fin último de sus vidas buscan la felicidad [...] Esta búsqueda tiene dos facetas [...] Una es trabajar solidariamente con otros para el bien de todos [...] La otra es el amor [...] que extrae felicidad de la liga emocional con los objetos de tal amor [...] Ambas le brindan al individuo el necesario contacto estrecho con la realidad”<sup>34</sup>

Al descubrir que el equilibrio entre trabajo y afecto, por ser la clave de la felicidad, constituye la condición ideal del ser humano, Freud reveló a la vez la condición patológica de quienes carecen de tal estado de armonía, y por tanto sufren de enajenación o falta de comprensión de los aspectos humanos de la realidad.

Por poner en juego simultáneamente la laboriosidad y la búsqueda de soluciones socialmente óptimas (es decir, armónicas con los intereses de todos), el trabajo del ingeniero contiene en sí mismo, además del potencial de beneficiar a la sociedad en general, los elementos necesarios y suficientes para aumentar la felicidad de los profesionales que lo ejercen. Desde esta perspectiva, es fácil comprender por qué suelen encomiarse los “placeres existenciales de la ingeniería”<sup>35</sup>, aunque seguramente se puede decir algo similar de cualquiera otra profesión.

---

<sup>34</sup> S. Freud, *El malestar en la cultura*, 2, op. cit.

<sup>35</sup> S. C. Florman, *The Existential Pleasures of Engineering*, St. Martin Press, Nueva York, 1976, 160 pp.

## ***VI. La formación de ingenieros***

### **1. EL PUNTO DE PARTIDA**

En los cuatro capítulos precedentes se describieron el quehacer del ingeniero, sus métodos de trabajo, el tipo de conocimientos y capacidades que requiere y el ambiente que es más propicio para la adquisición de unos y otras. Estos conocimientos y capacidades constituyen, pues, las metas de aprendizaje que durante su formación debe alcanzar un profesional de la ingeniería. En consecuencia, los lineamientos generales de la formación de ingenieros no son sino corolarios de dichos cuatro capítulos y pueden expresarse como sigue:

1. En cualquier campo de la ingeniería la adquisición y el desarrollo de los conocimientos y capacidades que un profesional necesita exigen dos etapas formativas, la primera en la escuela y la segunda en la práctica.
2. En la escuela se adquieren conocimientos y métodos de carácter científico que habilitan para comenzar a ejercer la ingeniería en una posición subordinada, además de cierto conjunto de capacidades para seguir adquiriendo conocimientos de interés profesional mediante la observación y el estudio autodidacto.
3. Por su parte, en la práctica se adquiere de modo natural otro conjunto de conocimientos necesarios (principalmente de carácter empírico) y se afinan, robustecen y amplían las capacidades laborales adquiridas en la escuela.
4. También es en la práctica donde se adquiere y desarrolla el atributo más específico y valioso de un ingeniero: el juicio profesional o juicio experto.
5. La práctica de la ingeniería normalmente se organiza por proyectos, cada uno de los cuales es llevado a cabo por un equipo de trabajo encabezado por un ingeniero con experiencia amplia. Un equipo de trabajo suele incluir, además de ingenieros, profesionales de otros campos, y puede ser muy numeroso o tener pocos integrantes; pero, cualquiera que sea su tamaño, es deseable que incluya ingenieros con grados de experiencia variados, de modo que en su seno pueda ocurrir espontáneamente el proceso formativo de los más jóvenes por los más experimentados. Es en el interior de cada uno de dichos equipos, y en el trabajo mismo, como resulta más eficaz y plena la formación práctica de los profesionales, y los estándares de esta formación pueden ser tan exigentes como se quiera.
6. En un equipo de trabajo, cada integrante tiene una encomienda específica, pero todos los retos, avances, hallazgos y resultados del proyecto se discuten colectivamente, de modo que cada miembro del equipo está expuesto a aprender del trabajo de todos los demás; por tanto, mediante el trabajo en equipo no sólo adquieren el saber-hacer de la profesión los ingenieros más jóvenes, sino que también los miembros más experimentados del grupo refuerzan y amplían su formación. A fin de que ese aprendizaje sea más amplio y profundo, es deseable que al cabo de cada proyecto los equipos de trabajo se recompongan para que cada ingeniero tenga oportunidad de participar, dentro de su campo, en proyectos diversos y con distintos compañeros de equipo.

7. El desarrollo del juicio profesional o juicio experto exige un modo especial de proceder en la realización de los proyectos de ingeniería y en la organización de los equipos de trabajo, pues la capacidad de juicio no es simplemente el resultado de muchos años de experiencia, sino de un modo específico de adquirir la experiencia. Para que los ingenieros desarrollen buen juicio profesional, se requiere que en cada proyecto del que sean partícipes se tenga cuidado de hacer una predicción explícita del comportamiento futuro del proyecto una vez implantado, y luego se haga un monitoreo del mismo y se compare la predicción con el comportamiento observado. Es la acumulación de muchas comparaciones de este tipo lo que va dejando en la mente del ingeniero una especie de destilado de sensibilidad, llamado juicio profesional, que le permite emprender cada vez más exitosamente proyectos futuros.

## **2. IMPORTANCIA DE LAS FORMACIONES ESCOLARIZADA Y PRÁCTICA**

En el mundo entero y en todos los campos del saber, los últimos dos siglos han constituido la era de la escolarización del aprendizaje y durante ellos se ha discutido mucho la función formativa de la escuela en todos los niveles y tipos de educación, incluso la profesional. En cambio se reflexiona poco sobre la función formativa de la práctica, como si la responsabilidad casi absoluta que al respecto tuvo esta última en la mayoría de las profesiones hasta el siglo XVIII se quisiera transferir por completo a la escuela. No cabe analizar aquí esta cuestión en general, pero sí en lo que toca a la ingeniería.

Hoy contribuyen a la formación de nuevos cuadros de ingenieros tanto las escuelas como las organizaciones que hacen ingeniería. Las segundas lo logran gracias a la forma en que por lo general organizan su labor cotidiana: en proyectos, cada uno de los cuales se encomienda a un equipo de trabajo que incluye ingenieros con una amplia gama de experiencias profesionales, desde el de larga experiencia práctica y bien desarrollado juicio hasta el recién graduado. En una organización donde se hace ingeniería, el proyecto y el equipo de trabajo responsable del mismo constituyen la unidad organizativa básica, y en ella se da una fuerte sinergia entre el hacer ingeniería y el aprender a hacerla haciéndola; así se logra no sólo la máxima eficiencia en la ejecución de proyectos, sino una notable efectividad en la transmisión de capacidades prácticas de los ingenieros dotados de mejor juicio hacia los menos experimentados. Proceder de este modo propicia la labor formativa pero evita que ella desquicie o lastre la función central de la organización, pues permite aprovechar al máximo el saber-hacer y la experiencia de cada individuo tanto en la realización de proyectos como en la formación de cuadros, todo con el máximo de descentralización en la toma de decisiones.

En cuanto a los ingenieros individuales, sus condiciones en este modo de trabajar en equipo también son muy favorables, como se explicó en el capítulo IV. En la práctica, y en el ambiente más apropiado, todos están así en posición de contribuir a la ejecución de proyectos a la vez que adquieren, y propician que otros adquieran, el buen juicio y las capacidades profesionales que cada uno requiere para su propio desarrollo. Quienes participan en esta forma peculiar de aprender haciendo no sólo amplían continuamente sus capacidades prácticas, sino que adquieren nuevos conocimientos científicos y empíricos, pues conforme se enfrentan a

problemas y circunstancias novedosas se crean condiciones óptimas para el aprendizaje, que incluyen el realismo de los problemas, la motivación para aprender representada por la obligación laboral, y la oportunidad de hacerlo con la guía de las personas más idóneas; basta con agregar a todo ello un poco de empeño autodidacto para obtener los mejores resultados.

Nunca será excesivo el énfasis que se ponga en la necesidad de que la formación del ingeniero ocurra en ambos ambientes: el escolarizado, indispensable en los tiempos modernos para el aprendizaje de la teoría junto con la iniciación en su uso, y el de la práctica tutelada por ingenieros maduros, a fin de que el aprendiz tenga, sin riesgos excesivos, vivencias personales en todos y cada uno de los procesos intelectuales de la ingeniería y, en particular, pueda realizar en condiciones realistas y a escala natural el tipo de cálculos, observaciones y comparaciones característicos de la profesión. Por cierto, la necesidad de esta dualidad formativa no es nueva; desde el siglo 1 A.c. Vitruvio dejó constancia, en su tratado sobre diseño, construcción y fabricación, de que en la ingeniería “el conocimiento es hijo de la teoría y la práctica [...] y quienes han querido adquirir capacidades prácticas sin estudio teórico nunca han alcanzado autoridad a pesar de sus esfuerzos, mientras que quienes confiaron sólo en la teoría terminaron por perseguir sombras o ilusiones, no cosas tangibles. En cambio, los que buscaron el dominio tanto de la teoría como de la práctica alcanzaron pronto su objetivo y han logrado autoridad reconocida”<sup>36</sup> Cabe recordar que lo que en aquel tiempo se llamaba teoría no era aún conocimiento de carácter científico, sino un conjunto de reglas generacionales de mampostería, que era el material predominante de la época.

Puede decirse que esa doble vertiente de preparación de los ingenieros, teórica y práctica, ha existido desde siempre, pues es consecuencia necesaria del quehacer y los métodos de la ingeniería. Ignorarla conduce no solamente a fracasos personales como los aludidos por Vitruvio, sino también a callejones sin salida para las escuelas de ingeniería. Esto es lo que sucede cuando se pretende que la institución educativa por sí sola dé al futuro ingeniero los dos tipos de saber que requerirá para el ejercicio de su profesión. Lo curioso es que, debido a tal pretensión, durante decenios recientes ha crecido la tendencia a volcar sobre las escuelas de ingeniería un cúmulo de críticas injustificadas, acompañadas de presiones en pro de que asuman funciones que no les corresponden ni podrían llevar a cabo debidamente.<sup>37</sup>

En efecto, es desatinado criticar un hecho que, si bien es verídico, es a la vez inevitable: que la preparación con la que salen de la escuela de ingeniería los estudiantes es insuficiente para la práctica de la profesión. Quienes señalan esto y proponen que las escuelas se hagan cargo de remediarlo suponen arbitrariamente que la responsabilidad de formar ingenieros se limita exclusivamente a ellas. Para percibir lo absurdo de este supuesto basta considerar que durante los más de seis milenios de existencia del ingeniero como profesional, apenas en los últimos dos siglos y medio ha habido escuelas de ingeniería; el resto de ese largo lapso en que no las hubo los ingenieros se formaban íntegramente en la práctica, aunque sin soslayar su preparación teórica. Como en esa época el cuerpo de conocimientos teóricos de la ingeniería era muy raquítico, un joven que aspiraba a ingresar al gremio comenzaba a adquirir las capacidades prácticas del oficio sin pasar por una etapa previa de formación escolarizada, pues el ingeniero experimentado que lo tutelaba podía por sí mismo enseñar a su discípulo tanto los pocos conocimientos que constituían

---

<sup>36</sup> 1 Marcus Vitruvio, “De architectura Libri Decem”, The Ten Books on Architecture, traducido por M. E Morgan, Dover Publications, Nueva York, 1960, p. 5.

<sup>37</sup> Véase por ejemplo, D. A. Schón, La formación de profesionales reflexivos, Paidós, Barcelona, 1992, 310 pp.



la “teoría” como el cúmulo de arte práctico requerido, además de los métodos para desarrollar el buen juicio. Fue la expansión acelerada del conocimiento científico a partir del siglo XVII lo que hizo indispensables las escuelas en general y las de ingeniería en particular. Por motivos de eficiencia, del siglo XVIII en adelante ya fue necesario que, antes de comenzar a aprender de la práctica, el joven aspirante a ingeniero pasara por el estudio escolarizado del conjunto de métodos y conocimientos teóricos pertinentes a la ingeniería que la ciencia había producido y acumulado.

Entre las muchas críticas que hoy suelen hacerse a las escuelas de ingeniería están las que les atribuyen responsabilidad por los siguientes defectos de sus egresados:

1. Carecer de ciertos conocimientos y multitud de capacidades indispensables para la práctica profesional.

2. Conocer los aspectos técnicos del diseño y la construcción o fabricación, pero no saber cómo y por qué se decide diseñar y construir ciertos proyectos.

3. Carecer de las habilidades de los buenos prácticos.

4. Ignorar los efectos colaterales, no intencionados y no deseables de los proyectos que se diseñan o producen, lo que finalmente degrada el ambiente, produce riesgos inaceptables o crea demandas excesivas de recursos escasos.

5. Desconocer los ambientes de trabajo en que se ejerce la profesión y tener una concepción inadecuada de las competencias profesionales necesarias.

6. No tener habilidades políticas ni administrativas para emprender con éxito su incorporación al mercado de trabajo, etcétera.

Como se ve, tales críticas parten de suponer que absolutamente todo lo necesario para practicar la ingeniería debe aprenderse en la escuela; como hemos visto, esto nunca ha sido así y no puede serlo.

Asumir que son susceptibles de aprenderse debidamente en la escuela los aspectos prácticos de la ingeniería (o, para el caso, de cualquiera otra actividad) implica desconocer la naturaleza tanto de la escuela como de la práctica. Para comenzar, las condiciones de la práctica no se pueden reproducir con suficiente realismo en la escuela como para hacer de ésta el sitio en que aquélla se aprenda; si se intenta, cuando más se logrará simular- las, y eso de modo muy costoso e incompleto, que no bastará para fines de aprendizaje. ¿De qué manera que no sea la producción de prototipos a escala natural se pueden estudiar realista- mente los problemas técnicos de la fabricación o la construcción? ¿Cómo lograr en la escuela la comparación entre lo predicho y lo observado de cada proyecto, a fin de desarrollar el juicio profesional? ¿Cómo aprender en la escuela a cuidar los detalles, que son tan importantes en el diseño, sin el eficaz efecto de la presión psicológica a la que están sometidos en la práctica los diseñadores de un proyecto destinado a materializarse y de cuyo buen funcionamiento ellos mismos serán responsables? ¿Y qué decir

de las aún más complejas cuestiones sociales de la ingeniería? ¿Cómo se podrían simular en el entorno artificial de la escuela los diversos grupos de interés en torno a un proyecto de ingeniería socialmente importante? ¿Cómo reproducir el comportamiento de tales grupos y las presiones sociales resultantes? ¿Cómo simular las incertidumbres y otras condiciones del entorno en que labora el equipo de trabajo responsable de un proyecto de ingeniería?, etcétera. La respuesta es obvia: no se pueden reproducir de modo suficientemente realista las condiciones de la práctica, dadas las múltiples variables significativas que en ésta intervienen. Por tanto, no hay modelo que pueda sustituir a la práctica para fines de aprendizaje y capacitación profesional. Lo que de la práctica deba saberse tiene que aprenderse precisamente en ella.

### 3. EL PAPEL DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA

Habiendo reconocido la importancia tanto de la escuela como de la práctica en la formación de ingenieros, y discutido el papel insustituible de la segunda, revisemos lo que corresponde a la escuela profesional. En otros escritos he discutido con más amplitud los aspectos que se tocan en este apartado y los tres siguientes, en particular los métodos y criterios con los que conviene formular los planes y programas de estudio de una escuela de ingeniería<sup>38</sup> y las relaciones que debe haber entre la educación para ingenieros y el contexto social en el que éstos actuarán.<sup>39</sup>

A la escuela de ingeniería se ingresa normalmente a los 18 años o poco más; por tanto, un joven que busque ser ingeniero comienza la etapa escolarizada de su formación siendo ya, en principio, una persona educada en todos los aspectos del conocimiento básico, y que posee las capacidades genéricas de un adulto acostumbrado al ejercicio de la libertad y la responsabilidad. Se trata entonces de un ciudadano que, además de conocimientos académicos, ha asimilado previamente (en la familia, en la educación básica y preuniversitaria, y en la interacción social) las normas de comportamiento aceptables, incluyendo la noción y la práctica de la ética y el humanismo, pues todo esto se absorbe y adopta como propio por el ejemplo y la práctica mejor que por el estudio académico, aunque éste lo refuerce. Si suponemos que quienes comienzan su preparación escolarizada como ingenieros se encuentran en ese estado ideal de formación y madurez cívica, lo que la escuela de ingeniería debe agregar a la formación moral y humanista de los jóvenes será sólo aquello que maestros y colegas enseñen de manera tácita y discreta, y lo que el ambiente general de la escuela muestre en cuanto a respeto mutuo, solidaridad, rigor intelectual y competencia leal.

En tal contexto ideal, la escuela de ingeniería debiera abocarse centralmente a enseñar muy bien cierto conjunto de conocimientos y métodos de la ciencia y la ingeniería, determinado por consenso de un pequeño grupo mixto de ingenieros en el que deben participar, por un lado, académicos y, por otro, profesionales de la práctica, todos con experiencia y reconocimiento en su respectivo campo de actividad.

Entonces, se trataría de que en la escuela los futuros ingenieros aprendieran bien algo de ciencias básicas (matemáticas, física, química) y mucho de las ciencias de la ingeniería correspondientes a la rama profesional de que se trate. No obstante, este planteamiento corresponde a condiciones ideales, y tendrá que matizarse de manera casuística dependiendo de cuáles son en la realidad las condiciones de preparación y madurez en que llegan a la escuela profesional los aspirantes a ingenieros (lo cual a su vez depende de cómo funcionan de hecho instituciones sociales como la familia, la escuela básica, la sociedad misma).

---

<sup>38</sup> D. Reséndiz, "Principios y criterios de los nuevos planes de estudio de la Facultad de Ingeniería Ingeniería, vol. LX, núm. 4, México, 1990, pp. 5-10.

<sup>39</sup> D. Reséndiz, "Los ingenieros que el país necesita Conferencias Fernando Espinosa Gutiérrez, compilación, Colegio de Ingenieros Civiles de México, México, 1993, pp. 115- 129.

Las diferencias con respecto a la situación ideal pueden afectar tanto el plan de estudios como los métodos de enseñanza, aprendizaje y evaluación, y desde los lineamientos educativos aplicables a todos los estudiantes hasta variantes particulares en la formación de algunos de ellos, según el grado en que la situación general y la de cada uno difiera de la ideal. Con variantes de un lugar a otro, la formación cívica e histórica y la sensibilidad social de los jóvenes que llegan a la educación superior puede tener insuficiencias que limiten su capacidad de ejercer la libertad con responsabilidad y respeto a los demás; por tanto, se requerirá que la escuela de ingeniería asuma la obligación de dar cierta formación complementaria en esos aspectos. Siempre será mejor hacer esto en el contexto de los propios cursos de ingeniería; por ejemplo, mediante discusiones sobre cómo se toma una decisión profesional en la práctica, teniendo en cuenta las consecuencias que tales decisiones pueden tener para diversos grupos sociales, para el país, para la humanidad, para las generaciones venideras, etc. El objetivo sería poner en evidencia los criterios o reglas de decisión que permiten tomar en cuenta, armonizándola, aquella diversidad de consecuencias posibles.

Llenar lagunas de ese tipo en la formación de los jóvenes es indispensable para formar ingenieros con los atributos necesarios. Otra opción para el mismo fin puede ser que los estudiantes tomen cursos extracurriculares con contenidos del campo de la ética y la historia (en particular la historia de las ideas y la historia de la técnica), con tal de que tales cursos estén orientados a adquirir no un saber libresco, sino una comprensión del modo en que el contexto influye en la toma de decisiones; así se les hará percibir que, mediante criterios éticos, es posible armonizar los intereses propios y los ajenos.

#### **4. EL PROFESORADO Y LOS PLANES DE ESTUDIO**

Por motivos de diversa naturaleza, entre ellos algunos ligados a la calidad de la educación, hoy la mayoría de los docentes de las buenas escuelas de ingeniería son académicos, muchos con formación básica en ingeniería pero muy pocos activos en la práctica de esta profesión. Por ello, tanto las instituciones educativas como los órganos reguladores de la enseñanza buscan tener consejo, asesoría y realimentación de profesionales de la práctica para diseñar los planes de estudio y algunos de los correspondientes métodos de aprendizaje. Las observaciones y consejos que al respecto reciben las escuelas de ingeniería normalmente reiteran la conveniencia o necesidad de que, además del saber y las capacidades especializados, los recién graduados tengan conocimiento del mundo de los negocios y las finanzas, sepan comunicarse en esos campos y muestren habilidades en la toma de decisiones.

Es natural que tales sean las sugerencias, pues, por una parte, el ejercicio de la ingeniería es, en efecto, mucho más que la solución de problemas como los que se enseñan en las escuelas o los libros de texto y, por otra, los profesionales a quienes normalmente las escuelas piden consejo en estos casos son ingenieros maduros cuyas responsabilidades profesionales incluyen la supervisión y la representación de sus respectivas organizaciones ante clientes y otras instancias, y en estas actividades requieren sobre todo los conocimientos y las capacidades preconizados. Sin embargo, no serán estas tareas las que tendrán que realizar los recién

graduados en la etapa inicial de su incorporación a la práctica, sino otras para las que requerirán, sobre todo, el mayor dominio posible de los conocimientos y las habilidades metodológicas que en los capítulos precedentes hemos identificado como susceptibles de aprenderse en la escuela. Los recién graduados deben estar preparados para desempeñarse bien en lo que con alta probabilidad tendrán que hacer en su primer empleo; lo demás es mejor que lo aprendan en la práctica, que constituye el ambiente óptimo para ese fin. Por tanto, la escuela debe tener capacidad para filtrar con buen sentido los consejos que recibe; de otro modo, la calidad de la educación puede sufrir efectos negativos, pues:

1. Es imposible incluir en un programa de estudios de cuatro o cinco años de duración todo lo que un buen ingeniero debe saber.

2. Como se explicó antes, algunos de los conocimientos y casi todas las capacidades, salvo las básicas, se aprenden mejor en el contexto de la práctica profesional, por lo que la escuela debe concentrarse en lo que ella puede hacer bien, y dejar a los años iniciales de la práctica profesional subordinada aquello que es más apropiado aprender en ella.

3. El ingeniero recién graduado se podrá iniciar y desarrollar más satisfactoriamente en la práctica de la profesión si, además de los rasgos culturales antes dichos, al salir de la escuela posee un excelente bagaje de conocimientos teóricos especializados y capacidades básicas para aplicarlos, ya que en esto consistirá su labor durante sus años iniciales como ingeniero; con base en tales conocimientos podrá ir adquiriendo después, por una parte, capacidad de juicio mediante su trabajo en equipo y, paralelamente, otros conocimientos conforme lo requiera, mediante el estudio continuo.

En consecuencia, los planes de estudio deben concentrarse en que los estudiantes adquieran en la escuela, sobre todo, una noción coherente y profunda del cuerpo codificado de saberes específicos de su campo; es decir, lo central de cada una de las ciencias de la ingeniería relevantes y los conocimientos de las ciencias básicas que se requieran para entender y aplicar aquellas. En paralelo con este proceso de aprendizaje, los estudiantes habrán de desarrollar también las capacidades de análisis, síntesis, deducción, abducción e inducción implícitas en los métodos de tales ciencias, más la capacidad de comunicarse con claridad y precisión en la lengua ordinaria y en los lenguajes especializados de la ingeniería, como el matemático y el gráfico. Los criterios de decisión de la ingeniería deben ser discutidos no en cursos por separado, sino integrados al contexto de los cursos sustanciales. Por lo demás, la escuela debe asegurarse de que sus graduados adquieran a su paso por ella una visión general y bien integrada de la ingeniería, sus funciones, sus métodos, su contexto y su entorno, y tomen conciencia de los conocimientos y las capacidades adicionales que después deben aprender, bajo supervisión, durante su etapa de trabajo inicial y que luego deberán reforzar a todo lo largo de su vida profesional.

En lo que toca al cuerpo de conocimientos especializados de la ingeniería, cabe señalar que la función de la escuela es enseñar a sus estudiantes no las últimas novedades operativas de la profesión, sino lo subyacente a ellas (por ejemplo, no los programas de cómputo para calcular esfuerzos, sino las ecuaciones de la elasticidad y la plasticidad en que aquellos se basan, más las habilidades computacionales que permiten

desarrollar dichos programas). Como aquel sustrato tiene una vigencia más duradera que las técnicas derivadas de él, dominarlo bien permitirá al futuro profesional entender rápidamente e incorporar a su práctica las nuevas herramientas operativas que vayan surgiendo después de su graduación.

La formulación de planes y programas de estudio se enfrenta a dos hechos ineludibles y contrapuestos: a) que el acervo de conocimientos relevantes crece continuamente, y b) que en un lapso dado no puede aprenderse bien más que cierta porción de él. Por tanto, cada decisión de introducir un nuevo tema en los planes de estudio debe llevar aparejada la decisión de eliminar otro de extensión comparable, so pena de congestionar al estudiante y volver superficial el aprendizaje. El dilema se resuelve teniendo en cuenta que, al crecer el cuerpo de conocimientos disponible, se modifica la importancia relativa de cada tema específico. En consecuencia, periódicamente las instituciones educativas deben, por así decirlo, reordenar en grado de importancia decreciente toda la lista de conocimientos que en primera aproximación parezca deseable incluir en el plan de estudios, y luego fijar en la misma el límite de lo que es posible que el estudiante aprenda en el tiempo disponible para ello, y de tal modo determinar qué ha de quedarse fuera del plan de estudios.

Otro aspecto importante de la didáctica es la manera de enseñar la ciencia básica, las ciencias de la ingeniería y los métodos de diagnóstico y diseño. Es indispensable que esto se haga de modo que para el estudiante resulten claras las relaciones mutuas entre estos tres componentes del cuerpo de conocimientos del ingeniero. Muy frecuentemente tal condición no se cumple debido a falta de coordinación en los programas de estudio de cada una de aquellas tres partes del curriculum; esto se manifiesta en que los cursos de ciencia básica (matemáticas, física, química) no muestran claramente, con ejemplos específicos de interés, la manera en que estos conocimientos se usan en cada una de las ciencias de la ingeniería que después se estudiarán en otros cursos. Por otra parte, tampoco se muestra y enfatiza la manera como cada uno de los conocimientos de las ciencias de la ingeniería se aplica en el diagnóstico y el diseño. La solución es sencilla, aunque no tan fácil de lograr y mantener operando: consiste simplemente en asegurarse de que los ejemplos y ejercicios que se usen en la enseñanza de la ciencia básica se escojan de problemas de las ciencias de la ingeniería, y que las ciencias de la ingeniería se enseñen con ejemplos y ejercicios seleccionados de los problemas que se traten en los cursos prácticos donde se estudien el diagnóstico y el diseño. De tal modo, al estudiante le resultará claro cómo se relacionan esas distintas materias, la importancia relativa de cada una y el carácter integral e interdependiente del acervo de conocimientos que está adquiriendo, lo que contribuirá a reforzar su motivación, la calidad de su aprendizaje y finalmente sus capacidades como profesional. Pese a ser, en principio, así de fácil dar salida al problema apuntado al comienzo de este párrafo, en la práctica resulta tan difícil que en todo el mundo las escuelas de ingeniería siguen sin resolverlo a satisfacción; la causa es que, en esta época de creciente especialización y partición de todas las actividades, los cursos de ciencias básicas, de ciencias de la ingeniería y de diagnóstico y diseño son impartidos, respectivamente, por tres tipos de profesores de perfil diverso, todos demasiado activos en su propia especialidad y sin tiempo para buscar los modos arriba indicados de armonizar continuamente su enseñanza con la de sus colegas de otros cursos.

## **5. LOS INSTRUMENTOS DE TRABAJO**

La microelectrónica y la informática están cambiando aceleradamente la manera como los ingenieros realizan su quehacer. No solamente la computación ha sido transformada radicalmente por la microelectrónica, y lo será después por la nanotecnología, sino también la medición, en virtud de la cada vez más sencilla, confiable y variada instrumentación disponible. Dado que la ingeniería es el principal usuario directo de los nuevos artefactos de medición y cómputo (sensores, transductores, microprocesadores, autómatas y demás desarrollos de la microelectrónica), las herramientas y los métodos de trabajo de los ingenieros se han transformado y seguirán haciéndolo con el influjo de estas nuevas tecnologías que, por lo demás, han tenido similar efecto revolucionario en casi todas las demás actividades. Por tal motivo la formación de ingenieros está fuertemente influida por la necesidad de estos profesionales de conocer y manejar con soltura todas esas nuevas herramientas, que con seguridad seguirán evolucionando muy rápidamente.

La computación por sí sola ha hecho posible que todas las ramas de la ingeniería den un gran salto hacia adelante en su capacidad de análisis. Con opciones cada vez más poderosas y accesibles de modelado y simulación numérica, la ingeniería seguirá haciéndose cada vez menos dependiente de modelos físicos o matemáticos simplistas para fines de análisis y diseño. En cambio, necesitará dedicar mayor atención a la medición y el monitoreo de proyectos a plena escala, a fin de calibrar los efectos combinados de los nuevos y diversos modelos y métodos de análisis que suelen concurrir en cada proyecto. Seguirá creciendo la capacidad de representar con un alto grado de realismo, mediante modelos computarizados, el comportamiento de objetos, sistemas y procesos muy complejos, sea que la complejidad provenga de la intervención de muchas variables o de la naturaleza no lineal de materiales, procesos o sistemas. Los límites a la modelación numérica seguirán siendo impuestos casi exclusivamente porque sea o no posible o práctico hacerse de la información para caracterizar debidamente el objeto de estudio (como ocurre, por ejemplo, con las formaciones geológicas muy inciertas en las que se construyen algunas de las obras de ingeniería civil, o con los sistemas cuyos componentes sociales o ecológicos son muy complejos), pero aun en estos casos la modelación numérica ofrece medios para ensayar hipótesis diversas y ganar sensibilidad sobre el efecto de un número de variables y parámetros que hace apenas pocos años era impensable tomar en cuenta. Así, la capacidad de análisis ha dejado de ser, en la mayoría de los casos prácticos, una barrera para lo que puede hacer un ingeniero de cualquier campo, y el desafío consiste ahora en saber usar esa enorme capacidad con buen juicio. Lo inteligente será usarla no como fuerza bruta para incluir todas las variables e interrelaciones imaginables, pues esto puede más bien desembocar en confusión y desatinos, sino como medio para valorar de manera más completa o realista los efectos de variables y parámetros dignos de consideración, y siempre sometiendo los resultados a una confirmación de órdenes de magnitud mediante modelos más elementales, mejor probados o menos sujetos a errores azarosos.

## **6. ACTITUDES ANTE LA TECNOLOGÍA**

Debe buscarse que los ingenieros en formación adquieran hábitos y capacidades de innovación, pero también mecanismos de resistencia al cambio por el cambio. Ello no necesariamente significa que deban introducirse cursos especiales para estos fines, sino que en los de ciertos temas se haga un análisis crítico de las soluciones adoptadas; por ejemplo, que se discutan las limitaciones de diseños conocidos, las posibilidades de superarlas, los costos que ello implicaría, y otras condiciones que debieran cumplirse para que las soluciones alternativas resultasen atractivas. De ese modo se fomenta y se vuelve hábito la actitud innovadora. Por su parte, la capacidad para resistir la tentación de hacer cambios por simple afán de novedad se logra cobrando conciencia de que cambiar lo que ya se conoce implica riesgos y costos: el riesgo de que las novedades improvisadas no funcionen en algunos aspectos tan bien como las soluciones ya probadas, y los costos de aprender a usar, administrar y mantener lo nuevo. Solamente se justifican los cambios cuyos efectos benéficos sean mayores que dichos riesgos y costos. La capacidad de innovación y la resistencia al cambio por el cambio, como se ve, son complementarias y se adquieren simultáneamente.

Surge aquí naturalmente una pregunta: ¿deben ser diferentes los conocimientos y las tecnologías que dominen y usen los ingenieros de países cuyo grado de desarrollo sea diverso? Desde luego que deben ser diferentes en ciertos aspectos. Por ejemplo, el conocimiento y la comprensión de la cultura, la historia, la sociología y la economía del país respectivo es indispensable para diseñar proyectos que funcionen apropiadamente y produzcan los efectos sociales previstos. Más allá de esto, los ingenieros deben tener el mismo acervo de conocimientos de su especialidad, cualquiera que sea su país de origen o de residencia, y deben ser capaces de usarlo de manera igualmente atinada, racional y humanista (es decir, sensible a los intereses, preferencias, recursos y condiciones de los seres humanos a cuyo servicio están destinados los proyectos que el ingeniero diseña y produce). Hay quienes opinan que los países menos desarrollados no requieren los avances tecnológicos y científicos más recientes y, por tanto, sus ingenieros no necesitan conocerlos. Tal tesis asume tácitamente que los países rezagados habrán de recorrer paso a paso la trayectoria de los más avanzados; pero esto no tiene sustento, menos aún en las condiciones de interconexión e interdependencia del mundo actual. Todos los seres humanos vivimos ya en la misma fecha. Si los profesionales de los países rezagados conocen la historia y las diferencias que separan a unos países de otros, pueden evitar experiencias costosas, tomar ciertos atajos y, sobre todo, no descartar el uso de ninguna tecnología que resulte a la vez deseable y asequible, ni renunciar a priori a desarrollar un proyecto sin previo análisis de su conveniencia y factibilidad. El valor principal de la globalización reside precisamente en eso: poner ante los ojos de todos los seres humanos las opciones y experiencias que otras naciones y personas han desarrollado, para que cada quien opte por lo que más le conviene y mejor pueda ajustarse a sus designios y posibilidades; todo lo demás de ella son cuestiones que en cada caso habrá que analizar, decidir y negociar. No se puede renunciar a priori a ningún conocimiento o saber-hacer disponibles, sea quien sea el autor de ellos; dado que existen, son patrimonio de la humanidad entera, aunque tengan precio. Los ingenieros de cualquier país deben acceder sin titubeos al conocimiento universal y a las nuevas tecnologías, además de crear ellos mismos nuevas soluciones mediante la innovación de lo que existe. No es que hoy la



información, el conocimiento, el ingenio y la inventiva sean más importantes que antes; siempre lo han sido y seguirán estando en el origen de las ventajas de unas naciones sobre otras; es decir, seguirán siendo lo que produzca en cada país el dinamismo de sus empresas, la productividad laboral y la calidad de vida.

## **7. GÉNERO E INGENIERÍA**

Hasta hace aproximadamente medio siglo la ingeniería era una profesión casi exclusivamente masculina. En la matrícula de todas las escuelas de ingeniería del mundo, las mujeres constituían una fracción que variaba de pequeña a casi nula. Hoy siguen siendo una minoría en el gremio pero ya casi son la mitad de la matrícula escolar de ingeniería en los países desarrollados y se aproximan rápidamente a esa proporción en todos los demás. El sentido de esta evolución no puede ser sino positivo. En las escuelas ya es evidente la competencia de las mujeres por los más altos niveles de calidad académica. En el gremio, por su parte, ya se puede documentar la presencia de mujeres ingenieras en todos los aspectos de la vida moderna; igualmente se multiplican los ejemplos de contribuciones individuales y de carreras personales de mujeres tan destacadas como las de los hombres.<sup>40</sup> Una primera obligación de las escuelas, el gremio y las empresas de ingeniería es reconocer y difundir lo que las mujeres están aportando a la ingeniería en sí y a la imagen de la profesión; otra, estar atentos a que, con base en las capacidades de cada una, sus oportunidades se acrecienten hasta igualarse a las de sus colegas varones, tanto en responsabilidad como en remuneración y visibilidad.

---

<sup>40</sup> S. E. Hatch, *Changing our World: True Stories of Women Engineers*, ASCE Press, Reston, Va., 2006, 352 pp.

## SEGUNDA PARTE

### EL ENTORNO DE LA INGENIERÍA

## ***VII. Ciencia e ingeniería***

### **1. LAS DOS FUENTES DE CONOCIMIENTO OBJETIVO**

El conocimiento de las leyes que gobiernan los fenómenos con que lidia la ingeniería es uno de los elementos que el ingeniero usa, y la ciencia es hoy la fuente principal de la que ese conocimiento proviene. Sin embargo, el hecho de que la ingeniería sea mucho más antigua que la ciencia hace evidente que ésta no es su única fuente posible de conocimiento. En efecto, antes de que en el siglo xvii naciera la ciencia (esto es, se institucionalizara su versión moderna basada en el método experimental y las matemáticas), la ingeniería era ya una antiquísima profesión que apoyaba sus decisiones en conocimiento producido por la práctica de la misma, que sigue siendo hoy una fuente válida y muy frecuentada.

Lo que se aprende del ejercicio de cualquier actividad práctica se denomina conocimiento empírico y, por ser hijo de la experiencia y no de la lucubración racional pura, es hermano legítimo del conocimiento científico. Por eso no es filosóficamente válida la connotación despectiva impuesta, después de Kant, al adjetivo empírico, que rigurosamente significa tan sólo conocimiento derivado de la observación de la naturaleza y, por consiguiente, es aplicable tanto al que proviene de la ciencia como al producido por la práctica. Antiguamente todo conocimiento requerido por la ingeniería u otras actividades tuvo que generarse en la práctica, pero en el siglo XVII comenzó a cristalizar una revolución metodológica que finalmente hizo de la ciencia el surtidor principal de conocimiento para todos los fines prácticos, incluso la ingeniería.

Entre el conocimiento generado por la ciencia y el derivado de la práctica hay, como veremos después, diferencias solamente en el grado de su confirmación, y no en la legitimidad de su origen, pues ambos se basan en la observación y la experimentación. Esa diferencia de grado se debe a que en la práctica de una profesión (sea la ingeniería, la medicina u otra) es imposible o ilegítimo experimentar en cualesquiera condiciones. Por una parte, hay experimentos que no deben hacerse en la práctica profesional por su alto riesgo; por otra, los que sí son posibles están sujetos a las siguientes dos condiciones: a) que el número de variables que interviene no sea excesivo, a fin de que cada una de ellas se pueda controlar, y b) que el costo del experimento sea asequible. Una observación astronómica tiene algunas condicionantes equivalentes a las de la experimentación en la práctica profesional; esto es, sus objetos de estudio son los naturales a plena escala y no se pueden aislar de variables indeseadas. En contraste, el hecho de que la ciencia pueda definir arbitrariamente las fronteras de su objeto de estudio permite limitar el número de variables y garantizar el control pleno de ellas; además, al trabajar en el laboratorio como hace la ciencia, y no a plena escala como en la profesión, reduce los costos y hace viable la suficiencia y aun la redundancia de observaciones. Empero, el conocimiento que aportan tanto la astronomía como la práctica son tan legítimos como los de la ciencia; el saber derivado de la práctica puede resultar menos general, menos aproximado y a veces más provisional que el conocimiento científico, pero ambos tienen la misma base de validez filosófica (el empirismo).

Por lo demás, ni el conocimiento proveniente de la ciencia ni el derivado de la práctica son definitivos ni plenamente fieles. Tampoco es ninguno de ellos válido con certeza absoluta, pues en ambos casos su modo de generalizar es la inducción, que consiste en pasar de la observación de casos particulares de un evento a la conclusión de que el patrón observado en ellos es válido para todos los posibles eventos del mismo tipo; tal conclusión carece de validez probatoria plena, ya que siempre queda abierta la posibilidad de que el siguiente evento que se observe contradiga a los anteriores. Sin embargo, la inducción es el único modo de que disponemos para extraer conclusiones de nuestra experiencia; a la vez, es la consecuencia última y la más alta expresión del conocimiento humano: se basa en la abstracción de la realidad mediante el lenguaje (tanto el ordinario como el matemático, el icónico, etc.) y permite identificar las similitudes entre dos o más hechos particulares, haciendo caso omiso de sus diferencias o peculiaridades. La inducción es el más poderoso instrumento intelectual del ser humano, pues hace posible aprender de la simple experiencia de vivir y hacer; finalmente, constituye la fórmula para generar conocimiento mediante la ciencia.

La ventaja que, en cuanto a validación, conserva el conocimiento científico sobre el empírico es, como quedó dicho, el estar basado en observaciones ampliamente redundantes que excluyen efectos de variables indeseadas y que pueden ser repetidas por investigadores independientes; ciertamente, no es ésta una ventaja menor, pero es de carácter circunstancial, no sustancial.

El conocimiento derivado de la práctica, por su parte, suele tener sobre el de origen científico la virtud de producirse en condiciones mucho más realistas, tanto de escala como de entorno; por lo mismo, la confirmación de una teoría en la práctica, sobre todo en una variedad amplia de casos particulares, constituye para la ingeniería una validación mucho más fuerte que la que pudiera provenir de otras tantas confirmaciones en el entorno artificialmente controlado de un experimento científico.

Finalmente, hay que señalar que, cuando no hay conocimiento científico disponible, el uso del de origen empírico es no sólo legítimo, sino obligatorio para una profesión como la ingeniería, cuyo imperativo es resolver problemas con oportunidad, y no esperar pasivamente a que la ciencia produzca el conocimiento requerido. Por proceder así, algunas veces la ingeniería se ha adelantado a la ciencia, invirtiendo el orden cronológico en el que normalmente ocurren las cosas en la época moderna; tal fue el caso del desarrollo empírico de las primeras máquinas de vapor, que luego produjeron, además de la Revolución industrial, el nacimiento de la termodinámica, una nueva rama de la ciencia.

## **2. GALILEO Y EL MÉTODO CIENTÍFICO**

Antes del nacimiento de la ciencia moderna en el siglo XVII, el conocimiento humano progresaba lenta e intermitentemente, pues se iba gestando y puliendo de manera empírica y parsimoniosa en el seno de los gremios que practicaban la ingeniería, la medicina y otras ocupaciones prácticas; así, sólo después de muchos años, siglos a veces, se lograba afinar suficientemente un nuevo conocimiento para considerarlo confiable.

Los avances ocurrían de vez en cuando y, por lo mismo, durante generaciones permanecían vigentes idénticas maneras de enfrentar los problemas prácticos y una visión invariante del mundo. Podemos atribuir principalmente a Galileo y a Francis Bacon el haber hecho posible que el conocimiento comenzara a crecer con rapidez cada vez mayor a partir del siglo XVII. El número de notables hallazgos que Galileo logró durante su vida, y su insistencia en lo metodológico, dejaron bien establecido el modo óptimo de buscar y confirmar cualquier nuevo saber objetivo. Esto quedó claro sobre todo después de la publicación un tanto subrepticia (en la Holanda protestante, más allá de los alcances del papa) de su obra con mayores repercusiones: el *Diálogo sobre las dos nuevas ciencias*.<sup>41</sup> Conforme la aplicación del método galileano fue diseminándose en los siglos subsecuentes, se aceleraron los descubrimientos en diversos campos, principalmente la física y la astronomía. Este innovador modo de generar nuevo conocimiento, hoy llamado universalmente método científico, al principio no estuvo institucionalizado, sino que se desarrolló y practicó por vocaciones y decisiones personales. Sin embargo, muy pronto nacieron en la sociedad civil asociaciones de individuos que lo asumieron colectivamente, como la *Accademia dei Lincei* (1603) y la *Accademia del Cimento* (1657), ambas en la península italiana; la *Royal Society* (1660) en Inglaterra, y la *Académie Royal des Sciences* (1666) en Francia. Poco a poco, más personas, recursos y atención se fueron dedicando al planteamiento y solución sistemática de multitud de problemas en todas las áreas del conocimiento, unos con motivación práctica y otros resultantes de la pura curiosidad intelectual.

Nació y creció así la nueva ciencia, que hizo suyos todos los afanes de saber que antes tenían que atender por su cuenta cada una de las ocupaciones prácticas e independizó de éstas la generación de conocimiento; surgió, en consecuencia, la ocupación de investigador científico y, finalmente, la ciencia adoptó, primero en los países desarrollados y luego en otros, aunque en éstos de modo limitado y titubeante, modalidades con soporte y estructuración social (filantrópica, comercial y gubernamental) cada vez más amplias. La nueva ciencia ha estado produciendo desde entonces un caudal de conocimientos que crece de modo acelerado y sin límite aparente, hasta el extremo de haberse vuelto, para algunos, el fundamento de una nueva fe casi religiosa en el progreso inexorable no sólo de la ciencia, sino de la humanidad en todos los aspectos.<sup>42</sup>

El método puesto a punto por Galileo consiste en adoptar, por una parte, la observación sistemática y controlada como fuente de imágenes plausibles sobre los fenómenos de la naturaleza y como único modo válido de confirmar cualquier postulado, hipótesis o teoría y, por otra, el razonamiento matemático como medio para procesar las observaciones hasta transformarlas en resultados científicos. No es que el despegue durante el siglo XVII de este nuevo modo de hacer ciencia haya ocurrido sin precedentes, pues hubo precursores y pioneros que durante innumerables generaciones fueron no sólo concibiendo y ensayando el nuevo método, sino también enfrentando y venciendo poco a poco enormes trabas que

---

<sup>41</sup> Galileo Galilei, *Diálogo sobre las dos nuevas ciencias*, originalmente publicado en Holanda por Elzevir, 1638.

<sup>42</sup> J. Gray, "Una ilusión con futuro", *Letras Libres*, año VI, núm. 71, pp. 12-17, México, 2004; G. Zaid, "La fe en el progreso", *Letras Libres*, año VI, núm. 71, Pp. 20-21, México, 2004.

duraron más de un milenio (siglos y a xv) y que se pueden resumir en 1) la resistencia externa, institucional y social, representada por la negación de todo nuevo conocimiento que contradijera los dogmas religiosos, principalmente los de la Iglesia católica, y 2) la reticencia interna de los propios intelectuales a contradecir los dogmas oficiales e incorporar de manera generalizada el método experimental y el procesamiento cuantitativo de las observaciones, poderosas herramientas que, no obstante, el intelecto humano había ido concibiendo e incluso usando desde mucho tiempo atrás, aunque inconstantemente y de modo parcial. En efecto, ya Platón había definido la ciencia como “el juicio documentado por la prueba” (si bien para él la prueba no necesariamente era experimental); pero como es bien sabido, tanto la observación de la naturaleza como las matemáticas tienen tras de sí una historia antiquísima, con seguridad más larga que 30 siglos, pues va de Egipto y sus agrimensores, pioneros de la geometría, a Grecia con los presocráticos, con Euclides y Arquímedes, y llega al Renacimiento con Leonardo, antes de formalizarse y darse a conocer más ampliamente a partir de los trabajos de Galileo en el siglo xvii y de difundirse explosivamente en el xviii, denominado siglo de la Ilustración, y los subsecuentes.

Desde la caída del Imperio romano en el siglo V y hasta el siglo de Galileo, el mundo occidental no siguió usando el método experimental. Esto se debió a que durante el milenio que va del siglo IV al XIV Europa perdió gran parte del conocimiento creado por las culturas griega y egipcia. Para que Occidente recuperara el saber de la Atenas clásica hubieran sido necesarios muchos más siglos después de aquel milenio medieval si no fuera porque los sabios árabes habían guardado ese tesoro; de ellos fue que poco a poco, durante la última parte de la Edad Media y en el Renacimiento, fueron llegando a Europa los conocimientos contenidos en los tratados filosóficos y matemáticos griegos, a veces traducidos del árabe y a veces directamente del griego, pero siempre procedentes de las bibliotecas islámicas. Hay que tener en cuenta que apenas en el Renacimiento se llegaron a conocer en Europa las obras de los matemáticos de la antigua Alejandría y los trabajos completos de Arquímedes.<sup>43</sup>

Así, el moderno método científico no pudo florecer sino cuando la cultura occidental recuperó por ese medio la herencia intelectual de la Grecia clásica. En efecto, la revolución científica del siglo XVII no solamente consistió en aceptar el método experimental u observacional como piedra de toque para validar todo conocimiento sobre la naturaleza, sino, a la vez, en adoptar las matemáticas como medio obligado de razonamiento al interpretar y expresar los resultados de las observaciones. Fue la conjunción de experimentación y matematización lo que dio a la ciencia sus atributos modernos: el experimento la hace capaz de detectar y describir el comportamiento de la naturaleza bajo ciertas circunstancias, en tanto que la matemática le permite expresar sus resultados de modo a la vez general y susceptible de aplicarse a la predicción en cualesquiera circunstancias del futuro.

La larga historia de la humanidad siempre ha estado movida, sobre todo, por el interés de resolver problemas tan ingentes como la supervivencia, lo que paso a paso se fue logrando en el campo de cada una de las llamadas artes prácticas: la medicina, la ingeniería, las artes bélicas, la agricultura, la cría de animales, etc. Indicio inequívoco de esto es que el texto de Galileo sobre las “dos nuevas ciencias” comienza reflexionando sobre la importancia del trabajo que realizaba el Arsenal de Venecia para el avance del arte de construir barcos. Por la trascendencia que para la ciencia tuvo su contribución metodológica, Galileo mismo es hoy conocido universalmente como científico, pero colaboró con el Arsenal en cuestiones relativas al diseño de embarcaciones y es visto por algunos más bien como ingeniero.<sup>44</sup> Puede decirse que fue al menos un gran investigador de los problemas que enfrentaban los ingenieros de su tiempo, además de haber fundado, en una sola de sus publicaciones, tres nuevas ramas de la ciencia íntimamente ligadas a la ingeniería. En efecto, a pesar de que el título se refiere a “dos nuevas ciencias” el libro que hemos venido comentando contiene los fundamentos de a) la resistencia de materiales, hoy llamada también mecánica de materiales; b) la teoría del escalamiento, hoy conocida como análisis dimensional, y c) la teoría del movimiento acelerado relativa a proyectiles y caída libre de los cuerpos. Curiosamente, siglos después de Galileo, en el seno de la propia comunidad intelectual heredera

---

<sup>43</sup> H. Butterfield, Los orígenes de la ciencia moderna, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México, 1981, p. 116.

<sup>44</sup> N. Bassols Batalla, Galileo ingeniero y la libre investigación, Fondo de Cultura Económica, México, 1995, 208 PP. (Colección Popular.)

de su método, han surgido disquisiciones sobre una supuesta supremacía de la investigación que se realiza sin otro propósito que el saber por el saber; pero la motivación es un asunto íntimo del investigador, y el hecho es que la ciencia institucionalizada de nuestros días, su avance y sus usos, son indiferentes a tales motivaciones personales, que deben verse simplemente como un derecho de cada científico.



Hemos aludido a las resistencias, sociales o externas por una parte e individuales o internas por otra, que se opusieron durante siglos al uso general del método experimental o científico. Para apreciar el tipo y la magnitud de la resistencia externa que hubo que vencer, hasta conseguir que los resultados de la observación de la naturaleza y la experimentación pudieran divulgarse y valorarse libremente, basta con considerar la vida del propio Galileo, quien tuvo que explicar a sus corresponsales y a multitud de sus críticos, una y otra vez a lo largo de su vida, más o menos lo mismo: que la religión no concierne sino a la salvación de las almas, pero la naturaleza, aun si creada por Dios, sólo puede ser conocida por la experiencia y por un método de razonamiento apropiado, no por la revelación. No obstante sus explicaciones, varias veces recibió Galileo advertencias del Santo Oficio, y finalmente fue juzgado y condenado a muerte, aunque amigos influyentes consiguieron que esta pena se le conmutara por la de vivir encerrado, vigilado y silenciado el resto de su vida.

A juzgar por los dogmas no teológicos que la Iglesia católica y otras siguen propugnando, las lecciones de aquella historia no se han aprendido por completo, pese a que el papa ya “perdonó” a Galileo (tres y medio siglos después de muerto). La larga resistencia interna de los propios investigadores al uso del método experimental entre el *xiv* y el *xv* se explica por lo sucedido a Galileo y a muchos otros, siempre por causas idénticas. En cambio, es curioso que también hubiera de batallarse durante siglos para vencer una resistencia igualmente interna al uso de las matemáticas, como se infiere de la reiteración que el propio Galileo (en su libro citado) y Pascal, su joven contemporáneo, hacían de sus argumentos en pro de esta disciplina. Por ejemplo, desde el primer párrafo de su obra póstuma, Pascal busca convencer de las ventajas del razonamiento matemático sobre la especulación intuitiva como sigue:

[En el método matemático] los principios son pocos y muy sencillos, pero ajenos al uso ordinario, por lo que es improbable toparlos espontáneamente; pero apenas se busca contacto con ellos, uno los comprende de inmediato, y habría que tener una mente muy torpe para usarlos incorrectamente, pues son tan claros que es imposible que se nos escapen. [Por el contrario] los principios del método intuitivo son de uso común y están a la vista de todo mundo; no tiene uno sino que mirar y no se requiere otro esfuerzo; es solamente cuestión de buena vista, pero buena de veras, pues estos principios son tan sutiles y numerosos que es casi imposible que no se nos escapen algunos. Y la omisión de cualquiera de ellos conduce a error, por lo que se debe tener la visión muy clara para verlo todo y además, una mente muy capaz para no extraer deducciones falsas una vez conocidos los principios.<sup>45</sup>

En perspectiva, hoy podemos decir que los esfuerzos desplegados por las mejores mentes durante una decena de siglos, en el *xvii* finalmente habían logrado que los tiempos estuviesen maduros para que la ciencia se liberara de sus mayores ataduras y, como evidencia y fruto de ello, apenas un siglo más tarde, durante la Ilustración, la civilización occidental buscaría basar su vida y su visión del mundo en la aplicación masiva de los conocimientos científicos.

---

<sup>45</sup> B. Pascal, *Pensées*, I, 1670.

El método propugnado por Galileo, que al difundirse dio lugar a que la generación de conocimiento se acelerara continuamente hasta nuestros días, es un proceso que consiste en:

A. Hacer observaciones (mediciones) sobre el fenómeno de interés y su relación con las variables que en él intervienen; si estas variables son muchas, partir el problema en partes, manteniendo constantes algunas de las variables mientras otras se hacen variar.

B. Mediante un acto creativo de la imaginación informada y entrenada, generar una propuesta tentativa de solución que relacione las causas con el efecto, llamada hipótesis (= algo inferior a tesis).

C. En experimentos controlados y repetibles, comparar la hipótesis con la realidad mediante un número suficiente de observaciones, a fin de verificar la idoneidad de aquella. Si el resultado es positivo, se cierra el ciclo y la hipótesis deja de serlo y adquiere el carácter de una teoría; en caso contrario, el ciclo se repite hasta obtener resultados satisfactorios.

Los postulados o supuestos filosóficos que dan fundamento al método galileano se pueden expresar como sigue:

1. Los aspectos no cuantificables de la naturaleza no son susceptibles de estudio científico. Para que lo sean se requiere que antes se definan las variables pertinentes y se inventen los artificios apropiados para medirlas.

2. Existe correspondencia perfecta entre los hechos naturales y ciertas expresiones matemáticas, pero la expresión matemática correspondiente debe comprobarse experimentalmente caso a caso a fin de descubrir la que es correcta. Mientras tal comprobación no se realice, la formulación matemática tiene solamente el carácter de hipótesis o suposición. Hecha la comprobación, la hipótesis se transforma en teoría y eventualmente en ley (mediante fuertes confirmaciones adicionales). Es posible continuar descubriendo así una infinidad de leyes naturales apoyándose en los hallazgos previos.

3. La ciencia no puede resolver de una vez cuestiones de complejidad arbitrariamente grande. Más bien debe aplicar un enfoque reduccionista; es decir, investigar y resolver uno a uno los componentes de un problema complejo para después abordar la investigación del todo, asumiendo que éste es una función (en el sentido matemático) de sus partes, incluyendo las interacciones entre éstas.

4. Las teorías y leyes científicas no pueden ser finales o absolutas, sino que deben estar sujetas a verificación y corrección ulterior conforme se amplía su campo de aplicabilidad o se perfeccionan los modos y medios de medir.

La validez de estos postulados ha sido probada más allá de toda duda por la evolución de la ciencia después de Galileo, y la expansión acelerada y sin límite del conocimiento desde entonces hace a diario evidente el acierto de la estrategia de investigación contenida en el tercero de ellos. Por lo demás, a las ingenierías militar y civil, por ser las más antiguas, les tocó vivir inmediatamente después de Galileo el proceso transformador inducido

por la ciencia en todas las actividades prácticas. En su saber, que en el siglo XVII todavía constaba casi completamente de conocimiento empírico, comenzó a introducirse cada vez más el de origen científico, primero para explicar las reglas prácticas vigentes, luego para ampliarlas y sustituirlas, y finalmente para basar cada vez más en la ciencia tanto el diagnóstico de los problemas de la ingeniería como el diseño de sus soluciones. Conforme esto ocurrió, la ingeniería civil, que entonces era todavía una profesión que conjuntaba también a la arquitectura, fue modificando sus diseños. Hasta entonces éstos estaban basados en precedentes de proyectos exitosos contruidos con un solo material (mampostería) y en criterios de ortodoxia estética; en adelante se comenzó a adoptar un enfoque más integral en el que poco a poco fueron teniendo cabida nuevos materiales y la búsqueda activa de cierto equilibrio racional entre seguridad y economía.

### **3. EL PODER QUE DA EL CONOCIMIENTO**

La principal consecuencia del avance de la ciencia ha sido el crecimiento del poder del hombre para superar las limitaciones que la naturaleza le impone, como a todos los seres vivos. Basta pensar en cómo se ha transformado nuestro planeta conforme el hombre ha usado ese poder, mediante la ingeniería y otras actividades prácticas, para satisfacer lo que considera sus necesidades: en paralelo han ido cambiando las condiciones de vida, generalmente para bien, a pesar del desmedido crecimiento de la población en tiempos recientes; aun los resultados indeseables de ciertos desarrollos basados en el nuevo conocimiento son evidencias de aquel poder. Se ha demostrado, así, que el saber no solamente dota al ser humano de capacidad de comprensión de su entorno, sino también de poder para transformarlo (a veces sin haberlo comprendido cabalmente). El poder que da el conocimiento, pues, no es simplemente poder, sino margen de libertad para ejercer el albedrío.

Pero el poder del conocimiento no es un valor del conocimiento en sí, sino de su aplicación o, mejor dicho, de quien lo aplica. Si el hombre poseyera conocimientos sólo para fines de placer existencial contemplativo, tal poder no existiría. Por eso puede observarse, en nuestro tiempo y en el pasado, que el poder de una sociedad no depende nada más de los conocimientos que ésta tiene, sino de su mayor o menor voluntad y habilidad de usarlos. El grado abrumador en que ha crecido el poder de las sociedades inclinadas a usar el conocimiento científico para fines prácticos no deja lugar a dudas sobre el poder potencial del mismo. A pesar de que la mayoría de los seres humanos está al margen de la creación, muchos usan y comprenden algunas porciones del conocimiento de las que más poder puede extraerse; ya casi no hay escépticos del valor que el saber encierra, pues a pocos ha faltado la ocasión de usar, o al menos observar, las obras y consecuencias de ese poder en acción. De aquí que muchos alienten una expectativa muy parecida a la fe en que el progreso de la ciencia produzca avances similares en todo lo que la humanidad considere deseable. Quizá en esto haya que distinguir entre la fe en el progreso general en todos los aspectos, que no parece tener justificación histórica, y la voluntad de progreso limitado a ciertos aspectos, cuya eficacia sí está demostrada. Ni el conocimiento ni la fe en el progreso, por sí mismos, pueden generar cosa alguna; pero hay evidencia histórica abundante de que la voluntad de progreso, esto es, la gana de avanzar poniendo en juego el poder del conocimiento en las cuestiones específicas en las que éste es eficaz, sí

produce progreso, aunque solamente en aquellas mismas cuestiones específicas. Se señala a China como prueba de que el conocimiento en sí no produce progreso, pues la ventaja que en una época tuvo gracias a numerosos descubrimientos e inventos no le dio provecho práctico ni liderazgo universal, que sí lograron los países de Occidente cuando ejercieron su voluntad de avanzar apoyados en el conocimiento aportado por la ciencia.<sup>46</sup> Está por verse si podremos agregar los logros de China en el final del siglo xx y los albores del xxi como otra prueba de lo que logra la voluntad de progreso con base en el conocimiento, sea endógeno o venido de fuera pero asimilado localmente.

---

<sup>46</sup> G. Zaid, op. cit.

El poder del conocimiento está más concentrado que el de la riqueza. En primer lugar está concentrado en los países más igualitarios, donde la educación y el ingreso están mejor distribuidos; pero incluso en ellos el saber para fines prácticos es manejado por una minoría selecta, una elite dentro de la elite, constituida por los más educados y pragmáticos. Este hecho pone en evidencia la magnitud prodigiosa del poder que da el conocimiento: aun en manos de esas pequeñísimas minorías, el conocimiento es capaz de transformar a la humanidad entera derramando sobre toda ella cierta dosis de beneficios. Y conforme el conocimiento se multiplica, la concentración de su poder continúa de manera natural, inevitable, creando elites más selectas dentro de las ya existentes. Ni siquiera las utopías igualitarias han osado contradecir la fatalidad de esa concentración.

El poder del conocimiento y la fatalidad de su concentración son tan grandes que la democracia no basta para distribuirlo mejor ni para atenuar con él otras desigualdades; pero esto no es ya un problema de la ciencia o del conocimiento, sino de la naturaleza humana. Los filósofos positivistas del siglo xix sostenían que con el avance científico la política y la ética terminarían por convertirse en ciencias que darían lugar a un esquema de valores tan incuestionables que se impondrían por la fuerza de la razón. Ahora sabemos, por una parte, que eso no ocurrirá, pues el hombre siempre encuentra la manera de eludir la razón o de racionalizar sus pasiones; por otra parte, el conocimiento es moralmente neutro; es decir, un mismo conocimiento, cualquiera que sea, puede usarse para bien o para mal. Ambos hechos bastan para que la irracionalidad, con sus secuelas de guerras, marginación social y opresión, no desaparezca de la faz de la tierra. En otras palabras, el comportamiento de los seres humanos no es producto de la imperfección de la ética o la política, sino de imperfecciones humanas. La historia de la humanidad ha demostrado ya que en la distribución del poder y la riqueza, así como en el grado de satisfacción de las necesidades en cada generación, hay avances y retrocesos, no progreso continuado. El siglo y medio que nos separa del positivismo ha vivido las modas de la planificación central y del mercado libre, cada una repitiendo promesas, logros y estragos más o menos similares, entre sí y con los de otras doctrinas.

#### **4. LOS COSTOS DEL CONOCIMIENTO**

Desde luego, algo se paga por el poder derivado de la expansión del conocimiento, no sólo porque cuesta el aparato científico necesario para producir tal expansión, sino por las implicaciones que ésta tiene. Una vez generado, el conocimiento finalmente se usa, y aún si el propósito expreso al que se aplica es benéfico, habrá efectos colaterales no deseados cuya acumulación termina implicando un costo; el capítulo VIII está dedicado totalmente a la discusión de este tipo de problemas y sus consecuencias. Pero hay otros costos de la expansión acelerada del conocimiento de los que casi no se habla y que cabe considerar aunque sea someramente. En efecto, dicha expansión implica a) la segmentación del saber en especialidades; b) una mayor complejidad de los problemas de todo tipo, y c) una obsolescencia más rápida de las soluciones. Cada uno de estos tres hechos significa un costo, ya que la especialización, la complejidad de nuestros problemas y el carácter efímero de sus soluciones dificultan la aplicación del conocimiento o la hacen más onerosa. Son por ello

contrapartidas de los beneficios que da el conocimiento; lo son en el sentido más literal del término, pues el incremento de poder que el nuevo conocimiento otorga se ve mermado por cada uno de aquellos tres factores. Veamos cómo y por qué.

El crecimiento de la especialización. Conforme el conocimiento se expande, las mentes individuales no pueden abarcar sino una fracción proporcionalmente menor de ese universo, y sobrevienen nuevas subdivisiones o especialidades. La lista de éstas es cada vez más y más extensa, lo que acelera la generación de nuevo conocimiento, pues facilita que en cada nueva especialidad se aplique el poderoso método científico a problemas más numerosos, que son porciones cada vez más pequeñas del todo, tanto relativamente como en términos absolutos. Es, por tanto, inexorable que se planteen y resuelvan, por unidad de tiempo, un mayor número de interrogantes más específicos sobre dominios cada vez menores de la naturaleza, y así sucesivamente se acelere la expansión del conocimiento. Al mismo tiempo, la especialización dificulta la aplicación del conocimiento, tanto en la ingeniería como en otras actividades prácticas, pues éstas requieren el proceso inverso al del descubrimiento científico: la concentración o síntesis en una mente individual del conocimiento disponible en las muchas especialidades que son necesarias para resolver cualquier problema; tanto el diagnóstico como la concepción de soluciones a problemas de ingeniería, actos que constituyen el meollo de la aplicación del conocimiento, implican un proceso de síntesis. Como la naturaleza no reconoce las fronteras arbitrarias que la humanidad adopta al segmentar su saber, cada problema de ingeniería requiere información proveniente de muchas disciplinas o especialidades, y cuando éstas se multiplican es más difícil identificar y sintetizar la información que es pertinente.

Por otra parte, del conocimiento total disponible, sólo una fracción es aplicable a la solución de un problema cualquiera. En el contexto de la creciente segmentación, esa porción corta las fronteras de un número cada vez mayor de disciplinas, y por tanto va siendo cada vez más difícil acceder a ella. El ingeniero, como otros profesionales responsables de aplicar el conocimiento a la solución de problemas, debe entonces buscar casuísticamente la aguja en el pajar: lo pertinente en el cada vez más voluminoso cúmulo de saber disponible. Por esta razón y porque la decisión de qué es pertinente y en qué grado requiere el juicio personal de quien decide, la aplicación del conocimiento tiene siempre una dosis de subjetividad mucho mayor que la que interviene en la generación del mismo. Es válido preguntar: ¿puede la capacidad de síntesis y el juicio experto crecer tan rápidamente como crece la masa de información que hay que cernir para hallar en ella y sus numerosos compartimentos el conocimiento pertinente? De no ser esto posible, la aplicación del conocimiento científico a la solución de problemas prácticos tenderá a retrasarse más y más con respecto a la frontera del conocimiento disponible.

El crecimiento de la complejidad. Otra consecuencia de la expansión del conocimiento es la complejidad. Ésta es distinta de la complicación que proviene del conocimiento creciente y crecientemente segmentado. La segmentación impone dificultades de carácter cuantitativo al uso del conocimiento, en tanto que la complejidad introduce otras, ahora de naturaleza cualitativa. Una de ellas aparece porque usar más conocimiento significa formular los problemas con un número mayor de variables

explícitas, cada una de las cuales guarda interrelaciones directas o indirectas con variables adicionales. Se hace así más intrincada la red de interacciones y ciclos de realimentación entre las variables, mayor la presión (incluso social) para incorporar otras supuestamente importantes, más compleja y costosa la formulación y solución de cada problema y, paradójicamente, más grande la cantidad de conocimientos que deja de considerarse aunque sea también mayor el que se incluya. El crecimiento exponencial del costo de los servicios médicos como consecuencia de la especialización es un buen ejemplo de este proceso de crecimiento de la complejidad por motivos cuantitativos y cualitativos.

Además, el mundo mismo se vuelve más complejo, más sofisticado, conforme sociedad e individuos poseen más información. Esto es, el conocimiento modifica a su objeto: no sólo es más complejo plantear y resolver problemas cuanto más conocimiento se incorpora en su formulación, sino que los problemas que hay que resolver son también intrínsecamente más sutiles y difíciles. Aparece entonces otra paradoja: la sociedad demanda soluciones no más complejas, sino al contrario, más sencillas, o más duraderas, o más cabales, y esto exige incorporar más conocimiento y procesarlo de modos más complejos. Cada vez es más evidente la insuficiencia de las soluciones que sólo son técnicamente correctas. Salvo en los libros de texto, no hay problemas prácticos que sean puramente técnicos o tecnológicos; todos tienen componentes que requieren además conocimiento económico, sociológico, político, ecológico, psicológico, etc. Simplificaciones que alguna vez pasaron por válidas están dejando de serlo desde que los potencialmente afectados disponen de conocimiento que les permite, también a ellos, saber, o al menos dudaría presionar. Lidar con todo esto exigirá que sigan desarrollándose las teorías de la complejidad, formas de usarlas en la práctica y personas versadas en aplicarlas, pero no sólo especialistas en cada uno de esos campos, sino individuos con capacidad de sintetizar respuestas integrales a los respectivos problemas prácticos. No solamente seguirá habiendo necesidad de individuos con saber, sino con sensibilidad y empatía, intuición y buen juicio, con genio para obviar lo nimio, resolver lo sustancial y comunicar sus propuestas en un entorno socio- técnico de alta complejidad, sino que en las profesiones éste será el tipo más urgentemente requerido, a despecho de la inevitable especialización de la mayoría.

La aceleración de la obsolescencia. También implica un costo incremental el hecho de que las soluciones se vuelven obsoletas más rápidamente a causa de la velocidad a la que cambia el conocimiento, y a su vez el mundo impulsado por éste. Lo que se concibe como solución a un problema funcionará en el futuro, pero se diseña con el saber de hoy y para las circunstancias que hoy se prevén; por tanto, esa solución será válida si las previsiones se mantienen; pero el mundo cambia cada vez con mayor rapidez en todos sus aspectos. Cuando la velocidad de cambio del entorno social era mucho menor, las soluciones eran más duraderas y, por consiguiente, resultaba menos imperativo buscar explícitamente que éstas fuesen adaptables a cambios eventuales. Además, la complejidad y la rapidez de cambio potencian el riesgo de que algunas soluciones en realidad no lo sean, sino que desencadenen resultados a la vez imprevistos y súbitos. Por tanto, antes no era necesario introducir explícitamente la incertidumbre de los escenarios futuros en el planteamiento de los problemas (un motivo más de complicaciones y costos). Para colmo, no

podemos evitar el temor de una catástrofe si decidimos usar lo que sabemos para manipular ciertos sistemas globales, como el clima, muy sensibles a la modificación menor de factores locales; ante tales sistemas lo inteligente es, por tanto, la abstención precautoria.

Así pues, moderemos nuestro optimismo: el poder del conocimiento no tiene el campo libre, pues está creando de modo endógeno sus propias contrapartidas. La especialización, la complejidad de nuestros modelos de la realidad y la corta vida de nuestras soluciones contrarrestan el poder que el propio saber nos da. Ello no augura por fuerza que tal poder se esterilizará; pero debe movernos a considerar que, pese a la fascinación que en nuestro tiempo ejerce el conocimiento, hay obstáculos impuestos por la dificultad creciente de aplicarlo y, en ciertos casos, por el temor a las consecuencias de usarlo para intervenir en sistemas muy sensibles. Hubo tiempos durante los cuales la expansión del conocimiento se podía traducir en un crecimiento proporcional del poder de la humanidad; hoy estamos entrando en una era diferente, en que la dificultad de movilizar todo el acervo disponible y el temor a consecuencias no intencionales produce rendimientos prácticos decrecientes.

## **5. LAS DIFERENCIAS ENTRE CIENCIA E INGENIERÍA**

En todos los tiempos los más destacados ingenieros han tenido como axioma que es deseable ejercer la ingeniería en un campo más bien amplio que estrecho. Procede preguntarse por qué, pues esta noción contrasta con la ventaja de la especialización que la ciencia ha hecho evidente durante más de tres siglos, y que es fuertemente propugnada por los profesionales de la investigación científica.



El hecho de que una y otra propuesta se contrapongan, pero cada una haya mostrado ser idónea en su propio campo, se explica por la naturaleza distinta de la ingeniería y la ciencia, que podemos apreciar nítidamente si revisamos los procesos intelectuales de la ingeniería descritos en los capítulos iii a y y los contrastamos con lo dicho de la ciencia en el capítulo presente.

En efecto, la ciencia se ocupa de descubrir cómo y por qué funcionan las cosas; lo hace mediante experimentos y observaciones repetibles y con pleno control de las variables que intervienen. En cambio, lo que compete a la ingeniería no es descubrir y describir el funcionamiento del mundo, sino cambiarlo mediante diseños que operen eficazmente para los fines deseados, y a veces puede lograrse que las cosas funcionen aunque la ciencia no pueda explicar por qué.

Por otra parte, que el diseño propuesto para un puente, una presa, un edificio o una nave espacial sea capaz de soportar exitosamente las inciertas acciones que sobre él pueden incidir durante su vida útil no es una cuestión que alguien pueda demostrar científicamente que ocurrirá; se trata más bien de una convicción a la que los ingenieros responsables de dichos diseños llegan basándose en ciertas deducciones teóricas y/o resultados experimentales interpretados a la luz de los precedentes de la profesión. Esa subjetividad implícita en la percepción, el discernimiento, las inferencias y la interpretación personal del sujeto —el ingeniero— es una de las diferencias más importantes entre la ingeniería y la ciencia.

La ciencia busca explicación para todos los fenómenos, pero su gran poder proviene de su reduccionismo; esto es, de no pretender explicarlo todo a la vez, sino tomar en cada ocasión una porción pequeñísima de la realidad, bien delimitada y aislada de perturbaciones externas, a fin de hacerla susceptible de experimentación, observación y medición confiables; tras pocas repeticiones de tal experimento se puede obtener una conclusión de validez general sobre la manera en que funciona esa minúscula porción del mundo. Para ampliar el conocimiento del universo basta tomar otras pequeñas porciones de él y volver a aplicar el mismo método. Esto es lo que hace del método científico un instrumento tan poderoso, “la estrategia de investigación más fructífera jamás inventada

Por el contrario, la función central de la ingeniería no es explicar fenómenos sino controlarlos o usarlos para fines prácticos; esto es, lidiar con ellos, estén o no explicados científicamente. La ingeniería no resuelve cuestiones generales, sino problemas específicos en su particular circunstancia; poder hacerlo depende críticamente de no aislar de su entorno el proyecto, no soslayar en el momento del diagnóstico la influencia de ningún factor probable, ni olvidar en la etapa de diseño las condiciones inciertas que pudieran afectar a tal proyecto en el futuro. En otras palabras, la ingeniería no puede ser reduccionista, sino totalizadora o integradora; no puede dividir el problema en pedazos ni aislarlo de sus circunstancias particulares, sino resolverlo integralmente y en su contexto.

Por todo eso, propugnar la especialización si se trata de hacer investigación científica, y desaconsejarla en la práctica de la ingeniería, buscando ejercer esta profesión en un campo más bien amplio, son

actitudes opuestas entre sí, pero cada una con plena justificación en su respectivo ámbito y solamente en él.

Desde que el método científico se volvió el modo dominante de generar nuevo conocimiento, la tendencia a la especialización de la ciencia ha hecho surgir nuevas disciplinas o especialidades científicas motivadas precisamente por las necesidades de los ingenieros. Se trata de las llamadas ciencias de la ingeniería, que aportan conocimientos útiles para que el ingeniero pueda contender mejor con sus propios problemas. Las ciencias de la ingeniería son disciplinas ejercidas por especialistas, muchos de ellos con una formación inicial como ingenieros. En general, estos especialistas no están interesados en la práctica de la profesión, sino en hacer avanzar el conocimiento que es relevante para la ingeniería. Lo hacen trabajando en el seno de grupos e instituciones académicas y, por supuesto, sus actividades no difieren en nada de las que realizan otros científicos. Tal es la investigación en las ciencias de la ingeniería que, en efecto, es idéntica al resto de la actividad científica, tanto en sus procedimientos como en la naturaleza de sus resultados. La investigación en las ciencias de la ingeniería sólo se distingue de la que se hace en el resto de las ciencias en dos aspectos: el criterio con que se escogen los problemas a investigar y los atributos de sus soluciones. Se busca no solamente generar nuevo conocimiento, sino que éste contribuya de inmediato a tornar viables o mejores las respuestas de los ingenieros a las necesidades sociales; para ello se escogen los temas que en el momento pueden incidir más sobre tales respuestas, y se prefiere en cada caso la solución que, por su sencillez, puede ser adoptada con más facilidad por los ingenieros de la práctica profesional.<sup>47</sup>

Ciencia e ingeniería son, pues, actividades muy distintas. Empero, la segunda usa conocimientos provenientes principalmente de la primera, y ambas coinciden en su exigencia de racionalidad, que consiste, nada menos pero nada más, en evitar contradicciones internas en el conjunto de los supuestos, procedimientos y conclusiones de los procesos intelectuales que realizan. Y aun en esto surge una diferencia: la racionalidad es necesaria y suficiente para hacer ciencia, mientras que para hacer ingeniería la razón no basta, según se discute en el capítulo V.

## **6. ¿HAY IDEOLOGÍA EN LA INGENIERÍA Y LA CIENCIA?**

El concepto que la mayoría de la gente tiene de la ingeniería y la ciencia es que ambas son actividades objetivas por excelencia, y lo que hasta aquí hemos dicho en este capítulo no contradice explícitamente tal noción, aunque tampoco la ayala. Por su parte, científicos e ingenieros suelen complacerse de que su actividad sea vista por los demás como una expresión objetiva de la realidad y sus leyes; es decir, como algo ideológicamente neutro. Por supuesto que no hay tal neutralidad, como tampoco puede existir en ninguna otra cosa producida por humanos, pero lo extendido de la noción de que ciencia e ingeniería están libres de “contaminación” ideológica ha determinado que el tratamiento del tema en la literatura científica sea muy raro.

Para que el análisis de esta cuestión no resulte arbitrario debemos comenzar por definir lo que entendemos por ideología. Los diccionarios la definen como el conjunto de ideas o creencias de un individuo o un grupo

---

<sup>47</sup> D. Reséndiz, “La importancia de otros en mi contribución a la ingeniería de cimentaciones”, en Descubrimientos y aportaciones científicas y humanísticas mexicanas en el siglo xx, Fondo de Cultura Económica, México, 2007.

en especial que condicionan sus actitudes políticas y sociales. La definición puede precisarse un poco más agregando los siguientes elementos postulados por Emilio Rosenblueth:<sup>48</sup> a) la ideología es un conjunto de axiomas difícilmente renunciables (o dogmas) capaz de mover a la acción y que cada persona o grupo social adopta como guía de sus decisiones; b) sería excesivo pedir que el conjunto de axiomas que constituyen una ideología fuese absolutamente coherente o libre de contradicciones, pues por tratarse de creencias con el contenido emocional propio de cada persona y casi irrenunciables, la evidencia de contradicción empírica o lógica no basta para modificarlos; c) por otra parte, sin cierto grado de coherencia, tales axiomas tampoco podrían constituir una ideología, pues no permitirían actuar.

Así pues, la ideología es una visión subjetiva más o menos distorsionada de la realidad, que sirve a un individuo o un grupo como regla sencilla de decisión y que suelen eximirlo de un análisis más riguroso ante cuestiones que le exigen actuar. El grado en que una ideología distorsiona o simplifica la realidad depende del cuidado racional que el sujeto ha puesto en integrarla o adoptarla y, por lo mismo, suele ser mayor en las ideologías de grandes grupos sociales que en las de los individuos, sobre todo si éstos son cultos, cuidadosos y autocríticos. Es de suponerse que todos tenemos una ideología, incluso quienes nunca lo han pensado y por tanto no son conscientes de ello; si no la tuviéramos, nada nos impulsaría a la acción y seríamos absolutamente apáticos o indiferentes ante todas las cuestiones relacionadas con nuestros semejantes. Lo que cada individuo sostiene como verdades evidentes constituye su ideología.<sup>49</sup> Quienes durante mil años, entre los siglos y y xv de nuestra era, sostenían con san Agustín que estudiar la naturaleza era distraer la mente en actividades estériles, en virtud de que el único objeto digno de estudio era Dios, estaban expresando su ideología; lo mismo ocurre hoy cuando algún científico dice que la ciencia es una actividad absolutamente objetiva. Y el hecho de que casi todo el mundo occidental creyera en aquella época lo mismo que san Agustín, y casi todos nuestros contemporáneos crean como muchos científicos e ingenieros en la objetividad de la ciencia y la ingeniería, no quita a dichas creencias su sesgo.

En el capítulo xii puede verse que la ideología de una sociedad se manifiesta en los llamados valores sociales, creencias axiomáticas sobre lo bueno y lo malo, que a su vez son influidas por la tecnología, y que finalmente condicionan las decisiones éticas, como se explica en el capítulo xi. En conclusión, no hay posibilidad de que algo humano esté libre de ideología, pues las múltiples interconexiones de la trama social hacen que cada subsistema reciba diversos tipos y grados de realimentación proveniente de otros subsistemas.

Para percatarnos de que la ideología influye y está presente en la ciencia y la ingeniería comencemos por no confundir dichas actividades con sus productos, que son, respectivamente, el conocimiento científico y las creaciones materiales que la humanidad ha acumulado y sigue produciendo. La ciencia y la ingeniería como tales son actividades; no son productos, sino procesos. En particular, la ciencia no es el conjunto de respuestas que esta

---

<sup>48</sup> E. Rosenblueth, Sobre ciencia e ideología, basado en las conferencias del 5 y 7 de junio de 1979 como miembro de El Colegio Nacional, Fundación Javier Barros Sierra, A. C., México, 1980, 83 pp.

<sup>49</sup> E. Rosenblueth, op. cit., pp. 14-15.

actividad ha generado, sino una búsqueda, que comienza con una pregunta que inquieta o interesa al científico, quien, por tanto, busca responderla mediante el método experimental o científico. Análogamente, la ingeniería no es el acervo de creaciones materiales que el hombre ha ideado y producido para satisfacer lo que considera sus necesidades, sino los procesos intelectuales e instrumentales que se desarrollan para satisfacer esa necesidad.

La ideología está presente en la ciencia porque el impulso para emprender una investigación es la pregunta que el científico y/o la comunidad de sus pares y/o la sociedad a la que uno y otra pertenecen escogen para responder entre la infinidad de preguntas posibles que la ciencia aún no ha respondido, elección que necesariamente tiene motivaciones o condicionantes subjetivos o ideológicos. Igualmente, puesto que las necesidades humanas no representan un estado de la naturaleza, sino un sentimiento de insatisfacción de alguien por tal estado, podemos decir que la ideología está presente en la ingeniería desde el momento en que el ingeniero asume que cierta necesidad material amerita satisfacerse. Tanto las preguntas que se estima pertinente investigar mediante la ciencia como las necesidades que se busca satisfacer mediante un proyecto de ingeniería son en cierta medida asuntos subjetivos influidos (cuando no determinados) por lo que alguien considera deseable, legítimo o posible, es decir, por una ideología.

Es cierto que una vez definida la pregunta a investigar científicamente, o la necesidad social a satisfacer mediante la ingeniería, los pasos y criterios con los que procede el científico o el ingeniero tienen que ajustarse a los hechos y a lo que se sabe de ellos, lo que da márgenes muy angostos para la subjetividad; empero tales márgenes nunca dejan de existir, sobre todo en la ingeniería, según lo expuesto en los capítulos u a y. Pero más importante que eso es el hecho de que las preguntas que se hace la ciencia y los problemas que busca resolver la ingeniería están determinados o condicionados por la ideología de quienes hacen las preguntas o plantean los problemas, pues esto último determina la dirección en que una y otra avanzan.

## ***VIII. Desarrollo sostenible e ingeniería***

### **1. LA PERTURBACIÓN DEL ENTORNO POR EL HOMBRE**

La modificación del entorno natural y social por la ingeniería es no sólo una consecuencia inevitable, sino un propósito expreso de los proyectos que esta profesión emprende, pues cada uno de ellos busca superar alguna insatisfacción humana con las condiciones prevalecientes. Más aún, cualquier interacción del hombre con el mundo, sea diseñada o inercial, bien o mal concebida, planeada o improvisada, modifica de algún modo dichos entornos. De aquí proviene la más evidente responsabilidad de la ingeniería, que por simple sentido común exige no emprender ningún proyecto que cause daños injustificados en la naturaleza y la sociedad; para ello primero se deben identificar diversas alternativas que cumplan los objetivos expresamente deseados del proyecto, luego revisar los efectos de cada una de ellas y, finalmente, escoger la que haga positiva y máxima la diferencia entre beneficios y costos.

Es claro que llevar a la práctica lo indicado en el párrafo anterior no es fácil, pero precisamente para tal fin es que la ingeniería existe. El análisis y la comparación de alternativas debe considerar no solamente los beneficios y los costos directos, sino también los indirectos, y no nada más los inmediatos, sino también las repercusiones positivas y negativas que pueden ocurrir a diversos plazos en el futuro; más aún, los beneficios y costos que cada proyecto genere deben contabilizarse a valor presente mediante la aplicación de cierta tasa de descuento, ya que el mismo beneficio o costo tiene un valor mayor si se materializa hoy que si lo hace en el futuro, y en este segundo caso su valor se irá reduciendo conforme sea más largo el plazo en que ocurre (esto lo saben bien tanto quienes están dispuestos a pagar intereses por un crédito que les permite comprar hoy mismo lo que necesitan, como quienes otorgan el crédito y cobran los intereses). Además, será necesario que tras su diseño y construcción el proyecto sea objeto de seguimiento y se corrija cualquier tendencia que lo desvíe de la trayectoria deseable.

En el pasado no siempre se procedió de la manera indicada en los dos párrafos anteriores, ni hubo conciencia de que así debiera hacerse, sea en proyectos de ingeniería o en cualquier otro campo de la actividad humana. Mientras las tasas de consumo o destrucción de los recursos naturales eran pequeñas en comparación con la disponibilidad estimada de éstos, no hubo incentivos para reducirlas, pues tal reducción implicaba un costo o un esfuerzo que no parecía justificado. Hoy, en cambio, muchos recursos naturales están tendiendo a agotarse peligrosamente, lo que justifica proceder de otro modo para evitar ese agotamiento, incluso pagando costos altos siempre que sean menores que el de quedarse sin los respectivos recursos.

El riesgo de desequilibrios ambientales, junto con la gran desigualdad entre los sectores sociales prósperos y los desposeídos de todo, constituyen los problemas más grandes que la humanidad tendrá que enfrentar en plazo perentorio para asegurar su futuro. Como de hecho no se trata de problemas independientes, el de la justicia social estará siempre como telón de fondo en lo que aquí diremos sobre la protección del ambiente natural. En las circunstancias actuales, ambos males se podrán ir atemperando en la medida en que haya acuerdo amplio sobre el sentido que deba darse al proceso que hemos dado en llamar “desarrollo”

## **2. ¿EN QUÉ CONSISTE EL DESARROLLO?**

Las consecuencias de concebir el desarrollo de manera errónea han sido muy negativas. El desarrollo, sea de los individuos o las naciones, es intrínseco a los seres humanos, no externo a ellos. Así como un niño no puede delegar en nadie la tarea de aprender, el desarrollo de una comunidad no puede ocurrir sin que se modifique algo inherente a las personas que la integran. Otro grave desacierto consiste en concebir el desarrollo como un proceso de acumulación de riqueza medida en términos convencionales. Persiguiendo este espejismo se ha deteriorado la calidad de vida de cientos de millones de seres humanos y se ha propiciado el dispendio y la pérdida de multitud de bienes tanto naturales como culturales (intangibles algunos de estos últimos, como la costumbre de reflexionar para hacerse cada quien una idea propia del mundo y no adoptar apresuradamente la impuesta por la propaganda). Así nació y crece el culto al consumo y a la riqueza por la riqueza misma.<sup>50</sup>

El desarrollo es asunto de capacidades humanas, no de riqueza material. Se asocian riqueza y desarrollo porque éste incrementa las capacidades humanas, que a su vez suelen producir riqueza. Pero la riqueza sin desarrollo es una satisfacción efímera y ficticia que termina por sacrificar el futuro de la generación presente y las venideras en aras de un consumismo que está agotando numerosos recursos naturales y amenazando la estabilidad de sistemas vitales para la humanidad entera, como el clima y todo lo que de él depende. Así pues, un individuo o un país se desarrollan solamente cuando son capaces de mejorar su calidad de vida mediante decisiones y acciones propias. Hasta cierto límite, la riqueza está correlacionada con el desarrollo, pero nunca es equivalente a él; hay una

---

<sup>50</sup> No insinúo que la riqueza deba aborrecerse, sino que ha de valorarse en función de lo que agrega a nuestra calidad de vida, y de ese modo debe priorizarse equilibradamente al lado de nuestros diversos objetivos. Por ejemplo, debemos comprender que la riqueza, si bien deseable, no puede ser fuente de la excelencia, en tanto que la excelencia sí puede ser fuente de riqueza.

relación más estrecha entre desarrollo y educación (en el sentido de capacitación, tanto intelectual como práctica y laboral) que entre desarrollo y recursos económicos, pues éstos sin educación no permiten mejorar la calidad de vida, en tanto que aquella puede servir incluso para allegarse recursos económicos. Por lo demás, cada quien decide lo que para él es desarrollo según su propia noción de lo que da calidad a su vida.

Ahora bien, todo ser humano requiere ciertos satisfactores básicos que en su nivel mínimo pueden ser casi homogéneos (alimento, vestido, alojamiento); logrados éstos, cada uno de nosotros elige bienes adicionales diferentes para mejorar su calidad de vida según aquella noción propia, aunque la globalización tiende a homogeneizar también estos satisfactores electivos. Entonces cobra sentido estadístico medir la calidad de vida mediante el valor económico de los bienes a los que, en promedio, tiene acceso una población, y el ingreso per cápita se vuelve un indicador del desarrollo. Pero aun así caben algunos matices, pues hay bases para sostener que a) no sólo el consumo sino también la idiosincrasia de un pueblo influye en su calidad de vida, y b) cuando el consumo crece más allá de cierto límite, la calidad de vida ya no mejora o lo hace con gran dilapidación de recursos naturales. Por tanto, no hace falta renunciar al desarrollo, sino evitar el desperdicio y la dilapidación, para que un mayor número de generaciones futuras siga teniendo buena calidad de vida.

El desarrollo plantea a la humanidad en general y a la ingeniería en particular problemas y dilemas que se están intensificando. El tema es motivo tanto de debates irracionales como de nuevas actitudes esperanzadoras e innovaciones prácticas. Ilustraremos lo que está ocurriendo mediante el ejemplo de una de las creaciones más antiguas de la ingeniería, las presas, obras estrechamente ligadas al proceso de civilización de la especie humana desde las épocas más remotas hasta nuestros días; por la importancia de sus contribuciones a la supervivencia y la calidad de vida de la especie humana, y por la magnitud y trascendencia de los efectos negativos que un inapropiado diseño de ellas puede producir, las grandes presas son, a pesar de su largo historial, uno de los mejores ejemplos de la compleja problemática de la ingeniería moderna.

### **3. UN EJEMPLO: EL DEBATE SOBRE LAS GRANDES PRESAS**

Las presas suelen generar tanto valiosos satisfactores como riqueza y, por tanto, pueden contribuir al desarrollo; pero según lo dicho aquí mismo, para que estas contribuciones efectivamente ocurran se requiere que dichas obras a) produzcan satisfactores valorados por los habitantes de la región y el país en que se ubican, y b) operen rentablemente considerando todos sus costos y beneficios significativos, directos e indirectos. Los adjetivos todos y significativos tienen aquí mucha importancia, como se verá adelante.

Presas de dimensiones muy diversas se han construido durante toda la historia de la civilización, con características que han evolucionado a la par que los conocimientos y la tecnología con que se diseñan y erigen. La omnipresencia de las presas en la historia y las grandes dimensiones que han llegado a tener obedecen a razones como las siguientes: a) la importancia de asegurar el agua para consumo humano; b) el valor que la irrigación agrega a la agricultura; c) el atractivo de generar electricidad a partir de la energía potencial del agua en vez de hacerlo quemando



combustibles; d) la mejora en calidad de vida resultante de estar a salvo de inundaciones; e) el valor de los grandes cuerpos de agua como vías de comunicación y como ambientes para la piscicultura y la recreación, etc. En fin, se construyen presas porque mejoran la calidad de vida, salvo cuando, además de cumplir propósitos como los indicados, producen efectos negativos que anulan o reducen drásticamente sus beneficios netos, y por tanto incumplen una o las dos condiciones indicadas en el párrafo anterior.

En zonas áridas la agricultura sería imposible sin la irrigación basada en el almacenamiento de grandes cantidades de agua. En algunos países casi toda la producción agropecuaria depende de ello. Incluso donde la precipitación anual es abundante puede ser indispensable almacenar agua si las lluvias no están distribuidas en el tiempo de la manera demandada por los cultivos.

Por otro lado, la generación hidroeléctrica es la de más alta eficiencia (superior al 90 por ciento, o el doble de la que tiene la forma más eficiente de generación con hidrocarburos). También es la de más bajo costo total de largo plazo cuando el volumen de agua almacenada o la regularidad del caudal que corre por un río son suficientes para operar sin intermitencias excesivas. La quinta parte de la capacidad de generación instalada en el mundo es de este tipo (casi la misma proporción que en México) y hay potencial para cuadruplicarla en términos absolutos. Este tipo de generación es también el más conveniente para responder a la rápida variación de la demanda eléctrica en horas pico, y tiene potencial muy superior al de otras tecnologías para contribuir al propósito universal de fomentar el uso de fuentes de energía limpias y renovables. Por añadidura, una presa puede diseñarse de modo que cumpla a la vez objetivos múltiples, según las necesidades locales específicas: irrigación, electricidad, dotación de agua para la población y la industria, protección contra inundaciones, etcétera.

Si por tales motivos las presas han sido una respuesta necesaria a la escasez o irregularidad de los caudales de agua disponibles localmente, en el futuro lo serán aún más, pues crecerá la competencia por el líquido y, por tanto, el valor de almacenarlo. En efecto, en muy diversas regiones hay conflictos potenciales por el uso del agua debido a que a) al menos 1000 millones de los habitantes actuales del planeta aún no tienen acceso al agua entubada; b) cerca de 2000 millones carecen de electricidad; c) la agricultura está en pugna por el agua con ciudades cuya dotación es ya insuficiente mientras su población sigue creciendo; d) en numerosas regiones hay riesgos asociados a la calidad del agua que hoy se consume y, por tanto, aumentará la presión sobre otras fuentes;<sup>51</sup> e) muchos acuíferos subterráneos están sufriendo grandes abatimientos cada año y el agua salada los va contaminando incluso en localidades alejadas del mar. Así, el valor del agua no puede sino crecer en el futuro, y con él la competencia por poseerla y la importancia de las presas como medio para este fin.

El manejo racional de esa competencia inevitable exigirá un ejercicio más fino de la inteligencia de todos los partícipes en proyectos que requieran el almacenamiento de grandes volúmenes de agua: mayor

---

<sup>51</sup> 2 Se estima que hay concentraciones excesivas de arsénico en el abastecimiento de agua potable de un total de 50 millones de personas en países tan diversos como la India, Bangladesh, Nepal, Vietnam, China, Argentina, México, Chile, Taiwán, Mongolia y los Estados Unidos (A. M. Chowdury, "Arsenic crisis in Bangladesh", *Scientific American*, vol. 291, núm. 2, Nueva York, agosto de 2004, pp. 70-75).

sensibilidad social y ambiental de las agencias responsables, más conocimientos y capacidades de las profesiones y ciencias que intervienen, mayor honestidad y sentido de justicia de los gobiernos involucrados, además de gran habilidad negociadora de éstos y de las organizaciones internacionales, pues será cada vez más necesario conciliar intereses de diversas naciones. Sin todo eso la avidez por el agua puede conducir a desastres técnicos o políticos y a violencia social cuyo resultado último sería un colapso de la calidad de vida de miles de millones de personas; es decir, la antítesis de lo que la humanidad ha venido persiguiendo desde sus tiempos más remotos.

#### 4. LOS ARGUMENTOS DEL DEBATE

Pese a satisfacer necesidades importantes de la humanidad, las presas de grandes dimensiones han sido muy cuestionadas desde hace dos décadas. Esto hizo que dos organizaciones de perfil muy distinto, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y el Banco Mundial, decidieran en 1997 auspiciar conjuntamente la creación de la llamada Comisión Mundial sobre Presas, con la encomienda de examinar la controversia desde bases objetivas y clarificar los puntos en debate con participación de impugnadores, defensores y expertos en todo lo relacionado con estas obras. La comisión publicó en noviembre de 2000 un informe referido a lo que ella misma definió como grandes presas; esto es, las de al menos 15 metros de altura o con almacenamiento de agua superior a tres millones de metros cúbicos.<sup>52</sup>

Los impugnadores de las grandes presas sostienen que los efectos sociales y ambientales negativos en algunas de estas obras han rebasado o reducido sustancialmente sus beneficios. Los daños principales que se les atribuyen son a) desalojar del embalse a miles de familias que luego quedaron al margen de los beneficios del proyecto y aun sufrieron el agravamiento de su pobreza; b) destruir grandes extensiones de ciertos ecosistemas en el embalse y en las zonas por desarrollar aguas abajo; c) exceder los costos de construcción previstos y agravar la deuda externa de los respectivos países cuando éstos, como es usual, tomaron créditos internacionales para financiar las obras y, en fin, d) distribuir en forma no equitativa los beneficios y costos de los proyectos.

En un buen número de casos del pasado estos señalamientos son válidos. Por ejemplo, cierta presa en Asia se concibió con objetivos múltiples que incluían agregar capacidad de generación eléctrica por 1 450 megavatios, irrigar 1 900 hectáreas, dotar de agua potable a 1 800 pequeños poblados y proteger de inundaciones a 200 de ellos. La justificación del proyecto parecía obvia, pero en su planificación no se previó lo que implicaba reubicar satisfactoriamente a 40000 familias desplazadas por el llenado del embalse. Años después de la conclusión de la obra apenas habían sido atendidos uno de cada cuatro afectados y muchos aún no recibían el agua para irrigación que se les había ofrecido.<sup>53</sup> Experiencias similares en varios países dan bases para cuestionar los métodos usuales de planificación de estos proyectos. Quienes han documentado con rigor tales casos han hecho una contribución valiosa para evitar que, en aras del desarrollo, se atropelle a la gente y se deprede la naturaleza.

En cuanto al monto de las inversiones, es cierto que las grandes presas conllevan el riesgo de incurrir en costos imprevistos de construcción muy altos en términos absolutos, pues en ellas, con mayor probabilidad que en otros proyectos, pueden descubrirse durante la ejecución problemas geológicos de solución onerosa. Sin embargo, que el presupuesto de 81 grandes presas analizadas por la comisión se haya excedido 21% en

---

<sup>52</sup> World Commission on Dams, *Dams and Development: A New Framework for Decision Making*, Earthscan Publications, Londres, noviembre de 2000.

<sup>53</sup> E. Thomas, "Large dams: global rethink International Power Generation, Surrey, Inglaterra, octubre de 2001, pp. 16-18.

promedio<sup>54</sup> parece apuntar hacia otra causa: insuficiencia de los estudios geológicos previos. Esta limitación es usual porque los responsables suelen eludir gastos antes de que se tome en firme la decisión de llevar a cabo el proyecto, y una vez que la decisión ocurre se omiten exploraciones y estudios porque sobrevienen presiones políticas para acelerar la construcción. El efecto neto es terminar las obras con un sobregiro presupuestal y luego una rentabilidad deficitaria, que es lo que suelen señalar los críticos de tales proyectos. La solución mejor avalada por la experiencia consiste en invertir con oportunidad el tiempo y los recursos necesarios para dilucidar cualquier duda geológica que pueda modificar significativamente el costo final de la obra; que esto tiene sentido se ve al comparar el sobregiro observado (21%) con el costo medio de los estudios previos necesarios (1 a 3% del costo total de una obra de este tipo). Otra opción válida podría ser cuantificar los riesgos asociados a las incógnitas geológicas no despejadas, incorporarlos a la evaluación económica y concebir una estrategia para adaptar el proyecto a la información que surja conforme avance la construcción. Lo no válido es soslayar nuestra ignorancia y proceder como si no existiera.

Hay, pues, razones objetivas y no sólo animosidad en el cuestionamiento de algunas grandes presas en todo el mundo. Sea que nos refiramos en particular a las grandes presas, o en general a cualquier proyecto con amplias repercusiones económicas y sociales, positivas y negativas, en el fondo de la cuestión que aquí se discute subyacen dos asuntos de enorme importancia. Uno de ellos es tan antiguo como la humanidad, pues se refiere a la justicia; es decir, a decisiones en que se distribuyen costos y beneficios cuantiosos, que para algunos grupos sociales implican obtener beneficios tangibles y para otros significan ganar o perder oportunidades críticas de desarrollo. El otro asunto es, por el contrario, novedoso, pues llegó a la palestra internacional hace menos de dos décadas: la sostenibilidad del desarrollo. El asunto de la justicia queda abarcado por la ética, que se discute en el capítulo xi; en lo que sigue nos limitaremos a analizar la sostenibilidad.

## **5. EL CONCEPTO DE DESARROLLO SOSTENIBLE**

El concepto de sostenibilidad como criterio para la selección de proyectos fue propuesto por la Comisión Mundial sobre el Ambiente y el Desarrollo, también llamada Comisión Brundtland, por el apellido de quien la presidió. La propia comisión definió como desarrollo sostenible aquel que usa los recursos naturales de modo que se satisfagan las necesidades humanas de la actualidad sin disminuir las oportunidades de generaciones futuras al disfrute de los mismos recursos.<sup>55</sup>

El concepto captó de inmediato la imaginación de muchos por su poder sugestivo y revelador, que propone un objetivo de enunciado sencillo, comprensible por todos y capaz de motivar. Empero, tiene limitaciones operativas. Consideremos cualquier recurso natural puesto en juego por un proyecto e imaginemos cómo cumplir las dos condiciones indicadas en la definición de la sostenibilidad; esto es, asegurar que se satisfacen las presentes necesidades de ese recurso y que a la vez se preserva la

---

<sup>54</sup> World Commission on Dams

<sup>55</sup> World Commission on the Environment and Development, *Our Common Future*, Oxford University Press, Oxford, 1987.

posibilidad de que también las generaciones futuras puedan disponer de él. Encontraremos que cuantificar la disponibilidad actual y las presentes necesidades humanas del recurso en cuestión es una tarea asequible; pero dilucidar si lo que decidimos hacer hoy disminuye la oportunidad de que generaciones venideras dispongan del mismo recurso es una cuestión de complejidad mucho mayor. En efecto, determinar la disponibilidad futura de un recurso natural y las necesidades que de él se tendrán dentro de muchos años exige adoptar numerosas hipótesis sobre la evolución que tendrán tanto los métodos de exploración y explotación del recurso como las maneras en que se le utilizará y las alternativas para suplirlo. En consecuencia, cualesquiera estimaciones que podamos hacer de la disponibilidad y la necesidad futuras de un recurso natural estarán sujetas a incertidumbres de magnitud creciente con el plazo para el que estemos haciendo las previsiones.

Es obvio entonces que hay mucho que avanzar en los métodos para aplicar operativamente los criterios de sostenibilidad. Este desafío atañe a varias profesiones, especialmente la ingeniería y la economía, pero también a las ciencias; por ejemplo, a la ecología y otras ramas de la biología en cuanto se refiere a desentrañar la dinámica de los ecosistemas, la previsión de su comportamiento y el control de su evolución ante las perturbaciones que los seres humanos inducimos en ellos; a la sociología y la psicología social en lo que toca a mecanismos eficaces de participación, inducción y compromiso colectivo con la sostenibilidad del desarrollo, etc. La comunidad internacional científica e ingenieril está activa en la búsqueda de soluciones a estos problemas.<sup>56</sup> Entre tanto, la sencillez enunciativa del concepto de sostenible continuará ofreciendo dificultades en su aplicación práctica, lo que propiciará ciertas actitudes políticas de absoluta vacuidad, como declararse en pro de la sostenibilidad pero no poder distinguir entre los proyectos que la tienen y los que no.

A pesar de todo, la noción de desarrollo sostenible está ejerciendo influencia benéfica sobre el comportamiento humano, como en general ocurre con todas las grandes ideas sobre lo deseable, incluso si son utópicas (y no se ha probado si la definición de la Comisión Brundtland es o no una utopía). No obstante su debilidad operativa y el abuso que de sus términos se hace cotidianamente en los medios de comunicación y en los discursos políticos, el concepto de desarrollo sostenible está haciendo cambiar algunos de los más dañinos patrones de producción industrial y agropecuaria, con independencia de que los nuevos modos de desarrollo adoptados efectivamente sean sostenibles; éste es un buen ejemplo de que cuando aspiramos a lo óptimo usualmente no alcanzamos nuestro objetivo, pero mejoramos nuestro desempeño. Vale la pena por eso mantener vigente la aspiración al desarrollo sostenible, y a la vez seguir buscando enfoques prácticos que permitan lograrlo.

## **6. EL DESARROLLO SOSTENIBLE EXIGE ESFUERZO**

A fin de precisar ideas, consideremos los pasos necesarios para analizar si un proyecto es sostenible o no. Pensemos en una presa. Lo primero sería fijar con buen juicio las fronteras del sistema ecológico y social a considerar. En el pasado lo más usual ha sido evaluar estos proyectos uno a uno, limitando el análisis al territorio directamente afectado por las obras; tal delimitación es demasiado estrecha. Es indispensable que las fronteras del sistema cuya sostenibilidad debe estudiarse se extiendan mucho más; si se trata de sistemas hidráulicos han de abarcar cuando menos la cuenca hidrológica completa en que se ubica el proyecto, y si son de otro tipo de proyectos, habría que adoptar un criterio equiparable para fijar las fronteras.

Delimitado el sistema, procede evaluar no proyectos individuales, sino conjuntos de ellos, a fin de considerar sus efectos recíprocos y seleccionar con visión integral el conjunto de obras más deseable; es decir, el que tenga la mejor expectativa de beneficios netos y sostenibilidad. Para cada conjunto alternativo de proyectos habría que hacer entonces una lista

---

<sup>56</sup> The Initiative on Science and Technology for Sustainability, "Science and tech for sustainable development", ICSU Series on Science for Sustainable Development, núm. 9, International Council for Science, París, 2002, 30 pp.

de sus posibles efectos ambientales, sociales y económicos. Esta lista incluiría, además de los beneficios expresamente buscados con el proyecto, otros efectos previsibles, sean positivos o negativos. Si se tratara de presas, los otros efectos podrían ser los siguientes: N1 hectáreas inundadas, con la consecuente sustitución de un ecosistema terrestre con ciertos componentes y características por uno acuático cuyos componentes y características son diferentes; N2 hectáreas de otros ecosistemas perturbados de cierta manera por la desaparición del ecosistema inundado; N3 hectáreas de ecosistemas aguas abajo de la presa cuyo régimen de escurrimientos fluviales se modificará haciendo cambiar la aportación de nutrientes y el equilibrio entre erosión y acumulación en el cauce del río; N4 unidades de volumen anuales de azolves que reducirán progresivamente el volumen útil de agua almacenada; N5 comunidades humanas con un total de x familias o personas que cambiarán sus lugares de asentamiento y sus actividades, modificando a su vez otros ecosistemas, etc. La lista puede resultar enorme según queramos incluir en ella perturbaciones de segundo, tercero, n-ésimo orden, cada vez a plazo más largo en el futuro, pero se puede acotar con sentido práctico.

Definidos en una primera aproximación sus efectos ambientales y sociales, los conjuntos de proyectos podrían afinarse en forma iterativa hasta lograr los mínimos efectos negativos netos. Siempre sería posible mejorar su desempeño ambiental mitigando ciertas consecuencias indeseables mediante acciones positivas de magnitud más o menos equivalente; por ejemplo, reforestar una extensión similar del ecosistema destruido por el llenado del embalse, diseñar la presa y su operación de modo que ésta deje pasar cierto caudal para mantener con alteración acotada los ecosistemas aguas abajo de ella, etcétera.

La posibilidad de mitigar los daños ambientales de una presa hasta lograr que cada uno sea muy pequeño está limitada por el saber disponible sobre la dinámica de los ecosistemas del caso y por el costo de la mitigación. Sin embargo, en general es posible y de rentabilidad atractiva la protección y el mejoramiento de la cuenca, comenzando con acciones para reducir la erosión del suelo en ella antes del llenado del embalse; esto tiene tres efectos altamente deseables: a) preservar o recuperar la diversidad de los ecosistemas; b) conservar o incrementar la tasa de recarga de los acuíferos subterráneos, y c) prolongar la vida útil y aumentar la rentabilidad de la presa por disminución de la tasa de azolvamiento del vaso. Cada uno de estos beneficios tiene alto valor económico, ambiental y social, y su costo puede ser bajo si se consigue la cooperación de las comunidades rurales beneficiadas. La protección de cuencas no solamente contribuye a mitigar el daño de inundar el embalse sino que, por su escala potencialmente mucho mayor, puede agregar beneficios ambientales netos al proyecto. Incluso puede ser una alternativa mejor que la construcción de presas, pues se está perdiendo capacidad global útil desde que el volumen de sedimentos que cada año se acumula en embalses de todo el mundo comienza a ser mayor que el almacenamiento agregado por las nuevas obras que entran en servicio!<sup>57</sup> Puede afirmarse sin la menor duda que, con o sin la construcción de nuevas presas, la protección o mejoramiento de cuencas es una actividad deseable y de alta rentabilidad, sobre todo en las deplorables condiciones que han alcanzado los suelos y los ecosistemas de diversas regiones del mundo.

---

<sup>57</sup> E. 'Thomas, "Large dams: global rethink" art. cit.

## **7. NO TODO PUEDE PREVERSE DURANTE EL DISEÑO**

Por definición, el desarrollo sostenible tiene un propósito transgeneracional. Pero un lapso de varias generaciones es muy grande en comparación con los plazos para los que tiene sentido hacer previsiones detalladas. Como la incertidumbre crece exponencialmente con el plazo para el que planeamos o prevemos acontecimientos, no es útil hacer previsiones en detalle para lapsos demasiado largos. En consecuencia, debe aceptarse que la sostenibilidad de un proyecto no se puede asegurar de una vez y para siempre. Más bien hay que ocuparse de ella de modo incremental, cada vez para el plazo más largo que permita estimar sin excesiva incertidumbre la evolución del proyecto, y luego monitorearlo y reevaluarlo conforme se requiera a fin de detectar si en algún momento tiende a no ser sostenible, en cuyo caso habría que introducir ajustes. En otras palabras, la sostenibilidad debe ser administrada continuamente a fin de mantenerla.



Otras causas pueden obligar igualmente a observar y corregir sobre la marcha cualquier desarrollo a fin de mantenerlo sostenible. Supóngase que en cierta localidad se adoptara un modo particular de vivir y producir que, entre todos los imaginables, diera lugar a una calidad de vida muy satisfactoria con la mínima alteración del ambiente natural. Es claro que dicho tipo de desarrollo ganaría adeptos, por lo que tendería a extenderse a otras regiones y a prolongarse en el tiempo; pero su uso extendido, uniforme y prolongado terminaría por alterar en forma acumulativa algunas condiciones del entorno y, por tanto, no podría mantenerse sin cambio por tiempo indefinido, sino que tendría que irse modificando para corregir sus propios efectos dañinos, sin importar cuán pequeños fuesen éstos por unidad de tiempo o por unidad de producción. Así se demuestra que el desarrollo sostenible es necesariamente evolutivo.<sup>58</sup> A su vez, de esto se desprende que la sostenibilidad es más asequible y robusta si coexisten modos diferentes de desarrollo, todos con efectos negativos acotados y cada uno aplicado en una zona de extensión limitada, pues así pueden contrarrestarse mutuamente los daños inducidos.<sup>59</sup> Esto hace evidentes las ventajas de la diversidad de modalidades de desarrollo para fines de sostenibilidad; siempre es preferible que concurren múltiples modalidades y no una sola, aunque ésta parezca por sí misma muy atractiva.

Así, para lograr un proyecto sostenible no bastan su buena planeación y diseño. Debe preverse además lo que se hará en la etapa operativa, y luego institucionalizarse su gestión ambiental con la participación de expertos; esto es crucial tanto para los fines de la ingeniería como los de la ciencia; es decir, no sólo para el destino de los proyectos específicos de que se trata, sino también para propiciar la generación de nuevo conocimiento básico, pues se ha llegado a la conclusión de que el saber científico necesario para hacer operativo el criterio de sostenibilidad habrá de surgir de la acumulación de resultados de experiencias de campo locales adquiridas en las condiciones y con las variables de cada caso particular.<sup>60</sup>

## **8. UNA DEFINICIÓN OPERATIVA DE LO SOSTENIBLE**

No es suficiente tomar en cuenta en la evaluación de un proyecto todos sus efectos significativos, incluyendo sus externalidades. Por ejemplo, si lo que se evalúa son los costos de destruir un bosque (o los beneficios de conservarlo) no basta con incluir en el análisis los costos o beneficios de todo lo que el bosque aporta a la comunidad global (captura de carbono, biodiversidad), a las poblaciones cuenca abajo (reducción de la erosión y las inundaciones, recarga de acuíferos, purificación del agua) y a los dueños, usuarios o administradores directos de la tierra (productos maderables y otros bienes). Todo esto apenas aseguraría la racionalidad de la decisión de realizar o no el proyecto; pero que éste sea sostenible en el largo plazo dependerá, además, de que se compense a sus propietarios por todos los beneficios locales y no locales aportados por el bosque, que de otro modo será fatalmente sustituido por usos alternativos de la tierra. Hoy todavía no se han encontrado maneras de cumplir ese requisito, ni mediante la

<sup>58</sup> 9H. Brooks, "The concept of sustainable development and environmentally sound technology", *Environmentally Sound Technology for Sustainable Development*, ATAS Bulletin, núm. 7, United Nations, Nueva York, 1992, pp. 19-24.

<sup>59</sup> D. Reséndiz, "Sustainability and the nature of development", *Environmentally Sound Technology for Sustainable Development*, ATAS Bulletin, núm. 7, United Nations, Nueva York, 1992, pp. 13-18.

<sup>60</sup> The Initiative on Science and Technology for Sustainability, "Science and technology for sustainable development", art. cit.

protección y administración gubernamental de los bosques ni a través de los mecanismos basados en el mercado, aunque unos y otros se siguen ensayando.<sup>61</sup> Puede decirse entonces que un proyecto es sostenible si cumple las siguientes condiciones:

---

<sup>61</sup> 12 S. Pagiola, J. Bishop y N. Landeíl-Milis (eds.), *Selling Forest Environmental Services*, Earthscan Publications, Londres, 2002. [Versión en español: *La venta de servicios ambientales forestales*, INE-Semarnat, 2003.]

1. No reduce la diversidad ambiental prevaleciente en su entorno.
2. Con incertidumbre acotada y aceptable, su evolución prevista cumple la definición de la Comisión Brundtland para un lapso largo aunque finito.
3. Es objeto de seguimiento, reevaluación y actualización.
4. Sus reevaluaciones sucesivas confirman que la prolongación del proyecto en el tiempo seguirá cumpliendo las condiciones de sostenibilidad; esto es, no dará lugar al agotamiento de algún recurso natural ni a una ruptura irreversible del equilibrio ambiental, y en caso contrario se adoptan acciones correctivas.

## **9. EL CARÁCTER EVOLUTIVO DE LOS PROYECTOS**

Lo hasta aquí expuesto indica que la complejidad operativa del criterio de sostenibilidad no se debe tanto al gran número de variables que intervienen, sino principalmente al carácter evolutivo o dinámico de los sistemas socio-técnicos o socio-tecnoecológicos; esto es, los que incluyen, además de componentes inanimados, subsistemas ecológicos y sociales. Todos los proyectos de ingeniería tienen en mayor o menor medida los tres tipos de componentes, y el carácter dinámico de su evolución se origina en las mutuas interacciones y realimentaciones que surgen entre naturaleza, sociedad y productos diseñados. En el capítulo XIII se trata el tema con mayor extensión.

Entonces, para aplicar el criterio de sostenibilidad a la evaluación de una presa, que es el tipo de proyecto que hemos venido usando para ilustrar la discusión, se tendría que proceder como sigue:

1. Elaborar un modelo dinámico del sistema presa-entorno y con base en él esmerarse en identificar, caracterizar y cuantificar los efectos directos e indirectos más significativos que podría ejercer el proyecto sobre el entorno natural y social, y viceversa.
2. Concebir medidas para mitigar los efectos negativos identificados.
3. Incorporar honestamente todos los costos y beneficios previsibles del proyecto, directos e indirectos, inmediatos y diferidos, al análisis de su rentabilidad económica.
4. Afinar el diseño por aproximaciones sucesivas hasta lograr que resulte social, económica y ambientalmente sostenible.

De las cuatro tareas indicadas la primera resulta crucial y es la más difícil, dada nuestra limitada capacidad para modelar y prever cómo evolucionarán en el largo plazo los sistemas en que interactúan naturaleza, tecnología y sociedad, cada una con sus mecanismos evolutivos propios y la última con su impredecible voluntad de hacer o dejar de hacer cualquier cosa en el futuro. La composición socio-tecno-ecológica de estos sistemas hace que evolucionen en forma muy difícil de predecir; esto hace preferible darles seguimiento después de haberlos diseñado y puesto en operación a fin de detectar y corregir sus tendencias indeseables; a la vez, es

importante desde el punto de vista científico seguir empeñándose en prever su comportamiento para compararlo con el que se observe en los hechos y así mejorar nuestra capacidad de modelación. No cabe explicar aquí cómo se formulan los modelos matemáticos necesarios; baste decir que éstos sirven para estimar la posible evolución futura de los respectivos sistemas y que para elaborarlos se comienza con un diagrama del sistema socio-técnico de que se trata, del tipo de los presentados en el capítulo xiii, que incluya sus rasgos dinámicos más significativos; es decir, sus ciclos de realimentación o relaciones internas causa-efecto, como el ilustrado en la figura viii. i, que muestra, además de un conjunto de causas y efectos del proyecto, las líneas de causalidad entre unas y otros. Tal esquema se lee como sigue: el proyecto da lugar a costos directos (línea de causalidad 1) y a otros efectos (línea 2), algunos de los cuales producen beneficios (línea 3) y otros se convierten en costos adicionales, casi siempre mediatos (línea 4).

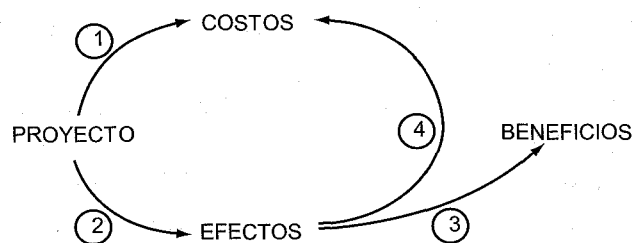


FIGURA VIII.1. *Representación dinámica sencilla de los costos y beneficios de un proyecto.*

Por ejemplo, una presa puede tener entre sus efectos generar electricidad, con sus consecuentes beneficios; pero, además, inevitablemente altera el régimen con el que durante milenios había escurrido el agua en el río y al que ciertas especies vegetales y animales (y quizás algunas comunidades humanas) se habían adaptado. Esas alteraciones involuntarias afectan negativamente a tales especies y comunidades y, por tanto, implican costos adicionales a los producidos por la línea de causalidad 1. Así pues, los de construcción, operación y mantenimiento no son los únicos costos de un proyecto de este tipo, sino que hay otros costos acarreados por la línea 4; estos costos adicionales y aquellos beneficios que no constituyen propósitos principales o directos del proyecto son soslayados por el análisis económico convencional, y por ello suelen llamarse externalidades o costos y beneficios externos.

Ahora bien, cualquier sistema puede representarse con diagramas más y más completos, que a su vez dan lugar a que la evaluación (económica, social o ambiental) basada en ellos dé resultados diferentes. En esto consiste la dificultad práctica de tomar en cuenta todos los efectos significativos de un proyecto al evaluar su sostenibilidad o su rentabilidad. En el capítulo xiii se muestra que en la evaluación de un proyecto cualquiera es posible adoptar representaciones dinámicas del mismo más completas o refinadas que la de la figura viii.i o, a la inversa, otras más simplistas. Finalmente, siempre se requerirá del buen juicio profesional para decidir cuándo se han incorporado ya todos los efectos significativos.

Usualmente el enfoque económico convencional yerra porque no evalúa la rentabilidad a partir de una concepción dinámica del proyecto, como la esquematizada en la figura viii.i, sino con una que es simplista en exceso, pues no incorpora ciclo de realimentación alguno y, por tanto, ignora las repercusiones indirectas del proyecto; es decir, se limita a considerar los beneficios y costos directos, lo que para fines de evaluación implica siempre costos menores (y, por tanto, rentabilidad mayor) que los resultantes de la figura viii.i o de cualquier otra representación más completa de la naturaleza del proyecto. Esto explica por qué la Comisión Mundial sobre Presas encontró que en múltiples casos los proyectos de estas obras no alcanzan la rentabilidad prevista.

Las incertidumbres y aproximaciones de modelación indicadas afectan necesariamente la confianza que podemos asignar al análisis económico. En efecto, aun si se hace un esfuerzo honesto por identificar de la mejor manera las externalidades y por incorporarlas al análisis, es obvio que ellas serán apenas una aproximación más bien burda de las que en los hechos tendrá el proyecto. Por tanto, la rentabilidad es un elemento de juicio importante, pero la decisión de realizar o no una obra de tanta importancia no puede basarse sólo en ese indicador. Aunque éste resulte aceptable, las incertidumbres sobre lo que ocurrirá durante toda la vida útil del proyecto son tan grandes que sus promotores y el ingeniero tienen la obligación moral de plantearse al menos otras dos preguntas antes de tomar la decisión: a) ¿hay alguna sospecha seria de insostenibilidad social o ambiental?, y b) ¿son concebibles proyectos alternativos que cumplan los mismos objetivos principales, que sean similarmente rentables y que impliquen menores riesgos o incertidumbres? La actitud de los responsables de un proyecto ante estas preguntas debe ser de prudencia: en igualdad de otros factores, ha de adoptarse la opción con menores riesgos y dudas.

A su vez, quienes impugnen proyectos en aras de la sostenibilidad están obligados a una actitud de igual responsabilidad y prudencia que la anterior; no habrá justificación para obstaculizar un proyecto cuyos efectos sociales y ambientales se hayan estudiado concienzudamente con la participación de los afectados, si se ha concluido que a) los daños netos a la naturaleza se mitigarán o estarán acotados en niveles que tanto los afectados como los expertos consideran tolerables; b) no hay riesgo de un círculo vicioso desestabilizador del entorno, y c) el proyecto es rentable y sus beneficios se distribuyen con equidad. Cabe considerar al respecto que nuestra especie pudo desaparecer o haberse estancado en los niveles de vida de hace milenios si no hubiera desplegado, además de su gran capacidad de adaptación propia, la voluntad e imaginación necesarias para modificar las condiciones naturales cuando éstas le ofrecían una calidad de vida inaceptable.

En resumen, debemos ser cautos y adaptarnos a formas de vida austeras, pero también tener en cuenta que el desarrollo sostenible no es un concepto absoluto ni un camino predeterminado y único, sino una red de senderos no alternativos, sino complementarios, ninguno de los cuales puede descartarse a priori ni seguirse indefinidamente sin corregir el rumbo sobre la marcha. Cabe esperar que proponentes e impugnadores de proyectos se percaten, unos de la importancia de lograr que el desarrollo sea sostenible, y otros de la relatividad del concepto.

## 10. LECCIONES DE LA HISTORIA

Habiendo escogido el ejemplo de las grandes presas para ilustrar los problemas y dilemas de la sostenibilidad, cabe decir que en todo el mundo hay alrededor de 45000 casos de presas consideradas grandes por su altura (más de 15 metros) o por el volumen de agua que almacenan (tres millones o más de metros cúbicos).<sup>62</sup> Las de mayores dimensiones se erigieron durante el siglo xx, especialmente entre 1930 y 1980. Al final de este periodo los países desarrollados habían concluido ya la mayoría de las que requerían para las necesidades de una población ya entonces casi estabilizada. A la vez, en el resto del mundo la tasa de construcción de nuevas presas grandes se abatió drásticamente; contribuyó a esto la impugnación que comenzaba a hacerse a estas obras, pero influyó más el desplome de la inversión en los países pobres y endeudados, provocado a su vez por la subida drástica de las tasas de interés y la adopción simultánea en casi todos ellos de ciertas políticas macroeconómicas. Sólo China y la India (y en menor medida Brasil, Turquía, Japón y Noruega) han mantenido una política muy activa para aprovechar sus recursos hidráulicos.

El acervo mundial de grandes presas es enorme; por tanto, también es abundante la experiencia que podría servir de base para seguir aprendiendo a evitar los efectos inaceptables de este tipo de proyectos. Sin embargo, la polarización de defensores e impugnadores ha dificultado incluso la clarificación de algunos hechos. La decisión de construir o no una presa ya no es un asunto sólo de costos, beneficios y distribución de ambos, pues cada caso particular se ha vuelto ocasión para exhibir la fuerza con que alguien puede defender ciertos dogmas, o para debatir asuntos sin contacto con la experiencia o la razón. Por eso es valiosa la labor que la Comisión Mundial sobre Presas desplegó para llegar al informe citado, del que se derivan multitud de lecciones de interés práctico, tanto para este tipo de obras como para otros proyectos de ingeniería. Al lado de los ejemplos de daño social y ambiental, grave e innecesario, provocado por algunos de estos grandes proyectos, existen evidencias igualmente sólidas de que esos resultados son evitables si se actúa con rigor profesional y se ponen en juego los conocimientos recientemente desarrollados en torno al concepto de desarrollo sostenible.

Por otra parte, cualquier obra puede dejar de ser deseable o útil en algún momento. Por ejemplo, presas pequeñas y medianas que en una época fueron importantes fuentes de energía eléctrica se han vuelto inútiles porque sus embalses se han azolvado o porque ya no ofrecen condiciones de seguridad aceptables, o bien han sido superadas por la tecnología o la economía de escala de plantas más modernas, etc. Al contrario de lo que podría suponerse, remover la obra no basta para devolver al río y al resto del entorno sus condiciones iniciales. La experiencia está enseñando que remover una presa es un proyecto de ingeniería en sí mismo, con sus propios costos y beneficios, y cuyo diseño y evaluación tiene todas las complejidades e incertidumbres de cualquier otro, principalmente por sus efectos ambientales sobre el nuevo entorno que la misma obra creó.<sup>63</sup> Esto introduce una complicación adicional al diseño, pues según algunos ello

---

<sup>62</sup> World Commission on Dams, op. cit.

<sup>63</sup> D. D. Hart, "Dam removal: challenges and opportunities for ecological research and river restoration", BioScience, vol. 52, núm. 8, agosto de 2002, pp. 669-681.

obliga a incorporar a los costos diferidos de todo proyecto los de la eventual remoción del mismo. Pero restaurar las condiciones que prevalecían en el entorno antes de la existencia del proyecto original puede ser inconveniente y la decisión no debe tomarse a priori, sino ponderando en su momento costos y beneficios como en cualquier proyecto. Por tanto, racionalmente sólo cabe en estos casos tomar en cuenta los costos de devolver al sitio condiciones de seguridad, sea cual sea el uso que de él se decida hacer después.

## **11. CONCLUSIONES**

De lo aquí tratado se desprenden conclusiones útiles para normar la concepción, planificación, evaluación, construcción, puesta en servicio y seguimiento de cualquier proyecto de ingeniería:

1. Es inevitable que cualquier proyecto de ingeniería produzca, al lado de los beneficios que directamente persigue, otros efectos positivos y negativos sobre la sociedad y los ecosistemas. Por tanto, cada caso debe ser evaluado mediante criterios sanos de rentabilidad económica, sostenibilidad ambiental y equidad social, y luego comparado en los mismos términos con otras opciones de solución de la necesidad social a la que responde.

2. La correcta aplicación de los tres criterios de evaluación indicados requiere la participación formal, transparente y efectiva tanto de los segmentos sociales con intereses legítimos en los proyectos como de profesionales idóneos de la ingeniería y la economía, además de científicos de la sociología, la ecología y otras ciencias. La participación efectiva de quienes tengan derecho a ello, más la sensatez, honestidad y paciencia de quienes coordinen la planeación y evaluación de los proyectos serán la mejor defensa ante posiciones dogmáticas en pro y en contra, que seguramente seguirán existiendo y manifestándose.

3. En numerosos proyectos de ingeniería ha habido deficiencias graves en el manejo de los efectos de orden social, ecológico o económico; pero esta no es una imputación aplicable de manera genérica a la totalidad de los grandes proyectos, ni es inevitable que éstos tengan efectos depredadores.

4. La experiencia buena y mala acumulada al respecto debe asimilarse y aprovecharse en proyectos futuros. Además, cada país debe evaluar su historial propio en este campo, como lo sugiere el informe de la Comisión Mundial sobre Presas<sup>64</sup> para el caso de estas obras.

5. Las fallas graves en la estimación de costos de los proyectos de ingeniería de todo tipo se pueden evitar, por una parte, mediante esfuerzos de modelación dinámica de los sistemas socio-técnico-ambientales que resultan de cualquier proyecto de ingeniería y, por otra, mediante el monitoreo de la evolución de los mismos a fin de precaverse ante las limitaciones de los propios modelos.

6. Dadas las incertidumbres y la complejidad asociada a cualquier intento serio de evaluar la sostenibilidad, la actitud requerida de las instituciones responsables es no desistir de hacerla, sino además integrar para cada proyecto un grupo de trabajo experimentado y capaz, con participación de las profesiones y disciplinas científicas pertinentes, cuya función incluya no solamente realizar los estudios previos, sino hacer la gestión socio-ambiental del proyecto una vez implantado, en su caso. Es de esperarse que, mediante el estudio concienzudo y continuo de proyectos específicos antes y después de su puesta en operación, los científicos de la ecología lleguen a hacer no sólo aportaciones prácticas basadas en el saber existente, sino hallazgos científicos que aumenten el acervo de conocimientos de la humanidad sobre el tema. Igualmente deseable es la colaboración de economistas para incorporar externalidades cuya omisión da lugar a rentabilidades engañosas y hace inviables los proyectos.

7. Los criterios de evaluación ambiental y gran parte de los de carácter social aquí indicados fueron soslayados por todos desde siempre hasta años recientes. Tal actitud se justificó racionalmente durante mucho tiempo por el hecho incontrovertible de que en el pasado más o menos remoto la tasa de consumo de recursos naturales era insignificante en comparación con la reserva de ellos disponible en la naturaleza. La densidad demográfica actual del planeta ha hecho que esto ya no sea cierto y, por tanto, es indispensable un cambio de actitud general, que parta de apreciar la importancia que para el futuro de la especie humana tiene preservar los diversos equilibrios tanto naturales como sociales. No obstante, proscribir

---

<sup>64</sup> World Commission on Dams, op. cit.



de modo tajante y sin análisis proyectos como las grandes presas implica condenar a la miseria a millones de personas en los países que, por azares de la historia, no emprendieron dichos proyectos antes, cuando las condiciones permitieron que se realizaran en los países que, en gran medida por esto mismo, hoy son ricos.

## **IX. Competitividad e ingeniería**

### **1. ¿COMPETIR O COOPERAR?**

La competitividad está de moda. Un coro multitudinario exhorta en los medios de comunicación, en el gobierno, en el aula y en otros foros a que individuos, empresas, países y organizaciones de todo tipo compitan y sean competitivos. A veces no es claro si quienes lo promueven saben bien qué quieren decir, pero de cualquier modo lo hacen: está de moda. La moda durará “hasta que se agote el ansia por la libertad, ansia que fomenta los cambios que ahora vemos, y la sustituya, otra vez, la sed por la igualdad y la justicia social, sed que dio lugar a las revoluciones que conocimos [...] y en que hasta hace poco creíamos y vuelva a oscilar el péndulo, tal vez hasta que sus oscilaciones se amortigüen y hallemos [...] el sendero medio, con lo mejor de cada ideología”.<sup>65</sup>

Individualmente y en grupo los seres humanos somos por naturaleza dados a la competencia, como lo son todos los seres vivos, de suerte que no se nos está pidiendo algo contra natura. El punto a considerar, sin embargo, es que no solamente ese atributo tenemos, sino que por la misma causa somos también seres cooperativos. Ambas características nos vienen en los genes y son producto de milenios de evolución. Esto significa que necesitamos ambos atributos para sobrevivir. Durante la evolución de la vida en nuestro planeta, la cooperación de individuos de una misma especie es lo que ha producido estructuras sociales más complejas hasta llegar a las sociedades humanas actuales. Está demostrado que, desde los organismos unicelulares hasta los seres humanos, la cooperación ha contribuido más que la competencia a la evolución de tales comunidades.<sup>66</sup>

Dependiendo de las circunstancias objetivas del entorno y del momento, ya veces según el muy subjetivo estado de ánimo de cada quien, optamos por competir o por cooperar. Así somos y así debemos seguir siendo por el bien personal y colectivo. Por tanto, necesitamos capacidad de juicio para decidir en cada caso y momento cuál de las dos actitudes nos conviene. No todos los problemas se resuelven óptimamente de la misma manera; algunos pueden afrontarse mejor compitiendo; otros, cooperando, e incluso hay ocasiones que se prestan simultáneamente a competencia y colaboración, como cuando alguien requiere desplegar a fondo y con excelencia capacidades varias, en algunas de las cuales no es sobresaliente: lo óptimo entonces sería escoger con quién enfrentar conjuntamente el problema, y cooperar aportando cada quien las capacidades que mejor domina, a la vez que los asociados compiten entre sí por desempeñarse de modo excelente.

Es inconveniente que, siendo competencia y cooperación actitudes opuestas, y ambas probadamente necesarias, sólo se nos exhorte a ser competitivos, pues si cedemos a la insistencia es tarea alejándonos del equilibrio y atentando contra nuestros propios intereses. Y en efecto, esto es lo que está sucediendo: por creer que así prosperamos, competimos denodadamente hasta cuando lo razonable sería resolver nuestros problemas mediante la cooperación. Las cuestiones ambientales de

---

<sup>65</sup> E. Rosenbluth, *La futura educación ingenieril*, Cuadernos PICA, 4, Fundación ICA, México, 1995, 9 pp.

<sup>66</sup> 2 M. A. Novak, R. M. May y K. Sigmund, “The arithmetics of social help”, *Scientific American*, junio de 1995; reimpresso en *The Mysteries of Mathematics*, Scientific American Inc., Nueva York, 2006, pp. 10-15.

importancia planetaria, la paz mundial, la marginación de millones de nuestros semejantes, la educación son ejemplos obvios de asuntos que ameritan cooperación; pero dependiendo de las circunstancias también pueden serlo la mejora de las condiciones de vida propias y del prójimo, la conservación u obtención de empleo, el aprendizaje, la capacitación, etc. Esto denota que quienes abogan por la competencia a rajatabla están expresando consignas que no han reflexionado suficientemente, o que se están adhiriendo de manera extralógica a propuestas sobrecargadas de ideología.

Tanto la competencia como la cooperación son más fructíferas si se basan en el conocimiento del competidor o socio. A menor conocimiento, mayor riesgo, trátase de competir o de cooperar. Desde la cooperación más solidaria hasta la competencia con resabios primitivos, que es la guerra, todas las formas de interacción de los seres humanos tienen mayor probabilidad de éxito si se basan en el conocimiento de la contraparte, tanto por razones de carácter psicológico como táctico y estratégico. Competencia sin conocimiento de las fortalezas y debilidades del competidor es simple pleito impulsivo; cooperación sin conocer las capacidades y actitudes del socio es una aventura aún más riesgosa, pues la cooperación exige confianza que no puede fundarse sino en el conocimiento. Por todo ello, a) el dilema de competir o cooperar se desvanece o se resuelve si las partes se tratan y conocen mutuamente; b) la competencia es más probable entre partes lejanas, en tanto que la cooperación lo es entre cercanas, y c) la competencia es más primitiva y azarosa cuanto menos conocimiento mutuo hay entre los competidores. Con todas esas condiciones, objeciones y salvedades, seamos conscientes, sin embargo, de que hay que competir y ser competitivos so pena de ser barridos o sometidos en la arena internacional, y simplemente tengamos en cuenta que al hacerlo no debemos descartar la posibilidad de, además, cooperar. En lo que sigue nos referiremos específicamente a la competitividad internacional de un país para fines económicos y comerciales, y al papel que en ello desempeña su ingeniería.

## **2. PAPEL DE LA INGENIERÍA**

Dado que la ingeniería es medio principal para definir y crear las inversiones en planta productiva tanto como para optimizar la operación de ésta, la capacidad de un país en el campo de los servicios de ingeniería puede hacer la diferencia entre un desempeño económico mediocre y uno sobresaliente. Hay quienes piensan que la globalización de los mercados tenderá a restar validez a esta aseveración porque siempre se podrá acudir a servicios de ingeniería de origen extranacional, pero es más probable que ocurra lo contrario: que sin capacidad ingenieril interna la competitividad de un país en la arena internacional sea inalcanzable. En efecto, la competencia internacional intensificada por la globalización hará cada vez más necesario cierto nivel de autonomía nacional en los servicios de ingeniería requeridos por una economía de gran escala, pues no es concebible que persista o prospere una potencia económica mediana grande cuyos servicios de ingeniería dependan de sus competidores.

Ahora bien, es obvio que no cualquier nivel de producción económica justificaría una alta capacidad propia de servicios de ingeniería. Aunque no nítidamente definido, hay un umbral de

producción arriba del cual se justifica esa relativa suficiencia. Por ejemplo, la historia muestra que países con población de apenas algunas decenas de millones de habitantes pueden alcanzar un producto interno bruto que justifique una ingeniería con alto grado de suficiencia, más aún si la diversificación económica de tales países es alta; muchos países de Europa occidental son evidencia de ello. Por otro lado, naciones con cien o más millones de habitantes pueden lograr cierto grado de auto-suficiencia en algunas ramas de la ingeniería mucho antes de alcanzar un producto per cápita alto, como son los casos de China, India y Brasil, entre otros. Estos grandes países incluso muestran evidencias de que la posibilidad de seguir incrementando su ingreso per cápita depende precisamente de haber alcanzado ese grado de autosuficiencia en áreas selectas de la ingeniería que son críticas para su especialización económica.

Conforme la globalización ha ido creando condiciones para que ciertas empresas migren hacia donde hay el personal que mejor satisface las necesidades de sus respectivos negocios, más importante se vuelve para cada país cuidar la calidad y el perfil de sus profesionales en la ingeniería. Hay que tener en cuenta a este respecto que, además de ingenieros, la ingeniería requiere de personal asociado y auxiliar. Por ese motivo, los países desarrollados integraron durante la segunda mitad del siglo xx cuadros profesionales compuestos por proporciones similares de ingenieros y técnicos superiores (o profesionales asociados), los primeros formados en programas de aproximadamente cinco años de duración y los segundos en programas de dos a tres años. Esta política ha probado ser necesaria no solamente en la ingeniería, sino en todas las actividades de carácter práctico; es decir, en todas las profesiones.<sup>67</sup> No ha sucedido lo mismo en Iberoamérica y, por tanto, su ingeniería está limitada por a) la falta de técnicos superiores idóneos, que son suplidos por personal de menor calidad formado exclusivamente en la práctica, o por ingenieros que, en consecuencia, ven acotado su desarrollo, sus ingresos y sus satisfacción profesional; b) el desperdicio masivo de cuadros formados en las escuelas como ingenieros y que están destinados a desempeñar funciones por debajo de sus expectativas y capacidades, y c) la mayor dificultad de las instituciones académicas para formar ingenieros de excelencia, por tener que distribuir su atención entre un número de estudiantes mucho mayor que el finalmente aprovechado en tal función.<sup>68</sup>

Por lo demás, una capacidad suficiente en servicios de ingeniería no se logra siguiendo en todo país un camino o modelo único, ni son pocos los factores que en ello influyen. Se requiere la acción conjunta de ciertos actores institucionales o sociales que, por su relación directa con el asunto, pueden asumir colectivamente la responsabilidad de crear capacidades nacionales de ingeniería mediante un proceso intencional más o menos prolongado. Hay razones para postular que los actores centrales del proceso a que nos referimos son cuatro: el gremio de los ingenieros, el empresariado, el gobierno, y las instituciones académicas relacionadas directamente con la ingeniería. La importancia relativa de la contribución de cada uno de tales actores varía de país a país según la estructura económica y la idiosincrasia nacional. Lo que queda fuera de ese núcleo de

---

<sup>67</sup> En México, apenas en la última década del siglo pasado se dio un impulso decidido a la formación de técnicos superiores o profesionales asociados mediante la de decenas de universidades tecnológicas con programas educativos de dos años de duración y la introducción, en instituciones tradicionales de educación superior, tanto de programas similares como del reconocimiento de sus créditos para fines de estudios subsecuentes. Aunque los efectos son aún incipientes y falta mucho por hacer para aumentar la matrícula y la aceptación social de este tipo de programas educativos, ha comenzado a producirse una mutación en el tipo de empresas de manufactura y de ciertos servicios de ingeniería que se están instalando en el país. Comienza así a ser posible pasar de ser lugar favorito de las maquiladoras (ensambladoras de automóviles, computadoras, electrodomésticos y otros bienes similares, atraídas por mano de obra barata y confiable pero poco capacitada) a país que aloja con ventaja empresas que realizan funciones más complejas de ingeniería apoyadas en la disponibilidad no sólo de ingenieros, sino de técnicos superiores capaces de integrar con aquéllos los equipos de trabajo necesarios para actividades de diseño más sofisticadas.

<sup>68</sup> Como consecuencia del retraso en la introducción de los programas de educación superior cortos, México sigue pagando el costo de formar casi todos los cuadros profesionales para su ingeniería (salvo los pocos miles que cada año egresan de las universidades tecnológicas) en programas de cinco años, en vez de que aproximadamente la mitad de ellos se formen como profesionales asociados en programas de sólo dos años de duración. Esto ha dado lugar a que en 2006 México tenga 450 000 estudiantes de ingeniería en programas largos, versus 370 000 de los Estados Unidos, cuya economía es 20 veces mayor (<http://www.businessweek.com/magazine/> “México: Pumping Out Engineers” 28 de julio de 2006).

actores responsables puede verse como el entorno, que juega un papel coadyuvante en el proceso y contribuye o no a darle viabilidad y sustento; es el caso, por ejemplo, del conjunto de la economía del país, que según supere o no el umbral antes señalado hará posible o tornará inviable la creación de la capacidad deseada.

Dicho lo anterior, interesa entender cuáles son los obstáculos que impiden tener una ingeniería con capacidades congruentes con la magnitud y diversidad de la economía nacional, cuando éste es el caso; o bien, en términos positivos, cuáles son las condiciones necesarias para que tales capacidades se desarrollen. Según la experiencia, muchas de las condiciones necesarias son de carácter intangible, pues tienen que ver con la sana comprensión del asunto y con la convicción y la voluntad de actuar en lo que a cada actor central le corresponde; por lo demás, el sentido común indica que la responsabilidad de cumplirlas se debe distribuir según su naturaleza entre los cuatro actores identificados. En cualquier caso, la creación de la capacidad deseable en servicios de ingeniería debe comenzar por que el gremio de los ingenieros asuma la decisión de cumplir las condiciones que a él mismo corresponden y muestre voluntad de colaborar en las demás con los otros actores sociales.

### **3. CONDICIONES NECESARIAS EN EL GREMIO**

El gremio de los ingenieros tiene la responsabilidad central en la integración y el desarrollo de la ingeniería de un país para alcanzar cierto grado de autosuficiencia. En el concepto de gremio quedan incluidos como entes activos tanto las organizaciones de ingenieros (colegios, academias, asociaciones, etc.) como cada uno de los miembros individuales de ellas. Esto quiere decir que cada responsabilidad atribuible al gremio tendrá una faceta que debe asumirse colectivamente y otra que cada miembro individual debe cumplir en lo personal. El grado en que se atiendan ambas facetas determinará la calidad y suficiencia de la ingeniería nacional, además de la autoridad moral del propio gremio ante los otros actores del proceso y ante la sociedad. Las condiciones que al gremio toca cumplir son las siguientes:

1. Poseer conocimientos y capacidades profesionales comparables a los de sus pares internacionales. Esta condición no requiere explicarse. La necesidad de esforzarse en cumplirla individualmente y como colectividad gremial es evidente.
2. Conocer y monitorear las condiciones cuantitativas y cualitativas de los servicios de ingeniería nacionales y de su situación relativa en el ámbito internacional. Ésta es una necesidad derivada del hecho de que competir requiere conocimiento de los atributos propios y los de los competidores. Su cumplimiento corresponde sobre todo al gremio organizado institucionalmente y sólo puede lograrse: a) asumiendo la responsabilidad de integrar y mantener actualizados los bancos de datos necesarios; b) poniéndolos a disposición de los miembros individuales del gremio y de otras partes interesadas y, finalmente, c) usándolos para estudios diversos que, luego de ser evaluados y validados colegiadamente por representantes calificados del propio gremio, representen la opinión legítima de éste y en tal carácter se divulguen.

3. Actuar con profesionalismo. Esto debe entenderse como voluntad y capacidad de desempeñarse con sensibilidad social y con altos estándares técnicos y éticos, e implica saber y asumir que la ingeniería es una profesión, no una técnica, una ciencia o un arte, y que, por tanto, su ejercicio exige cumplir responsabilidades ante la sociedad y no sólo ante el cliente, ante los pares y ante sí mismo. La vitalidad de una profesión es como una flama, que se perpetúa o se extingue según generaciones subsecuentes tomen en sus manos o desatiendan la tarea de conservarla encendida. Mantener viva esa llama exige conocer la historia y avatares de la profesión, entender y compartir sus valores, sentir cierto discreto orgullo de ejercerla, intuir la misión que en cada momento le corresponde, conocer sus desafíos y los factores que influyen en ellos y, en fin, comprender el contexto y el entorno de la profesión en cada momento para contribuir a reforzarla a la vez que se vive de ella.

4. Comprender el papel de la escuela y de la práctica en la formación de los profesionales de la ingeniería. La formación de un ingeniero en nuestro tiempo se da, en etapas sucesivas, en la escuela y en la práctica. Tanto el diagnóstico como el diseño, que constituyen las dos funciones centrales del ingeniero, tienen aspectos que sólo se pueden aprender si el recién graduado pasa varios años de práctica subordinada en el seno de equipos de trabajo que incluyan ingenieros de experiencia larga y diversa. Por tanto, la importancia y proporción del aprendizaje que ocurre en la escuela y en la práctica son equiparables, aunque la naturaleza de lo que se aprende en una y otra es distinta. Esta cuestión es crucial cuando se trata de crear o reforzar la capacidad de la ingeniería nacional, pues puede dar lugar a círculos de realimentación positiva o negativa. Por ejemplo, la actividad nacional en el campo de la ingeniería crea condiciones para que se formen ingenieros de alta calidad y, de manera recíproca resulta prácticamente imposible formarlos si no hay actividad nacional suficiente en ese campo; no es que el mercado nacional deba ser el único espacio para su ingeniería, sino que este mercado debe tener magnitud superior a cierto umbral. Similarmente, si la actividad de la ingeniería nacional se reduce durante muchos años, no sólo se desaprovechan las capacidades de los ingenieros ya formados, sino que en gran medida la formación de nuevos profesionales se queda a medias, independientemente del desempeño de las instrucciones educativas y de la calidad de los jóvenes que sigan saliendo de las aulas, pues gran parte de estos no tendrán Oportunidad de realizar la parte práctica de su formación profesional y, cuando sean requeridos después como ingenieros, sus capacidades serán claramente inferiores a las que debe tener un buen profesional de su misma edad. Tales relaciones determinan que cuando la ingeniería nacional es competitiva en el mercado interno lo sea también en el del exterior.

5. Comprender en cada momento las condiciones necesidades y recursos del país, con sus variantes por región y por estrato social, y ubicarlas en el entorno internacional 1sta es una condición de naturaleza similar a la 2y, por tanto, lo son también las responsabilidades que para cumplirla corresponden colectivamente al gremio y a sus miembros individuales. Sin embargo, la amplitud y diversidad de los temas que esta condición abarca son mucho mayores que las que cubre la condición 2y, por lo mismo, el dominio que el gremio ha de tener del asunto es necesariamente menor que en aquella, aunque debe ser suficiente para dialogar constructivamente con las instituciones especializadas del Estado.

6. Promover la suficiencia en cantidad y calidad de los cuadros nacionales de ingenieros, y tener una estrategia en marcha para contender con sus limitaciones. Es obvio que poquísimos países podrían aspirar a la autosuficiencia en este campo, y ciertamente no las naciones en desarrollo como México. Incluso en los mejores momentos de la ingeniería civil, que es la de mayor fortaleza y tradición nacional, México nunca ha sido autosuficiente en este campo, pero supo al menos identificar, especificar y elegir en el ámbito internacional, con criterios propios, las capacidades complementarias que en cada caso requería. La depresión en la que desde 1976 cayeron, por motivos tanto macroeconómicos como ideológicos, los servicios de ingeniería nacionales<sup>69</sup>, no debe ser excusa sino aliciente para

---

<sup>69</sup> D. Reséndiz, "La evolución de la ingeniería mexicana: lecciones de historia en El siglo de la mecánica de suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, 2008.



que el gremio se mantenga en condiciones de identificar ágilmente, ante cada necesidad o proyecto específico, de qué capacidades disponemos, cuáles nos faltan y cómo adquirirlas o suplirlas. Los bancos de información indicados a propósito de la condición 2, y el estudio e interpretación sistemática de los mismos, son los medios idóneos para satisfacer la condición que se discute.

#### **4. CONDICIONES NECESARIAS EN EL GOBIERNO**

Desarrollar capacidades de cualquier tipo para servir fines nacionales requiere políticas públicas racionalmente diseñadas y aplicadas; de aquí la necesidad de que el gobierno sea partícipe. Las condiciones que a él le corresponde cumplir son:

1. Contar con cuerpos de ingeniería selectos en cada uno de los principales sectores de la administración pública cuyo buen desempeño requiera obras y servicios de ingeniería. Estos cuerpos son indispensables para integrar planes y programas sectoriales que identifiquen necesidades, recursos y soluciones armónicamente ubicados en el territorio y en el tiempo para el óptimo funcionamiento del respectivo sector. Sin ellos, el gobierno no tendrá capacidad de contratar dichos servicios ni de realizar aquellas obras, menos aún de diseñar y aplicar las políticas públicas pertinentes.

2. Tener convicción de que la capacidad relativa de la nación en el campo de la ingeniería influye en el tino, el costo y los beneficios de muchos rubros de la actividad productiva nacional, no solamente de las obras de ingeniería. Hay dos aspectos dignos de subrayarse a este respecto: a) que la existencia de los cuerpos de ingeniería selectos a que se refiere la condición anterior no puede surgir del vacío, sino del dinamismo de una amplia base de ingenieros y servicios de ingeniería, y b) que además de las obras de infraestructura (cuya identificación, especificación y realización son responsabilidad gubernamental) la economía en su conjunto demanda una gama muy amplia de servicios de ingeniería de cuya calidad depende el desempeño económico general.

3. Conocer los beneficios marginales que los servicios nacionales de ingeniería de alta calidad pueden aportar a la economía nacional. Además de ser exportables en sí mismos, tales servicios constituyen el medio más eficaz para fomentar la exportación de otros productos, como bienes de capital y ciertas manufacturas. Por tanto, de que en el gobierno exista este conocimiento depende el tino de las políticas públicas que se instituyan para promover las exportaciones y, en especial, que el potencial exportador se acreciente y se materialice. Todos los países que tienen esta posibilidad la promueven y apoyan activamente a través de, al menos, su banca de desarrollo o fomento; en las naciones medianamente desarrolladas estos apoyos son aún más determinantes, en vista de que sus empresas exportadoras suelen ser relativamente más débiles que las de los países ricos. Por otra parte, disponer de esa capacidad de exportación tiene otros dos efectos positivos; a saber, atenúa los ciclos propios de la economía nacional y contribuye a reducir los costos de la ingeniería nacional, porque aumenta la escala de operación de sus empresas y por tanto robustece su competitividad.

4. Establecer leyes y políticas públicas que fomenten la calidad y suficiencia (en ese orden) de los servicios de la ingeniería nacional. Estas leyes y políticas son la consecuencia lógica de las dos condiciones anteriores y deben cuidar tanto el mercado interno, para minimizar los costos de las inversiones del país en obras y servicios de ingeniería, como el de exportación. En el mercado interno la minimización de costos no se logra solamente mediante licitaciones públicas, sino que requiere además cierta

profundidad de la oferta nacional de esos servicios, así como cuidar que las empresas extranjeras participantes no tengan ventajas indebidas derivadas de las políticas públicas de sus países de origen. En cuanto al mercado de exportación, debe cuidarse que las empresas nacionales exportadoras de servicios de ingeniería no tengan desventajas en los mercados externos por falta de apoyo nacional o por los subsidios u otras ventajas ilegítimas de las empresas con las que compitan. Diseñar políticas cuidadosas para que, sin sacrificio de calidad y costo, se estimule la participación de proveedores nacionales de servicios de ingeniería tanto en el mercado doméstico como en el de exportación da lugar a sinergias muy benéficas al país; por ejemplo, una alta participación de proveedores nacionales en el mercado interno les da una base más amplia de soporte para arriesgarse en el exterior, en tanto que su participación en el extranjero repercute en mejores condiciones de calidad y costo en el mercado interno.

## **5. CONDICIONES NECESARIAS EN EL EMPRESARIADO**

La ingeniería es un servicio, pero en las economías de mercado también es un negocio. Por tanto, el empresariado es necesariamente actor central en el propósito de hacer competitiva la ingeniería de un país. Lo que a los empresarios compete en ese propósito es:

1. Saber que las empresas de ingeniería prestan servicios profesionales cuya naturaleza difiere de la de otros tipos de servicios y negocios. Una de estas diferencias es de gran trascendencia, pues implica que, si bien el cliente tiene la última palabra, si sus intereses entran en conflicto con los de la sociedad, el ingeniero tiene la obligación moral (y a veces legal) de buscar activamente la conciliación de ambos y no dejar la decisión en manos sólo del cliente, ni darse por satisfecho sino cuando tal conciliación se ha logrado a satisfacción de todas las partes.

2. Apreciar la ventaja que para las empresas nacionales de todo tipo representa una ingeniería nacional suficiente y competitiva. Esta condición no es sino la contraparte empresarial de las condiciones que obligan a los ingenieros y al gobierno.

3. Conocer las oportunidades de negocio que como proveedores, clientes, consumidores, empleadores y socios representan las empresas de servicios de ingeniería y construcción para el resto en las empresas nacionales. Esta condición no requiere explicación o justificación alguna.

4. Jugar su papel de modo coherente con las tres nociones anteriores. Este papel, por lo demás, debe abarcar las tres facetas que a los empresarios corresponde atender en cualquier otro negocio: la organizativa, la promotora y la de ponderación y toma de riesgo.

## **6. CONDICIONES NECESARIAS EN LAS INSTITUCIONES ACADÉMICAS**

Como en cualquier otro campo, en éste las instituciones académicas tienen la obligación de reflexionar globalmente sobre todas y cada una de las facetas del asunto; hacer llegar los resultados de su reflexión a cada uno de los otros actores del problema, y responsabilizarse de proveer a todos ellos los servicios que específicamente le corresponden. Para ello las condiciones que en su seno deben satisfacerse son:

1. Tomar en cuenta, al diseñar planes y programas de estudio, lo que en la formación de los ingenieros compete a la escuela y lo que corresponde a la práctica profesional. Ésta es la contra- partida de la condición 4 que el gremio asume en el mismo sentido.

2. Conocer la filosofía y las normas de la regulación nacional de la práctica de la ingeniería, así como las peculiaridades de la misma en el ámbito internacional. Los planes y programas de estudio tienen que ser diferentes según los requisitos que se deban cumplir para obtener la licencia de ejercicio profesional. Cuando para obtener tal licencia se exige cierto número de años de práctica profesional subordinada, los planes de estudio pueden prescindir de cierta parte de los cursos con enfoque práctico y concentrarse en aspectos más básicos, pero no en caso contrario.

3. Mantener un balance apropiado en la proporción entre profesores con perfil y ocupación esencialmente académicos (docencia e investigación) y profesores con experiencia y actividad en la práctica profesional. La proporción apropiada entre unos y otros es función de las dos condiciones anteriores; esto es, de la proporción entre cursos esencialmente teóricos y cursos cuya enseñanza exige experiencia profesional.

4. Dar a la calidad de la educación prioridad mayor que a cualquier otro criterio en la toma de decisiones internas. Además de cuidar simultáneamente la calidad de los factores de la educación (profesorado, instalaciones y programas de estudio), deben medirse los resultados finales de ésta; es decir, la calidad de los graduados para realimentar las decisiones propias del proceso educativo. Ya se comentaron los criterios de idoneidad del profesorado y los programas de estudio; en cuanto a las instalaciones, las más importantes para una buena educación de los ingenieros son los laboratorios y otros recursos experimentales, además de las bibliotecas y los medios de cómputo.

## **7. PERTINENCIA Y SUFICIENCIA DE LAS CONDICIONES IDENTIFICADAS**

No hay duda de que las condiciones identificadas son necesarias para mejorar la ingeniería de un país, pero siempre habrá dudas sobre si las condiciones identificadas son, además, suficientes. La lista de condiciones identificadas como necesarias para lograr el cambio puede ser incompleta; es decir, cabe preguntarse si el conjunto de condiciones necesarias y suficientes para nuestro propósito no omite algunas que no hemos identificado. La posibilidad de que otras condiciones no identificadas también deban satisfacerse no puede descartarse o dilucidarse a priori, ni para la lista propuesta aquí ni para ninguna otra; sólo empíricamente se podrá probar si atinamos o nos quedamos cortos en las condiciones que se deben cumplir. Sin embargo, hay dos importantes razones a favor de asumir como hipótesis de trabajo tanto que los cuatro actores propuestos son quienes tienen en sus manos la posibilidad de resolver colectivamente el problema como que las condiciones a satisfacer son, en primera aproximación, las aquí enumeradas. Las razones para ello son las dos siguientes:

1. Cada uno de los actores indicados tienen interés legítimo en el asunto y posibilidad de contribuir a su buen éxito, según el análisis que aquí hemos hecho; si acaso, cabe admitir que el interés de algunos es más fuerte que el de otros. Para avanzar se requerirá, pues, la intervención de todos ellos. Siendo así, nadie podría pugnar por que el asunto se atendiera sin comprometerse él mismo en lo que le compete, pues carecería de autoridad moral. Esto constituye una razón muy fuerte para que ninguno de los actores colectivos que hemos señalado se excluya.

2. Si, como caso particular, revisamos los periodos históricos de más empuje de la ingeniería mexicana (1925-1928 y 1937- 1968) encontraremos que, grosso modo, buena parte de las condiciones aquí señaladas llegó a cumplirse, aunque en grado desigual.<sup>70</sup> Esto indicaría que dichas condiciones no están lejos de ser colectivamente necesarias y, con alta

---

<sup>70</sup> D. Reséndiz, “La evolución de la ingeniería mexicana: lecciones de historia”, op. cit.

probabilidad, suficientes. Éste es un fuerte indicio empírico en apoyo a la lista de condiciones señaladas.

## **8. EL CAMINO HACIA LA COMPETITIVIDAD**

No se pasa con rapidez de un estado indeseable de la ingeniería a uno satisfactorio; cierto proceso gradual de mejora antecede necesariamente al estado deseable. Tampoco cabe esperar a que primero se cumplan todas y cada una de las condiciones señaladas y suponer que antes de que eso ocurra cabalmente ninguna mejora es de esperarse en el estado de la ingeniería nacional. Los procesos de este tipo suceden más bien paso a paso y el cambio sustancial va dándose conforme se cumplen las condiciones.

El primer paso es uno impuesto por el principio de realidad y consiste en reconocer las cosas como son; es decir, diagnosticar el estado inicial de la ingeniería con participación de los cuatro actores señalados. En seguida, los cuatro deben asumir realísticamente lo que a cada uno le queda por hacer hasta cumplir sus respectivas condiciones. Conforme se avance en este proceso irá cambiando el estado de la ingeniería. Aquí es donde entra en juego la voluntad de los participantes, a fin de echar a andar el proceso y no dejar que se detenga.

### ***X. Humanismo e ingeniería***

#### **1. LA MISIÓN DE LOS PROFESIONALES**

Dado que un profesional debe responder de sus decisiones ante la sociedad, su misión no puede limitarse a servir a sus clientes. El criterio con el que debe proceder se centra en los intereses de la sociedad, entendidos no como superiores a los del individuo, sino como conjunción armoniosa de lo que conviene a todos; sus decisiones deben servir a los dueños o promotores de los proyectos a su cargo, pero sin dañar a otros integrantes del cuerpo social ni a las generaciones futuras. En sentido estricto, el ingeniero estará sirviendo a su cliente en la medida en que logre hacer compatibles los intereses de éste con los del conjunto social; cualquiera otra solución terminaría por revertirse contra el cliente y el ingeniero. Cumplir tal compromiso no es asunto trivial, sino el desafío más importante de todo profesional y la razón por la que se le tiene confianza, se le contrata y se pagan sus servicios. Además, en el caso particular del ingeniero, algunas de sus decisiones tienen consecuencias que no sólo afectan de modos varios y aun antagónicos a diversas personas y grupos sociales, sino que repercuten intensamente a futuro y de mane ras muy difíciles de prever. El desarrollo del automóvil es un ejemplo de proyecto de ingeniería o desarrollo tecnológico que ilustra muy claramente este tipo de dificultades: por un lado, son enormes las ventajas y contribuciones benéficas del automóvil a la libertad de desplazamiento de las personas y, por otro, también lo son sus repercusiones negativas en la infraestructura y el congestionamiento de las ciudades, el consumo de hidrocarburos y la contaminación de la atmósfera, ninguna de las cuales fueron inicialmente previstas. Según vimos en el capítulo VIII, las grandes presas son otro ejemplo, pues sus beneficios (provisión de agua para consumo humano, irrigación, acuacultura, generación de electricidad, etc.) pueden ir aunados a grandes consecuencias indeseables (inundación de terrenos habitados o cultivados, reubicación de poblados enteros, perturbación de numerosos ecosistemas, etcétera).

En vista de tal ambivalencia de los proyectos de ingeniería, el ingeniero debe poseer no sólo actitud y capacidad de previsión, sino criterios y convicciones bien fundados para reconocer y conciliar los diversos intereses involucrados en cada una de las decisiones a las que su responsabilidad profesional lo obliga. Además, ha de ser consciente de las implicaciones de sus propuestas y no flaquear en el esfuerzo de comprensión, inclusión, evaluación y armonización que sus decisiones exigen. Entre tales implicaciones siempre habrá una cierta distribución de costos y beneficios entre individuos y grupos sociales, y a veces una transferencia de beneficios o daños a generaciones futuras. Optar por la realización o no de un proyecto y elegir uno u otro diseño son decisiones que dan lugar a una distribución de beneficios y costos en proporciones diferentes a cada parte interesada. Aparte de los análisis sutiles y complejos que esto exige, el ingeniero debe disponer de una visión coherente y socialmente aceptada de los seres humanos, en lo individual y como entes sociales, de la importancia relativa de sus múltiples necesidades, y de su respetabilidad y dignidad intrínsecas.

Además de saber ingeniería, el ingeniero debe ser capaz de hacer juicios atinados sobre los problemas humanos y sociales que su trabajo profesional le plantea, entre ellos los de carácter moral. Como veremos en el capítulo xi, los dilemas de la moral no se pueden resolver mediante cierto número de normas encapsuladas en un código, sino mediante la ética como arte práctico derivado de una filosofía de la vida; es decir, como disciplina cuyos criterios generales de decisión capacitan para encarar las innumerables encrucijadas que la vida plantea. Para evaluar ciertos proyectos el ingeniero debe tener también conocimiento de la historia, por cuanto ésta enseña sobre lo contingente de ciertos propósitos y necesidades humanas y, por tanto, ayuda a valorar los beneficios y costos de largo plazo que la implantación de tales proyectos producirá.

Las nociones sobre la naturaleza humana han cambiado con el tiempo. Las que hoy constituyen la concepción humanista de aquélla nacieron en la Grecia clásica y su premisa básica es que el ser humano individual es libre para elegir su comportamiento y es por tanto responsable de éste. También es consustancial al humanismo asumir que libertad y responsabilidad confieren dignidad al individuo y que ésta lo hace respetable y le otorga derechos intrínsecos, sea cual sea su estatus en el cuerpo social. Esta noción del ser humano es hoy cada vez más compartida en el mundo, pero no ha ocurrido así continuamente; varias veces ha sido abandonada durante largos periodos de la historia y luego, por una suerte de racionalidad básica de nuestra especie, ha sido rescatada y reasumida otras tantas. Cada vez que han predominado, local o regionalmente, doctrinas oscurantistas, autoritarias o francamente criminales, el humanismo ha sido reprimido, incluso durante siglos, pero finalmente ha resurgido como recurso racional capaz de reestablecer la sensatez. Quizá es ésta la prueba empírica más sólida de su sano fundamento y su vitalidad.

Es necesario que quienes ejercen la ingeniería conozcan al menos a grandes rasgos esa doctrina y sus avatares: la filosofía práctica que la subyace, la ética laica que de esa filosofía se desprende, la relación directa que todo ello tiene con los intereses concretos del ser humano individual y de la sociedad y, por tanto, con los propósitos de la ingeniería. Así será posible, por ejemplo, que cuando el ingeniero tome decisiones lo haga



considerando no el bien social en abstracto, sino el muy tangible balance de beneficios y costos (perjuicios) que sus decisiones implican en cada caso particular para su cliente y la sociedad in extenso, presente y futura. Solamente así el ingeniero puede actuar como un profesional del saber práctico y no como aprendiz de brujo que, fascinado con los medios de que se vale, termina soslayando los fines.

## 2. EL HUMANISMO: NACIMIENTO Y RENACIMIENTO

Aunque el concepto es más antiguo según veremos, el término humanismo surge en el siglo xv, a partir de ideas ampliamente compartidas por los más destacados pensadores de la época y expresadas de modo sobresaliente por Pico de la Mirandola en su “Discurso sobre la dignidad del hombre” (De hominis dignitate, 1486). Las siguientes son unas pocas líneas de su disertación en pro de que se considerase nuevamente al ser humano como motivo y actor central de todos los afanes de la historia, en vez de pretender que su suerte dependiera de la divinidad:

*Gran maravilla es el hombre [...], intermediario de todas las criaturas [...] por la perspicacia de sus sentidos, por la penetración inquisitiva de su razón, por la luz de su inteligencia; intérprete de la naturaleza [...], hechura indefinida [...], sin puesto fijo, ni una faz propia, ni una ocupación peculiar, para que el puesto, la imagen y la ocupación que desee los tenga por su propia decisión y elección. Para las demás [criaturas], una naturaleza constreñida por ciertas leyes prescritas. [El hombre, en cambio,] no sometido a cauces angostos, definirá [su ser] según su arbitrio [...] Podrá degenerar a lo inferior, con los brutos; podrá alzarse a la par de las cosas divinas, por su misma decisión [...] Lo que cada cual cultivare, eso florecerá y dará su fruto dentro de él.* <sup>71</sup>.

Las ideas que animaban a Mirandola y sus contemporáneos en 1486, con sus fundamentos filosófico y práctico, no eran nuevos, sino al menos 20 siglos anteriores a aquella época, y así lo reconocían sus promotores. De hecho estaban redescubriendo todo eso en textos griegos clásicos o en traducciones de estos al árabe, unos y otros preservados por eruditos musulmanes. Por ejemplo, la ideología que inspiraba el alegato de Pico de la Mirandola está contenido sintéticamente en la expresión “el hombre es la medida de todas las cosas” atribuida a Protágoras (480-410 a.C.) por Platón.<sup>72</sup> El concepto humanista central aparece pues, originalmente, en la filosofía griega del siglo vi a.C., llega a su florecimiento en el siglo siguiente, y durante la hegemonía de Roma se debilita hasta casi desaparecer con la caída del Imperio romano en 410 d.C. Al renacer en el siglo XV, el humanismo pasó a constituir, junto con la noción de que la racionalidad es el atributo supremo de los seres humanos, el par de creencias o postulados centrales de la larga época denominada Modernidad, que se extiende desde entonces hasta nuestros días; gran parte de la ideología moderna se deriva de dichas dos nociones. A lo largo de los últimos 500 años o poco más, numerosos pensadores han reexaminado y contribuido a reforzar los fundamentos del humanismo, que en pleno siglo xx Heidegger resumió en una fórmula casi idéntica a la de Protágoras, al decir que el humanismo se caracteriza por considerar al hombre como medida y punto de referencia para ver al resto del universo; es decir, como lo subyacente a toda objetivación: como el *subjectum* o sujeto.

---

<sup>71</sup> de la Mirandola, De la dignidad del hombre, párrafos 1 y 2, traducción de la versión antigua de Basilea de 1601, Ramón Llaca y Cía., México, 1996, 22 pp.

<sup>72</sup> 2 Platón, “Teetetes”, en Diálogos, 152.

Mediante aquel reencuentro de los intelectuales y la sociedad medieval con la cultura de la Antigüedad clásica renació la doctrina humanista griega, y por eso poco tiempo después el siglo xv comenzó a llamarse el del Renacimiento. Pero lo admirable es que la cuna de la noción del hombre como sujeto del universo fuera, según lo arriba dicho, la Atenas de hace 25 siglos, hecho que constituye una floración casi milagrosa, aunque con graves imperfecciones como la aceptación de la esclavitud. No obstante, sorprende de veras que en una etapa tan temprana de la civilización aquella sociedad haya podido concebir, desarrollar y llevar a la práctica doctrinas sobre la vida social e individual de sus ciudadanos que incluso hoy mismo son apenas precariamente practicadas en ciertas partes del mundo y siguen constituyendo ideales de la humanidad. El mérito que explica ese milagro ateniense fue haber prohibido a los primeros filósofos, los llamados sofistas y otros pensadores presocráticos que lograron asir y expresar nítidamente, como Protágoras, concepciones sobre la naturaleza humana y la relación entre el hombre y el universo que luego el tiempo acreditaría como las de mayor robustez racional que al respecto se hayan concebido jamás. La frase “el hombre es la medida de todas las cosas” que alguien equivocadamente podría considerar arrogante por antropocéntrica, significa más bien lo contrario: admitir que el hombre constituye una parte minúscula del universo y que, por tanto, lo más que puede lograr en su afán por descubrir, entender y labrarse un lugar propio en el mundo que lo rodea está limitado por los alcances del hombre mismo y su subjetividad. Esta idea, a la vez elemental y profunda, es la raíz del humanismo; nació del interés de los filósofos griegos por estudiar la naturaleza, el ser humano y el lugar de éste en aquélla.

El método por el que los primeros filósofos griegos llegaron a esa trascendente noción es admirable, pues revela lo poco que requiere la razón para hacer hallazgos trascendentes: simplemente observaron, reflexionaron, viajaron, compararon y dialogaron; cabría decir, con la mayor admiración, que tan sólo vagabundearon reflexionando en diálogo con la gente. Así tuvieron ocasión de convivir con los diversos pueblos de su época; no sólo con los helenos, sino además con persas, egipcios, hititas y otros en una amplia franja alrededor del Mediterráneo. De ese modo descubrieron que leyes y costumbres varían de una a otra comunidad, pero la naturaleza humana en todos es la misma: inspirada, limitada, aguda, intuitiva, crítica, falible; en suma, digna y respetable en cada pueblo y cada individuo. A fin de que tales hallazgos tuvieran la enorme trascendencia social que tuvieron en la creación de una ética y la adopción social de ella, se requirió que aquellos mismos filósofos asumieran constantemente un papel crítico del comportamiento público de gobernantes y gobernados para así lograr la mayor participación ciudadana en la promoción del bien común.

Esos hallazgos geniales de los pioneros de la filosofía tuvieron pronto repercusiones prácticas en la educación y la política del mundo helénico, antes regido por mitos, tradiciones y prácticas no racionales. Los propios filósofos griegos desafiaron e invitaron a desafiar, a partir de la nueva concepción de lo humano, las costumbres y convenciones establecidas, incluso las religiosas, y en el albor del siguiente siglo Sócrates llegó al extremo de poner serenamente en evidencia, con la circunstancia de su muerte, que las decisiones morales corresponden a cada ser humano individual, aunque siempre se dan en el marco de los valores sociales. Así comenzó a configurarse lo que hoy llamamos humanismo: una doctrina

basada y centrada en el respeto a la dignidad del ser humano y su derecho a tomar libremente decisiones de cuyas consecuencias asume la responsabilidad correspondiente. Centrarse en el individuo no significa que la colectividad sea irrelevante para tales fines, sino que, como explicaría Rousseau 22 siglos después, la comunidad civilizada tiene su origen en el ser humano libre, pues se constituye mediante un pacto social de individuos en uso de su libertad. En ese pacto, los individuos que lo consuman convienen apegarse colectivamente a leyes sancionadas por ellos mismos e iguales para todos, pero la finalidad última de tales leyes no es coartar la libertad individual, sino garantizar, por encima de todo, el derecho de cada uno a conducir por sí mismo su vida en los aspectos no regulados por las leyes de la polis, bajo su propia responsabilidad y sin injerencia de otros individuos o del Estado.<sup>73</sup> Esto es lo que hoy llamamos, por una parte, soberanía del pueblo, y por otra, derechos humanos.

### **3. DIGNIDAD DE TODOS LOS HOMBRES LIBRES**

El “milagro” auspiciado y realizado por los griegos de Atenas, hombres por lo demás rudamente guerreros incluso en la paz, sólo puede entenderse en el contexto de su propia historia y de lo que ella indujo en sus protagonistas: un pueblo seguro de sí mismo, reflexivo, inclinado a plantearse todas las preguntas y dispuesto a respondérselas sin tabúes. Esto se puede ver con claridad en numerosos rasgos de sus tradiciones religiosas, en su actitud vital ante los problemas de la existencia, en sus aspiraciones culturales y, en fin, en sus valores, presentes tanto en sus esforzadas elites como en sus modestos e igualmente esforzados campesinos, unos y otros imbuidos de una vigorosa voluntad. En efecto, un rasgo central de la civilización griega fue su pareja valoración del heroísmo y del trabajo, pulida y divulgada durante siglos por sus mayores cantores con el fin de extenderla entre toda la población. Homero da cuenta del significado y la importancia de los héroes como punta de lanza del destino colectivo y como modelo de comportamiento para todos; Hesíodo, por su parte, habla del valor del trabajo como necesidad y digno destino de la especie humana.

No podría concebirse la igual, dignidad de todos los individuos, postulada por la filosofía griega, sin una convicción fuerte y compartida de que todas las ocupaciones socialmente necesarias tienen idéntica respetabilidad. Los presocráticos reconocieron que la naturaleza humana no cambia de un pueblo a otro; es decir, no depende de las leyes ni del entorno geográfico; para que esta concepción fuese posible en toda la sociedad, la educación general había hecho antes su contribución: apoyada por las historias cantadas por poetas como Homero y Hesíodo, la educación había realizado largamente la labor de preparar al pueblo griego en el cultivo de sus virtudes propias, su areté, como lo explica Jaeger.<sup>74</sup>

En la *Ilíada* y la *Odisea*, Homero (siglo IX a.C.?) enseña a los griegos la dignidad del esfuerzo heroico, al que se someten voluntariamente los individuos de la nobleza dirigente para conquistar y mantener la libertad de todo un pueblo; a la vez, de modo sutil induce a pensar que el comportamiento de los dioses revela algo sobre la naturaleza instintiva y

---

<sup>73</sup> J. J. Rousseau, *El contrato social*, 1762.

<sup>74</sup> W Jaeger, *Paideia: los ideales de la cultura griega*, libro primero, 1, Fondo de Cultura Económica, México, 1995, 1151 pp.

espiritual no sólo de éstos, sino también de los hombres. El propio Homero plantea por primera vez, en la Odisea, que los hombres comparten con los dioses la responsabilidad de su destino, cuando pone en boca de Zeus, dios supremo y soberano, el rechazo a las quejas arbitrarias de los mortales que atribuyen a la divinidad todas las desgracias humanas: “No los dioses, sino los hombres, aumentan sus males con su propia imprudencia” dice el Zeus de Homero.<sup>75</sup>

Era igualmente necesario que alguien ponderara a su vez los valores y la dignidad de los hombres ordinarios y mostrara la importancia de sus ocupaciones. Hesíodo (siglo viii a.C.) trata de los dioses didácticamente en su Teogonía<sup>76</sup>; pero en su poema Los trabajos y los días, con fundamento en sus propias raíces y ambiente, elogia sobre todo el trabajo cotidiano de los campesinos griegos. De evidente propósito educativo, y por tanto complementario de los poemas de Homero, Los trabajos y los días muestra que no solamente hay valor en la lucha de los guerreros nobles cuyo heroísmo domina el campo de batalla, sino también en la labor silenciosa del trabajador que logra extraer sustento, seguridad y riqueza de la dura tierra griega, más aún cuando tal labor busca regirse por normas éticas. He aquí algunas de sus palabras a los hombres del campo (traducidas libremente a prosa llana, a partir de la versión rítmica en español de la referencia).<sup>77</sup>

*Esto pon en tu ánimo: a la justicia escucha y la violencia olvida. Es lo que Zeus dispuso para los hombres: que los peces y las fieras y las aves aladas se devoren unos a otros, pues entre ellos no existe la justicia; pero los hombres disponen del derecho, que es un alto bien [versículos 274-279]. Permite que te aconseje con mi conocimiento. Alcanzar la miseria es fácil, incluso a torrentes: no está lejos y el camino a ella es llano. Pero los dioses inmortales colocaron, antes del éxito, el sudor. Largo y empinado es el camino hacia el éxito, y al principio es asaz escarpado. Sin embargo, cuando llegas a la cima se torna fácil, aunque antes difícil haya sido [versículos 274-279]. Así, recuerda mi consejo y trabaja [...] para que el hambre no sea tu compañera y para que te ame la casta y bella Deméter y llene a plenitud tus graneros. Al inactivo lo aborrecen los dioses y los hombres, pues se asemeja al zángano falto de aguijón, que ocioso consume la comida que con su trabajo consiguen las abejas. Procúrate un conveniente placer entregándote, en una justa medida, al trabajo [versículos 298-306]. En el trabajo no hay desdoro; el ocio es lo que deshonra. Si trabajas, el ocioso te emulará por tu ganancia; a la riqueza la acompañan mérito y respeto. Por tu naturaleza, el trabajo es lo digno, si apartas tu mente de los bienes ajenos y la diriges a tu propia labor y cuidas sus frutos, como te aconsejo [versículos 311-316].*

La obra de Hesíodo es evidencia de la alta estima que en Grecia tuvo el trabajo como fuente de los bienes que satisfacen las necesidades humanas y como ejercicio formador de virtudes.

Queda entonces completa la expresión de las aspiraciones culturales de los griegos: Homero canta al heroísmo de los guerreros ilustres; Hesíodo,

---

<sup>75</sup> Homero, la Odisea, 1, 32 y ss.

<sup>76</sup> Hesíodo Teogonía, UNAM, México, 1995, 419 pp. (Bibliotheca Scriptorum Graecorum et Romanorum Mexicana.)

<sup>77</sup> Hesíodo, Los trabajos y los días, uNAM, México, 1979, 398 pp. (Biblioteca Scriptorum Graecorum et Romanorum Mexicana.)

al del hombre laborioso. Ambos contribuyeron así a crear las condiciones objetivas y espirituales para que Atenas equiparara en un mismo plano de dignidad a todo el cuerpo social y la intuición de los filósofos vagabundos revelara a la humanidad que el hombre, cada hombre, es “la medida de todas las cosas” Pero algo faltaba aún para que se constituyera el humanismo como una doctrina completa y bien fundada: el aprecio de la individualidad como elemento distintivo entre los iguales.

#### **4. RECONOCIMIENTO DE LA INDIVIDUALIDAD**

Varios autores han señalado la existencia de una sutil conexión entre la poesía y la construcción de los valores del humanismo en la cultura griega. La idea resulta tan llamativa y la cuestión a que se refiere es tan trascendente, que se justifica mirar con algún detalle el fondo del asunto.

Para la formación de la conciencia colectiva y la adopción del heroísmo y la laboriosidad como valores sociales, los poemas épicos de Homero y de Hesíodo fueron medios educativos importantísimos. Por su parte, la poesía lírica hizo aflorar una noción aun más importante para el humanismo: la respetabilidad del individuo como tal y, en vista de ella, su dignidad. Aunque solamente algunos fragmentos de esta poesía han llegado hasta nosotros, son suficientes para saber de la variedad de inclinaciones y sentimientos personales que a través de la misma se expresaron y consiguieron respetabilidad. Es válido inferir que, luego de eso, la poesía lírica tuvo también, como la épica antes de ella, una función educativa. Pero al contrario de los cantos épicos, cuyo papel fue ensalzar valores colectivos, el de la poesía lírica fue formar una mentalidad propicia para la independencia y el sentido crítico del individuo como tal; éste es al menos el efecto que en la práctica parece haber tenido la diversidad poética que representan Arquíloco (siglo vii a.C.), Alceo, Mimnermo, Safo (siglo vi a.C.), Simónides y Píndaro (siglo v a.C.). De esa amplia gama de talentos poéticos se infiere que en la Grecia de aquellos siglos era socialmente aceptable la convivencia de individuos con actitudes personales muy diversas.<sup>78</sup>

Entre los poetas líricos de la Antigüedad griega, Safo de Lesbos es quien más plenamente pone de manifiesto el nacimiento de una nueva actitud del ser individual ante sí mismo y de los demás hacia él. Por el contenido de su poesía y por la alta valoración que la misma alcanzó en su tiempo y en los siglos siguientes, es el caso que más claramente revela el alto respeto que el disfrute de la individualidad llegó a tener en la Grecia clásica. La poesía de Safo es doblemente significativa porque, con el reconocimiento social de esta gran poetisa, la mujer griega educada conquista en la práctica, con naturalidad, una posición equiparable a la del hombre. Es necesario reproducir aquí unos pocos fragmentos de lo escrito por Safo para entender mejor la contribución de la poesía lírica a la creación de lo que hoy nos parece tan natural en hombres y mujeres, la individualidad humana, de la que cierto tiempo después, en la propia Atenas, se derivó la ética. De manera sencilla, desinhibida y bella, la poetisa de Lesbos expresa en primer lugar su afán de felicidad personal:<sup>79</sup>

*ven, Cipris,  
y delicadamente, en copas de oro, escancia el néctar mezclado con  
goces  
(Fragmento 5)  
Yo amo lo delicado y se me concedió, con el amor, la luz del sol y lo  
bello  
(Fragmento 76)*

No obstante, respeta y estimula a los demás en la búsqueda de la felicidad de manera propia:

*Y yo le contesté:  
¡Adiós y sé feliz! ¡Sólo recuérdame, pues sabes cuán atada estoy a ti!  
Acuérdate al menos  
(oh, no lo olvides!)  
de las amadas y hermosas cosas que vivimos  
[que] no hubo colina profana  
o sagrada, ni fuente de aguas,*

<sup>78</sup> w• Jaeger, op. cit., libro primero, vii.

<sup>79</sup> Safo, Poemas, introducción, traducción directa y notas de Carlos Montemayor, Trillas, México, 1986, 160 pp. (Colección Linterna Mágica.)

*a donde no hayamos ido.  
(Fragmento 93)*

Generalmente, Safo canta con emoción a las mujeres que sobresalen en sabiduría, agilidad, ternura, o cualquier otra virtud, pues todo atributo admirable fortalece la dignidad y la dicha:

*En ningún tiempo creo que existirá,  
bajo la luz del sol, otra muchacha a ti comparable  
en saber.*

*Yo enseñé a Amanda de Gyaros, la veloz corredora.*

*(Fragmento 66)*

*(Fragmento 64)*

*Sólo mientras la miran tiene belleza la que es bella. Ahora y siempre,  
dignidad la que es digna.*

*(Fragmento 48)*

Y con hermosa generosidad elogia la virtud, tanto espiritual como física de los hombres:

*Me parece que igual a los dioses aquel hombre es, el que sentado  
frente a ti, a tu lado, tu dulce voz escucha y tu amorosa risa...*

*(Fragmento 2)*

La lírica de la gran poetisa de Lesbos no sólo es una bella manera de expansión personal en torno a ideas o situaciones, sino testimonio de vivencias íntimas de una amplísima gama, desde la solidaridad con cualquier otro ser humano:

*De este destierro de los hijos  
de Cleanáctides, la ciudad bastante  
recuerda, porque cruelmente los dispersaron.*

*(Fragmento 210)*

hasta el tierno amor maternal:

*Tengo una bella hija que parece  
como las flores doradas, la amada Cleis, a cambio de la cual ni toda  
la Lidia ni la agradable Lesbos aceptaría.*

*(Fragmento 141)*

Safo nos revela, pues, de modo conmovedor, el valor ético y estético que en la cultura griega alcanzaron los vínculos interpersonales francos y comprometidos, así como la libertad con que cada individuo configuró y cultivó sus propios valores en busca de una existencia plena para sí mismo y satisfactoria para los integrantes de los círculos a los que pertenecía, desde el más íntimo hasta el que abarca a la humanidad entera.

De la poesía lírica griega se desprende en general la sensación de que el yo griego no era solamente autoconciencia individual, sino también reconocimiento de una "íntima y viva conexión con la totalidad del mundo circundante, con la naturaleza y con la sociedad humana"<sup>80</sup> Conforme ese yo interactúa con el mundo exterior y va descifrando sus leyes, descubre a la vez su propia identidad. Así, el ser personal va cobrando conciencia de sus libertades frente a los demás y las normas colectivas, que sin dejar de

<sup>80</sup> w Jaeger, op. cit., libro primero, vn.



ampararlo van contrayéndose a normar sólo lo mínimo para mantener la cohesión social, mientras el resto queda a la decisión del individuo. Lo que expresa de modo transparente la poesía lírica griega no es ya la supuesta prescripción divina, ni la visión subjetiva del poeta sobre nociones que todos deben compartir, sino una nueva manera, un modo legítimo pero personal de definir lo aceptable y lo indecoroso, lo justo y lo injusto, lo honorable y lo vergonzoso. Éste fue uno de los grandes pasos de la humanidad hacia adelante, pues amplió el espacio propio de las decisiones individuales e hizo que la persona como tal se emancipara de la constricción colectiva y la tutela del Estado. El individuo ganó así reconocimiento público y se volvió más libre; sólo quedaba limitado, se diría que confortablemente limitado, por el marco de las leyes de la polis y por los valores colectivamente compartidos, entre los cuales la libertad misma era el mayor. Se revela, pues, en la poesía lírica griega, una conciencia de los límites que la responsabilidad impone; pero es ya una conciencia personal, libre de los condicionamientos del Estado e incluso de la tradición. Se había conquistado el reconocimiento de la identidad individual y, en consecuencia, del libre albedrío, fundamento último del humanismo y de la ética.

## **5. LA VOLUNTAD Y EL LIBRE ALBEDRÍO**

El que la poesía, con la expresa función educativa que en Grecia tuvo, y luego la ética aceptaran cada una en su momento que hay un espacio legítimo para las preferencias individuales es un hecho nuevo en la historia. Este crecimiento de los márgenes de la libertad daba reconocimiento social a los derechos de la vida personal, y no solamente en sus aspectos más privados.

La tensión, continua pero dialéctica, entre el perfeccionamiento individual y las obligaciones hacia los demás, que el carácter y el pensamiento griego plantearon siempre, lo mismo en las relaciones entre personas que en las de éstas con la estructura del Estado comenzaba a fructificar en una fórmula que hoy calificaríamos como moderna, dejando al propio individuo la responsabilidad de armonizar ambos polos para producir el ideal de la persona humana, libre y responsable a la vez. Seguramente tiene razón Jaeger al decir que a esto se refiere Píndaro cuando describe las características libertarias del Estado ateniense en contraste con la sujeción del individuo por el Estado espartano: "No escatimamos a nuestros ciudadanos los placeres, ni se los hacemos expiar con faz airada".<sup>81</sup>

Esta fórmula de sabor tan moderno nos dice que es inhumano complacernos en ser infelices o imperfectos, y que también lo es eludir nuestras responsabilidades. Para el hombre de hoy tal axioma es fruto óptimo de la dura experiencia ancestral; para los griegos de la era clásica, en cambio, fue el producto de su depurada y admirable intuición. Pero en ambos casos el fruto en sí, con todo su valor para fines existenciales, se expresa de igual modo: entre el ser (la genética) y el deber ser (la ética) está el querer ser; esto es, la voluntad personal y el libre albedrío.

---

<sup>81</sup> Tucídides, citado por W Jaeger, op. cit., p. 129.

## **6. VITALIDAD Y CULTURA**

Se comprende mejor el sentido del humanismo cuando se examina el papel que en su nacimiento jugó el ideal griego de abrazar lo humano en su totalidad, aspiración que ya en la Grecia clásica era antigua. De este ideal proviene el rasgo de la idiosincrasia griega que Nietzsche tanto ponderó: su alegre vitalidad; es decir, su voluntad de aceptar y desplegar sin represiones la vida y la naturaleza humanas en todas sus facetas, desde los poderosos instintos y capacidades del cuerpo hasta las potencias más sutiles de la razón y la espiritualidad: su voluntad de dejar correr a plenitud los primeros para transformarlos, sublimados, en las segundas.<sup>82</sup>

Según Nietzsche, nada ilumina con mayor claridad el ambiente de libertad creativa y de fermento vital característico de aquella cultura en la Atenas de Pericles que la convivencia productiva de ideologías racionales y actitudes religiosas. Evidencia de la hondura social de aquella amalgama eran las fiestas populares, denominadas dionisiacas en honor del primitivo dios Dionisos, que se celebraban cada año precisamente en el espacio en que se veneraba al refinado dios Apolo. Dionisos era la deidad antiquísima de la voluptuosidad y la fuerza instintiva, en tanto que Apolo lo era de la medida, la racionalidad y la sensibilidad artística.

Los atenienses intuyeron genialmente, y quizá con terror, que Dionisos, el dios salvaje que heredaron de su más remoto pasado, era en cierto grado una imagen de sí mismos. Aceptar el salvajismo del derroche sensual y la crueldad de comer animales vivos, reconociendo en ello su propia naturaleza, sin tapujos y sin culpa, fue el paso previo indispensable para concebir inmediatamente la necesidad de canalizar y tamizar esa energía desmesurada mediante otro instinto humano igualmente poderoso, el instinto creativo, que transfigura la fuerza humana primigenia (lo dionisiaco) en cultura (lo apolíneo). Éste es el significado que Nietzsche asigna a la celebración de las fiestas dionisiacas en el recinto de Apolo, y tal el mecanismo profundo al que atribuye la creatividad cultural de Atenas.

Freud validaría la interpretación nietzscheana al iluminar aún más profundamente, mediante su teoría de la represión y la sublimación, el proceso por el cual lidiamos los humanos con nuestros instintos primitivos: la represión de ellos conduce al sentimiento de culpa y la destrucción de nuestra potencialidades; la aceptación y sublimación de los mismos nos lleva transfigurar la energía vital en algo creativo, en cultura.

## **7. UN FUNDAMENTO HUMANO PARA LA ÉTICA**

Por esa larga, compleja y afortunada vía fue que los antiguos griegos llegaron paso a paso, por primera vez en la historia, a concebir y cultivar una manera elevada de vivir la vida humana, que podremos resumir en la siguiente lista de actitudes vitales:

---

<sup>82</sup> F. Nietzsche, *El origen de la tragedia*, Porrúa, México, 1999, 118 pp. (Colección 'Sepan Cuantos..')

1. El reconocimiento de la subjetividad, con sus potencias y limitaciones, como la única forma de aproximarnos al conocimiento del universo, que por tanto resulta no un ente ajeno y separado de nosotros, sino el todo del que somos parte; eso que al responder a nuestras acciones nos informa sobre su propia naturaleza, pues es actuando, más que contemplando, como nos forjamos una idea del mundo que nos rodea, para luego hacernos una mejor morada en su seno y finalmente construir una vida satisfactoria armonizando nuestros deseos con los de nuestros semejantes y con la naturaleza. Y si interactuar con el universo, que incluye a nuestros semejantes, es lo que nos humaniza, entonces es evidente que nuestra felicidad no depende de ninguna divinidad, sino de que nuestras acciones nos produzcan satisfacción, lo que se vuelve el fundamento de la ética.<sup>83</sup>

2. Un respeto idéntico a todos y cada uno de los individuos, con lo que esto exige de consideración al espacio de las libertades personales, de modo que cada quien pueda hacerse un lugar que le acomode en la sociedad, donde podrá exigirse cuanto quiera a sí mismo, a sabiendas de que siempre topará, tanto a su alrededor como en su propia persona, con lo noble y lo vil, lo honesto y lo chapucero, el amor y el aborrecimiento, la belleza y la fealdad, la audacia y la timidez, la agudeza y la tontería, la pasión y la razón, pues todo ello es propio de la naturaleza humana, y cada quien tiene su particular dotación de tales atributos

3. La valoración, también alta y pareja, del trabajo paciente y del esfuerzo heroico

4. La aceptación de nuestra naturaleza como unidad dual de cuerpo y espíritu, con lo que ello implica de disfrute sin culpa de nuestros placeres, sin más restricción que el respeto a los demás y la responsabilidad ante ellos.

En un ambiente así, donde hervían juntos el legado de la sabiduría popular de origen religioso, la filosofía de los mejores y más libres pensadores, y el valor colectivo para sacar de uno y otra sus consecuencias prácticas, fue que ocurrió la genial intuición expresada en el dicho de Protágoras: el hombre es la medida de todas las cosas. Así nació la participación y la responsabilidad del hombre en su propio destino, inhibida después por otras épocas e instituciones pero vuelta a renacer. En esto consistió la hazaña de la humanidad que los griegos llevaron a su máximo en los siglos V y IV a.C. El escenario de todo ello fue la Atenas que mantuvo en tensión todo resorte humano y que ejerció su poder y su soberanía con voluntad férrea, a la vez que llevaba a la práctica (si bien sólo en el círculo de sus propios ciudadanos) la democracia, que igualó ante la ley a plebeyos y aristócratas y que obligaba a funcionarios y generales a rendir cuentas explícitas al resto de sus conciudadanos.

Como corolario del humanismo griego nació la ética, un arte del comportamiento que ya no requirió de mandatos divinos, sino de la racionalidad humana como fuente de sus normas de conducta. Esta ética laica tuvo enorme importancia en el desarrollo ulterior en la cultura de Occidente por el énfasis que puso en la libertad y la responsabilidad

---

<sup>83</sup> Por cierto, esta particular actitud sintetiza de manera muy completa el talante que los ingenieros han de adoptar en el cumplimiento de su función transformadora del mundo.

personales, que son sus condiciones básicas. La ética nació con el postulado socrático de que el objetivo de la vida es la eudemonía (la felicidad propia y ajena). Aristóteles y los mejores pensadores occidentales de los tiempos siguientes continuaron desarrollando y puliendo esa noción hasta alcanzar en el siglo xvii una de sus más categóricas y sencillas conclusiones, cuando Spinoza demostró que no hay bueno ni malo fuera del ser y la escala humanos: nueva expresión del viejo axioma de Protágoras.

## 8. EL HUMANISMO Y SUS AVATARES

Con su terrenal sencillez y su fortaleza básica, el humanismo, originalmente griego, es adoptado luego por Roma y su imperio. Aunque se anquilosa y dogmatiza después durante mil años (tras la caída del Imperio romano y la expansión de un cristianismo primero humilde y libertario pero luego militante y represivo), el humanismo resurge, como hemos, visto en el Renacimiento. Después fructifica de mil maneras: en la ciencia moderna desde el siglo xvii hasta nuestros días (véase el capítulo vii), en los vientos democratizadores que barren los mapas de Europa y América desde finales del siglo xviii, e incluso como tenue hilo de Ariadna que guió algunos pasos de la humanidad en el laberinto de complejidades políticas del siglo xx.

Cabe aquí una pregunta: ¿qué ocurrió para que durante mil años de la Edad Media el humanismo griego se inhibiera tan eficazmente hasta casi extinguirse antes de renacer fortalecido alrededor del siglo xv? La respuesta es sencilla, pues bastó con que las nociones predominantes sufrieran cuatro cambios: a) transformar la noción del daimonion griego (la unidad-dualidad de Dionisos y Apolo que amalgamaba el instinto y el espíritu) en el demonio cristiano (agente sólo del mal) para luego equipararlo con la innata y sana propensión de los humanos al placer, sea llano o sublimado; b) trocar el concepto de los dioses helenos (tan humanos en sus virtudes y pasiones) por el del Dios concentrador del bien absoluto, equiparando entonces la propensión humana al placer con una manifestación del demonio, esa personificación del mal absoluto; c) rebajar el trabajo humano de la categoría de actividad que dignifica a la de ocupación degradante o castigo divino (noción corregida después, pero sólo por la corriente cristiana seguidora de Lutero); d) abolir la libertad del individuo como sujeto del universo mediante la imposición de una ortodoxia, única autorizada para sancionar cualquier saber, con el apoyo de los tribunales de la Inquisición para disuadir a quienes quisieran pensar por sí mismos.

Tales visiones oscuras siguen resurgiendo de vez en cuando aquí y allá. Al concentrar todo el bien en Dios y todo el mal en el demonio, y considerar irreconciliables los instintos corporales y los del espíritu, las ideologías autoritarias intentan repetidamente hacer del hombre un ser esquizofrénico, partido en dos mediante la represión que coartaría su individualidad, su creatividad, y en consecuencia, su visión integral de la vida.

Hasta aquí, a grandes rasgos, las raíces, los avatares y el sentido del humanismo, ideología que recoge de la historia la visión más aceptada de los fines y los medios de los seres humanos, y que por tanto guía también los criterios con que la ingeniería cumple sus funciones.

## 9. EL HUMANISMO HOY

En términos actuales, el humanismo consiste en reconocer el hecho de que el hombre es capaz de elegir por sí mismo, sin coacción de fuerzas o leyes externas a él, lo que quiere ser entre una gama ilimitada de posibilidades. A la vez, el humanismo actual tiende a ser, hasta donde las capacidades y limitaciones humanas lo permiten en cada caso:

1. Racional, pues busca activamente que el conjunto de ideas o deseos en que basa sus decisiones estén libres de contradicciones internas.

2. Laico, ya que no depende de mandatos por encima de lo humano.

3. Hedonista, dado que busca maximizar la felicidad propia, a sabiendas de que ésta depende de la de los demás.

4. Solidario, en vista de que considera que “nada de lo humano le es ajeno”

5. Activo, pues cree que las actitudes puramente contemplativas no pueden darnos sino una pequeña porción de lo que los humanos requerimos.

6. Heterofílico, pues reconoce que la verdad que cada sujeto percibe es fragmentaria y puede ser errónea; por tanto, sólo considera válido descalificar una opinión si se demuestra que carece del debido fundamento, y para decidir ante problemas trascendentes busca activamente los puntos de vista de otros, preferiblemente de quienes serán afectados por la decisión (más aún si son muchos) y propugna por poner en juego la capacidad humana de empatía para comprender los puntos de vista de los demás, incluso de quienes no pueden expresarse; por ejemplo, quienes aún no nacen pero constituirán las generaciones futuras afectadas por decisiones de hoy.

Es evidente que tal doctrina constituye una guía de utilidad práctica susceptible de ser adoptada por todos los seres humanos, y es de gran valor para el ingeniero al momento de tomar, junto con su cliente y la sociedad, las decisiones profesionales que le corresponden en la búsqueda de medios para satisfacer necesidades materiales de uno y otra.

De la lista precedente de atributos del humanismo moderno se infiere que éste implica respeto a la dignidad de todas las personas y consideración a sus necesidades e intereses, lo cual no exige renunciar a los nuestros, sino conciliar unos y otros. Para ello hace falta partir de la identidad propia y reconocer la de los demás. Al respecto, es importante considerar que ninguna identidad es unidimensional. Cada quien es simultáneamente miembro de una gran variedad de grupos, entre ellos los constituidos por familiares, amigos, colegas, compatriotas, contertulios, personas afectas a nuestras ideas y costumbres, etc. Sin contradicción, se puede ser a la vez varón, mexicano, de ascendencia asiática, médico, cristiano, vegetariano, liberal, melómano, heterosexual, etc. La pertenencia a cada una de esas diversas colectividades da un componente a la identidad de la persona de que se trata, pero ninguna de tales particulares pertenencias es su única

identidad. Incluso afiliaciones pasadas matizan la identidad. En síntesis, la identidad está en la historia completa de cada quien.

Para ser congruente ante cada ocasión, uno tiene que razonar, ponderar el peso relativo de sus diversas identidades, y escoger libremente una manera de actuar, pues no podría seguir siendo lo que es si ignora a priori cualquiera de ellas o si asume que no tiene ninguna. La identidad de cada persona es única en el sentido de que la diversidad de identidades que conviven en ella hace que su repetición en otra persona sea improbable. En este sentido cada quien es, en efecto, idéntico sólo a sí mismo y, por tanto, sólo él tiene derecho a dar, como sujeto libre, prioridad a alguna de las facetas de su identidad. Así fue que Gandhi optó por actuar en su momento como independentista hindú, pese a pertenecer a la vez a la elite intelectual inglesa. En cambio, se comete una arbitrariedad cuando se asigna a otras personas una cualquiera de sus múltiples identidades sin su consentimiento, y se les destina a confrontarse con base en ella, sea la nacionalidad (como en el chovinismo), o la religión (como cuando se identifica el terrorismo con un credo religioso), o cierta tradición cultural (como en la supuesta guerra de civilizaciones). La visión unidimensional de las identidades personales es grave porque empuja a la confrontación por un solo motivo e impide conciliar intereses compartidos de importancia mayor.<sup>84</sup>

## ***XI. Ética e ingeniería***

### **1. DEFINICIONES Y ESCLARECIMIENTOS**

En aras de la claridad, comenzaremos por definir tres términos que luego aparecerán reiteradamente a lo largo del capítulo; a saber, moral, ética y código moral (o código de conducta).

La moral es el conjunto de costumbres o comportamientos que una sociedad considera aceptables en sus individuos. En consecuencia, se dice que alguien es moral cuando vive en concordancia con las costumbres de la sociedad de que forma parte. Quien viola esas costumbres es mal visto y más o menos marginado de ella.

La ética es una disciplina de la filosofía que estudia de manera sistemática lo que es bueno y lo que es malo para el individuo y la sociedad humana. Surge del humanismo de la Grecia clásica (véase capítulo x, apartado 7), a partir de la noción de que el hombre cobra conciencia de sí mismo cuando actúa y observa que sus actos afectan a sus semejantes y modifican su entorno, lo que le produce emociones agradables o desagradables. De ahí el hombre de razón concluye que el mejor modo de vivir es realizar actos capaces de producirle esa emoción característicamente humana que llamamos felicidad, y que nace de sentir satisfacción por lo que hace. Sócrates llamó eudemonía a tal manera de vivir, de donde proviene el postulado básico de la ética: que el objetivo último de la vida humana es la búsqueda de la felicidad.<sup>85</sup> ¿Por qué habría de ser la felicidad el único objetivo de la vida? Porque la felicidad es un bien que nunca es medio, sino solamente fin, el bien supremo (summum

---

<sup>84</sup> Amartya Sen, *Identity and Violence*, W W Norton & Co., Nueva York, 2006, 216 pp.

<sup>85</sup> Explícitamente o de modo tácito éste es un postulado que la mayoría de los grandes filósofos de la ética ha adoptado, a partir de Aristóteles. En cambio, ninguno de ellos ha dado recomendaciones más específicas sobre qué hacer para ser feliz; hay buenas razones para que así sea, pues lo que da felicidad cambia de una cultura a otra y con el tiempo, además de que, por supuesto, es distinto en cada persona.



bonum), el bien por el que se desean otros bienes y sin el cual éstos carecen de sentido.

Una ética, por su parte, es un sistema lógico constituido por dos conjuntos de postulados: uno de axiomas (aseveraciones de validez evidente o que se aceptan sin demostración) y otro de reglas de inferencia. De tal sistema es posible deducir normas de conducta válidas en cualesquiera circunstancias. Para esclarecer conceptos tomemos como ejemplo una ética muy sencilla constituida por los siguientes dos axiomas y dos reglas de inferencia o decisión:

- Axioma 1: La felicidad es el bien supremo de los seres humanos.
- Axioma 2: Lo que más contribuye a la felicidad es, en orden decreciente de importancia: a, b, c, d, ..., en que cada una de estas letras representa lo que se denomina un valor social (por ejemplo, la satisfacción de las necesidades biológicas básicas, la salud, el respeto a la dignidad humana, la cohesión social, la veracidad, la prudencia<sup>1</sup> el cuidado del medio ambiente, la belleza, la riqueza, la caridad, etc.), y el conjunto de todas ellas es la lista jerarquizada de lo que se considera deseable por dar felicidad.
- Regla de inferencia 1: En cada caso debe escogerse la decisión que haga máxima la felicidad del conjunto de todos los seres humanos.
- Regla de inferencia 2: El peso que se dé a la felicidad de cada uno de los seres humanos debe ser idéntico.

Evidentemente esta ética permite a toda persona tomar decisiones ante cualquier dilema moral. Pero es posible postular otras éticas; para ello basta adoptar alguna variante en axiomas y/o reglas de inferencia, que es la aportación hecha a lo largo de la historia por los filósofos y pensadores más importantes de distintas épocas (Platón, Aristóteles, Aquino, Hobbes, Spinoza, Hume, Kant, Bentham, Mill, Nietzsche, Freud, Popper, Sartre, E. O. Wilson, etc.). Naturalmente, éticas distintas conducen a decisiones diferentes.

Si en la ética de nuestro ejemplo se sustituyera el axioma 1 por “El bien supremo es complacer a Dios” y el axioma 2 se cambiara por un postulado axiomático que listara en orden jerárquico lo que place a Dios, se tendría una ética religiosa en vez de la ética laica y humanista anterior. En cambio, si se quisiera que la ética laica inicial se aproximase a una ética cristiana sería muy poco lo que habría que cambiar, pues la regla de inferencia 2, al dar idéntico peso a las felicidades de todos los seres humanos, ya cumple con el mandamiento cristiano que prescribe “Amarás a tu prójimo como a ti mismo”; si acaso, para el propósito indicado habría que jerarquizar de modo diferente la lista de valores del axioma 2 a fin de dar prioridad a los valores espirituales sobre los materiales. Si se quisiera una ética aún más altruista que la cristiana, la regla de inferencia 2 tendría que modificarse de algún modo como el siguiente: “Debe darse peso menor a la felicidad del decisor que a la de los demás seres humanos, y peso idéntico a la de todos éstos”.

La ética puesta aquí como ejemplo también satisfaría el postulado que Kant denominó imperativo categórico<sup>86</sup> (“Actúa de modo que tu conducta pueda ser norma universal”), pues éste implica considerar a todos los seres humanos merecedores de idéntico trato y consideración y, por tanto, coincide con la regla de decisión 2. También coincidiría con una ética basada en la regla de oro (“Trata a los demás como quieras ser tratado”).

---

<sup>86</sup> 2 E. Kant, *Crítica de la razón práctica*, caps. i, vi-vii, en *Great Book of the Western World*, Encyclopedia Britannica, vol. 42, Chicago, 1952.

Por otro lado, sería posible especificar una ética que tomara en cuenta a los animales además de los humanos, como corresponde a la sensibilidad contemporánea por el buen trato a todos los seres sensibles: bastaría con introducir tal prescripción específica en las dos reglas de inferencia del ejemplo, etcétera.

Entre la infinidad de éticas posibles, importan sobre todo aquellas que no sirven sólo a los fines de un individuo o un grupo, sino que responden a los intereses generales y, por tanto, pueden ser validadas por la aceptación social. En el mundo interdependiente de hoy, interesarían aún más las que pudieran ser aceptables por toda la humanidad, que en principio podrían ser éticas laicas y con otros atributos aceptables por todas las religiones y culturas contemporáneas; sin embargo, en el mundo terriblemente desigual de nuestro tiempo, esto parece ser una aspiración todavía inviable, en virtud de que una ética compartida nace de que los intereses objetivos que unen a la gente sean más fuertes que los que la separan.

En el contexto del humanismo moderno referido en el capítulo x (apartado 9), son de interés las éticas cuyos postulados respetan el derecho a la propia identidad; es decir, a ciertas diferencias individuales. Este tipo de éticas caben sin mayor dificultad en cualquiera de las formulaciones laicas ejemplificadas en párrafos previos, con tal de aceptar que el individuo tenga la libertad de jerarquizar los valores del axioma 2 según sus propias preferencias.

Para completar el conjunto de definiciones necesarias diremos que un código moral o de conducta es un conjunto de normas de comportamiento que prescriben cómo actuar de manera socialmente aceptable; es decir, una lista de reglas que la sociedad desea que sigan todos sus integrantes. Aprendemos el código moral del medio en que vivimos, y luego lo aplicamos espontáneamente. Modificarlo exige un gran esfuerzo consciente.

De una ética se pueden derivar diversos códigos de conducta, según el tipo de problemas morales en los que se enfoque la atención. Si ésta se centra en las decisiones ordinarias de la vida de todos los integrantes de la sociedad, resultará un código de conducta general, aplicable a las decisiones más frecuentes que toma cualquier persona; si el objeto focal es el comportamiento de algún grupo social, se tendrá un código de conducta más particular (que puede ser tan amplio como los diez mandamientos de la moral cristiana, aplicable a todos los que profesan tal credo religioso, o tan especializado como los códigos de conducta de gremios, profesiones, clubes, etcétera).

La diferencia más importante entre una ética y un código moral es que la primera está formulada en términos de las consecuencias de nuestra decisión, y la opción correcta debe inferirse de ellas, en tanto que el segundo simplemente prescribe las decisiones sin referirse en modo alguno a sus consecuencias, que quedan implícitas. En esa diferencia radican las ventajas y desventajas relativas de conducirse con base en una ética o en un código moral; lo más conveniente es disponer de ambos, según las circunstancias. En efecto, sería muy engorroso que para cualquier decisión de las muchas que diariamente tomamos tuviéramos que hacer tanto estimaciones de la felicidad del conjunto de todos los seres afectados como el cálculo de las conse-

cuencias de cada posible opción con base en los axiomas y reglas de inferencia de una ética; para esos casos es preferible actuar conforme a un código moral. Por otra parte, al enfrentar problemas morales novedosos o poco frecuentes, los códigos de conducta son inútiles, pues sólo contienen normas aplicables a un número reducido de casos ordinarios. Un código

moral es como un recetario: ordenado, útil y fácil de usar, pero finito, y por tanto insuficiente para toda la gama de dilemas morales que pueden presentársenos. Aún más importante, un código moral no permite incorporar en nuestra tabla de valores preferencias individuales, aunque sean socialmente aceptables, a fin de crear nuestro propio arte de vivir. En síntesis, una ética es una estrategia racional aplicada a buscar la buena vida y, por tanto, no cabe en ningún código que simplemente estipule obligaciones y prohibiciones.

Al tratar cada uno de los tópicos que iremos abordando en este capítulo nos referiremos a estas y otras diferencias de los códigos morales vis a vis la ética, así como a consecuencias varias de las definiciones precedentes.

## **2. RELACIONES ENTRE INGENIERÍA Y ÉTICA**

Con justicia suele verse la ingeniería como la actividad creadora, imaginativa y transformadora por excelencia, pues su propósito expreso es modificar el entorno natural para mejorar la calidad de vida de los seres humanos. Pero todos los sistemas de la naturaleza están interconectados directa o indirectamente y, por tanto, no se puede modificar uno sin alterar otros involuntariamente. Por eso es inevitable que, además de los efectos positivos buscados por cada creación de la ingeniería, resulten otros que pueden no ser deseables. Toda actividad práctica adolece de este mismo problema; por ejemplo, la medicina, a la vez que cura, suele producir efectos secundarios perjudiciales. Es aceptable que así suceda, siempre que, por un lado, no haya opción mejor y, por otro, la magnitud de los efectos indeseados sea mucho menor que la de los beneficios. Cualquier decisión práctica tiene, por consiguiente, un carácter ético, ya que obliga a buscar, para el conjunto de seres afectados, que la diferencia entre efectos positivos (beneficios) y negativos (costos) resulte a favor de los primeros y sea lo más grande posible.

Pocas profesiones convierten tantas ideas en realidades como la ingeniería, que por esto suele tener grandes consecuencias de todo tipo en la vida diaria de las personas. De aquí que la responsabilidad de los ingenieros sea también comparativamente más grande, y que su formación ética sea una cuestión central en esta era tecnológica. En efecto, la evolución científico-técnica ha hecho que el poder transformador de la tecnología sea cada vez mayor y, por tanto, se puedan causar inadvertidamente efectos no deseados de gran magnitud. Entonces las decisiones de la ingeniería no sólo tienen connotación ética, sino que se vuelven con toda justificación asuntos de interés público. No se trata de algo inusitado, sino de una consecuencia natural de ese creciente poder de la tecnología y de la obligación profesional que el ingeniero tiene de responder ante la sociedad por sus decisiones. En consecuencia, la mejor manera de proceder en muchos casos es tomar decisiones en consulta e interacción con otros actores sociales. Cuanto más trascendente es un proyecto, dejarlo en manos sólo de ingenieros es tan grave como excluir a éstos de la decisión; ambos extremos carecen de sentido. Lo racional es que los ingenieros cobren conciencia de lo delicado de su función y, con una perspectiva amplia de los problemas que manejan, busquen la participación social en sus decisiones. A la vez, los ciudadanos deben asumir que todo proyecto llevado a la práctica tiene efectos deseables e indeseables cuyo atinado control exige la participación tanto social como de expertos. Mediante mecanismos institucionales, la sociedad debe intervenir, primero, en la toma de ciertas decisiones de diseño, y luego en el seguimiento y control de los proyectos en operación. Sin embargo, esta corresponsabilidad de ingenieros y sociedad es todavía insuficientemente reconocida.

Hay incluso quienes creen que la ingeniería no implica problemas éticos porque, dicen, esta profesión sigue métodos, procedimientos y criterios de decisión racionales y se basa en conocimiento científico o empírico probado y ajeno a cualquier valoración distinta de la veracidad. Es cierto que la valoración del conocimiento en sí y de los procesos lógicos a que se le somete son independientes de la moral, pero el propósito al que el conocimiento se aplica sí es susceptible de un juicio ético, y otro tanto puede decirse del modo en que el proyecto se realiza. Siempre hay más de

una manera de cumplir cualquier objetivo, y la ética prescribe que debe escogerse la que, de acuerdo con ciertos criterios de decisión, es la mejor. Fijar o aceptar el propósito de un proyecto y escoger el modo óptimo de realizarlo son sin duda decisiones ingenieriles de carácter ético. Un proyecto de ingeniería puede ser malo si produce bienestar general menor que sus costos sociales directos e indirectos, bueno en caso contrario, y mejor cuanto mayores son los beneficios con respecto a los costos.

También suele decirse que en ingeniería la ética se reduce a la eficacia, y que basta con que sus obras y productos funcionen para que sean éticamente aceptables; es decir, que cumplan su función especificada y no fallen. Por supuesto, la eficacia es condición necesaria de toda solución a un problema de ingeniería, pero es evidente que no basta para fines morales: entre dos obras que funcionan como es debido es mejor la que cuesta menos, y entre dos que son igualmente funcionales y cuestan lo mismo es preferible la que más place a quienes la usan, etcétera.

A la inversa, hay quienes atribuyen obligaciones morales no sólo a la ingeniería, sino también a sus dos insumos principales: la tecnología y la ciencia. Esto es insostenible y proviene de una delimitación confusa entre ciencia, tecnología e ingeniería, propiciada por la manera tan íntima en que las dos primeras se combinan al resolver cualquier problema práctico. Las diferencias y relaciones entre las tres se abordan desde distintas perspectivas en los capítulos v, vii y xii. Lo que de ahí se desprende es que ciencia y tecnología ponen sus resultados al servicio de la ingeniería, y es ésta la que puede usarlos para bien o para mal. La asignación de propósito a un proyecto y el modo en que éste lo cumple pertenecen claramente al ámbito de la ingeniería, y no al de la tecnología ni al de la ciencia, que son sólo medios de los que la ingeniería se vale; atribuir a la ciencia o la tecnología el sentido ético de lo que con su mediación se hace sería equivalente a sostener que la mano, y no el individuo a quien pertenece, es responsable de la ayuda o del agravio que con ella se cause a alguien. Así pues, la ciencia (o el conocimiento que genera) y la tecnología (o los medios productivos que crea) no pueden ser valorados sino por su veracidad, en el primer caso, y por su eficacia en el segundo, y no como moralmente buenas o malas en sí mismas.<sup>87</sup> Es la decisión de para qué y cómo usar cierto conocimiento científico o recurso tecnológico la que debe someterse a escrutinio ético, y en los casos de mayor trascendencia esto debe hacerse con participación social. El resultado es responsabilidad conjunta del ingeniero y la sociedad.

También ocurre que entre quienes aceptan la pertinencia de lo moral en los actos de la ingeniería y demás ocupaciones prácticas, muchos parecen asumir que la ética aplicable a tales casos ha de ser una doctrina especial, una ética de la técnica particular de que se trate, distinta de la ética de aplicación general. Hablan de ética ambiental si se trata de que la ingeniería tome en cuenta los efectos de sus actos en el entorno natural, o de bioética si de considerar las posibles repercusiones futuras de la manipulación genética, o de ética informática en cuanto se refiere al uso práctico de las herramientas telemáticas, etc. Sería más apropiado hablar en tales casos de códigos de conducta y no de éticas. Lo cierto es que tales problemas éticos son novedosos, y que sobre ellos hace falta reflexión, discusión pública y consenso social, por lo que aún no aparecen en códigos morales socialmente aceptados. Lo que es bueno o malo en tales campos debe abordarse en el marco de una ética axiomática constituida, como se discutió en el apartado anterior, pues no hay otro modo de comparar opciones de conducta alternativas en función de sus consecuencias.

El desarrollo tecnológico va creando medios e instrumentos que permiten hacer lo que antes era imposible; esto plantea continuamente

---

<sup>87</sup> Reséndiz, "Sobre la racionalidad de la tecnología Complementos, nueva época, núm. 2, Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos, UNAM, 1987, 9 pp.

nuevos problemas éticos. Además, para un mismo fin se crean cada vez tecnologías más poderosas y, por tanto, de mayor riesgo. Hay, pues, nuevos dilemas éticos y riesgos nuevos o mayores que deben encararse en el marco de la ética. Cada vez que la evolución social o tecnológica plantea una disyuntiva moral novedosa se requiere un alto en el camino para resolverla mediante criterios de la mayor generalidad posible. En conclusión, si bien cada época crea dilemas morales nuevos, todos ellos se pueden resolver en el marco de la ética aplicable a nuestros demás problemas; los dilemas pueden ser nuevos y especializados, pero para resolverlos cada quien debe adoptar una ética general y una sola.

Finalmente, cabe una reflexión, aunque no pueda ser sino somera, sobre la formalidad de las decisiones éticas en ingeniería. Dado que el resto de los procesos intelectuales de la profesión tiene un alto grado de formalidad, según se describió en el capítulo iii, es razonable que surja la expectativa de que las capacidades de formalización y cuantificación del ingeniero se extiendan de las cuestiones técnicas a sus decisiones éticas. Se supone que la capacidad matemática o de cuantificación del ingeniero contribuye a su buen desempeño moral si, además, ha recibido una educación ética de excelencia: la sociedad asume que en tal caso el ingeniero, aparte de ser capaz de estimar con rigor científico el comportamiento de los sistemas físicos que diseña, puede hacer una mejor estimación de los efectos que sus decisiones acarrearían a los seres afectados por ellas. Tal parece ser la base del alto grado de confianza social, prestigio y estima de que gozan, por ejemplo, los ingenieros de elite en Francia.<sup>88</sup> Aunque no es usual, ciertamente es posible dar a un gran número de problemas éticos un planteamiento de mucho mayor rigor, incluso matemático, y por tanto cabría esperar que tal formalidad se aplicara con mayor frecuencia al menos ante las decisiones más trascendentes, pues existen bases metodológicas para ello.<sup>89</sup>

### 3. LA ÉTICA EN LA HISTORIA DE LA INGENIERÍA

La práctica de la ingeniería sirve sobre todo a la sociedad y no sólo a cada cliente, pues sus obras y productos afectan no nada más a quienes realizan o patrocinan un proyecto, sino a muchos otros, para bien o para

---

<sup>88</sup> G. Downey, J. Lucena y C. Mitcham, "Engineering ethics in global perspective", documento electrónico, comunicación personal de Juan Lucena.

<sup>89</sup> En efecto, la definición operativa de ética enunciada en el apartado 1 se puede expresar matemáticamente, tanto en un contexto determinista como en uno probabilista. En el caso más simple la suma de felicidades que se debe maximizar estaría dada por la expresión matemática  $F = \{i \text{ a } f_i(t) dt\}$ , donde  $F$  es la suma de felicidades asociada a cada opción de conducta,  $i$  denota al ser sensible  $i$ -ésimo, la suma se extiende a todas las  $i$  (es decir, a todos los seres cuya felicidad o bienestar se considere), la variable tiempo comienza a contarse en el instante de la decisión y se extiende indefinidamente hacia el futuro,  $a$  es un factor de ponderación que quien toma la decisión aplica a la felicidad del ser  $i$ -ésimo y  $f_i$  es la felicidad de este mismo ser (E. Rosenblueth, "Decisiones éticas en ingeniería", *Ingeniería*, vol. 40, núm. 4, octubre-diciembre, México, 1970, pp. 383-398). Se puede demostrar que, si la asignación de felicidades se basa en una misma escala de valores, esta formulación conduce a una decisión ética idéntica a la de una formulación tradicional, en el supuesto de que en esta última la intuición fuese capaz de estimaciones tan acertadas como la matemática (D Resendiz *Ética para decisiones tecnológicas [o ética explícita versus ética intuitiva]*", *Ingeniería Civil*, núm. 308, México, 1994, pp. 9-19). Aparte de su confiabilidad, el planteamiento cuantitativo de las decisiones éticas puede ofrecer ventajas para legitimar socialmente las decisiones, por cuanto facilita el análisis participativo de ellas y su discusión con mayor probabilidad de convergencia; también es útil para afinar decisiones por iteración y así sopesar el efecto de cambios en el valor de ciertos parámetros y, finalmente, para afinar la intuición de quien usa este tipo de planteamiento.



mal; de ello resulta que las decisiones en esta profesión siempre se den en un contexto ético. Se puede asegurar que la sociedad tuvo conciencia de esto desde el momento mismo en que el ingeniero se diferenció por su actividad; una prueba de ello es el Código de Hammurabi, rey de Babilonia (1795-1750 a.C.). En él se prescribían tanto la remuneración debida al constructor de casas como las penas que se le aplicarían si sus edificaciones exhibieran los tipos de falla especificados en el propio código.<sup>90</sup>

---

<sup>90</sup>Código de Hammurabi, normas 228-233.

No solamente son del dominio público las responsabilidades éticas del ingeniero, sino que en ciertas sociedades éste es considerado un profesional especialmente confiable en la toma de decisiones morales difíciles, según lo dicho en el último párrafo del apartado anterior. En diversos países los ingenieros, como los médicos, gozan de una imagen pública que les atribuye una sólida formación ética adquirida de modo esencialmente tácito; es decir, por el ejemplo de maestros y pares, y cuya continuidad se remonta a la historia. El grado en que este supuesto se cumple varía en la geografía y con el tiempo; pero la tradición subsiste, principalmente en la ingeniería civil, origen del resto de las ingenierías de hoy. Por ejemplo, la American Society of Civil Engineers (ASCE), una de las grandes agrupaciones de ingenieros con cobertura internacional, desde su fundación en 1852 y hasta 1914 declinó adoptar un código colectivo de conducta, pues lo consideró impropio de profesionales conocedores de que su misión sólo puede cumplirse con plena responsabilidad individual mediante el apego de cada quien, en su caso, a los principios morales socialmente compartidos.<sup>91</sup> Estos supuestos son evidentes en la iniciativa que dio origen a la formación de ingenieros en México: de acuerdo con los ideales del siglo XVIII o de la Ilustración, el fin explícito de tal iniciativa era “promover el bien común y el progreso” mediante la aplicación de la ciencia a la innovación técnica. A cargo de ese cometido, el Real Seminario de Minería comienza a operar en enero de 1792, y es, por tanto, la primera institución de su tipo en América; nace y se mantiene laico a pesar de presiones en contra y asume la tarea de lograr “la buena educación de los colegiales en la vida cristiana y política”, haciéndolos convivir con sus educadores “para que de este modo, al tiempo que tomen instrucción de la facultad, adquieran también los modales de la sociedad”, a cuyo fin comerán regularmente con el rector, el vicerrector y el mayordomo, quienes “observándolos de cerca puedan cuidar que estén con aseo y [...] los acostumbren a las civilidades recibidas en la sociedad [...] y para evitar toda envidia, alternarán por semanas de una mesa a otra” Es decir, no sólo se buscaba tener altos estándares científicos y profesionales, sino formar “sujetos educados en buenas costumbres e instruidos en toda la doctrina necesaria para dirigir con acierto las operaciones y el laborío de las minas<sup>92</sup> que entonces constituían el grueso de la economía de la colonia y su metrópoli.

Nociones similares inspiraron a las primeras escuelas de ingeniería de Europa, que surgen pocos decenios antes que la de México durante el mismo siglo XVIII. La diversificación de modelos educativos y gremiales de país a país ocurre durante los siglos XIX y XX, hasta que la segunda Guerra Mundial marca un parteaguas que de nuevo introduce un propósito común. En efecto, las atrocidades del nazismo y su fría eficacia técnica sacudieron la conciencia de la civilización hasta sus propios cimientos filosóficos: dado que la ética se basa en cierto concepto de la naturaleza humana ¿era concebible que en nuestra especie cupieran lado a lado Hitler y Gandhi? De la respuesta afirmativa a esta pregunta surgió un movimiento universal cuya intención era al menos reducir la probabilidad de que científicos y profesionales deshumanizados volvieran alguna vez a seguir dictados de políticos criminales. Se pensó que a ese fin una educación profesional con

---

<sup>91</sup> American Society of Civil Engineers, Standards of Professional Conduct for Civil Engineers, Appendix, ASCE, Washington, 3 de abril de 2000, p. 10.

<sup>92</sup> Clementina Díaz y de Ovando, Los veneros de la ciencia mexicana. Crónica del Real Seminario de Minería, vol. 1, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 1988, pp. 35-47.

contenidos expresamente humanistas sería lo apropiado, aunque apenas en 1972 se consensuaron recomendaciones prácticas.<sup>93</sup>

---

<sup>93</sup> Las Ciencias Sociales y las Humanidades en la Educación de Ingenieros, seminario internacional de la UNESCO, Bucarest, 1972.

Cinco años antes de la fecha de aquellas recomendaciones, la Facultad de Ingeniería de la UNAM estableció en 1967 lo que hoy es su División de Ciencias Sociales y Humanidades e incorporó en cada uno de sus planes de estudio cinco cursos de estas disciplinas, en conjunto equivalentes a 7% del total de créditos.<sup>94</sup> Con variantes menores, esto se mantiene hasta hoy; los profesores de esos cursos pueden ser ingenieros o especialistas de las respectivas disciplinas (filosofía, economía, sociología, historia, etc.). Inicialmente se procuró que los cursos fueran algunos de los ofrecidos en las escuelas de humanidades de la propia universidad; empero, el gran número de estudiantes de ingeniería implicaba para esas escuelas una carga tan alta que pronto fue preferible ofrecer los cursos en el propio plantel formador de ingenieros. A partir de 1995 uno de tales cursos es obligatoriamente ética profesional, que a pesar de su nombre incluye con buen tino una amplia porción de ética general. Después, otras escuelas de ingeniería del país han seguido caminos similares, y desde 1996 un curso de ética es requisito para que programas en este campo reciban acreditación. Hoy la doctrina ética y la moralidad profesional son, pues, temas incluidos en los planes de estudio de todas las escuelas que forman ingenieros en México; sin embargo, sigue teniendo la mayor importancia que tanto en la escuela como en el gremio los jóvenes encuentren lecciones tácitas de apego a la ética; es decir, ejemplos silenciosos de tal comportamiento.

#### **4. ETICA Y LEGISLACIÓN**

Las preocupaciones por la conducta moral se han vuelto internacionales como consecuencia de la rápida globalización comercial que se ha venido promoviendo en todo el mundo. Tal es el origen de cierta presión para que cada país adopte, además de códigos de conducta en las diversas profesiones, leyes y normas contra la corrupción. Esto ha dado lugar, por ejemplo, a que en la contratación de servicios, obras y adquisiciones típicas de los proyectos de ingeniería la regulación de la conducta de los funcionarios públicos y ciertos profesionales tienda a ser excesiva, con la pretensión de establecer la moralidad mediante disposiciones legislativas y reglamentarias. Como es más fácil legislar que educar, se supone irreflexivamente que las normas legales pueden ser un sustituto de la educación ética generalizada, y se termina por constituir una maraña normativa plagada de fallas y repercusiones negativas, entre ellas: delitos vagamente definidos (por tanto, sujetos a interpretación discrecional), criterios de decisión redundantes o contradictorios, penas desmesuradas (supuestamente ejemplares, pero que en realidad inhiben la toma de decisiones socialmente óptimas), medios de vigilancia que institucionalizan el espionaje, la delación y la infidencia, y que, por tanto, minan la moralidad, etc. Se pretende, así, cuidar la moral con medios inmorales, y se imponen a priori reglas simplistas que impiden optar por la decisión éticamente correcta para cada caso. En general, muchas de esas disposiciones legales no sólo son inefectivas, sino contraproducentes, pues intimidan a la gente honesta, inhiben la toma de decisiones oportunas y prudentes, propician que se castigue a inocentes, y crean alarma social de

---

<sup>94</sup> En Europa y los Estados Unidos el porcentaje es cercano al doble, pues sus programas de estudio son menos extensos. A su vez, esto se debe a que en México la ley que regula el ejercicio profesional dispone que la licencia de ejercicio profesional no requiere más que el título expedido por una institución educativa oficialmente reconocida, por lo que el egresado de ella debe tener preparación equivalente a la de quienes en otros países, para obtener su licencia, pasan previamente por cierta práctica profesional subordinada.

amplias repercusiones; los males resultantes son, en resumen, mayores que los evitados y, por tanto, son medidas contrarias a la ética. Tales intentos fallidos ocurren pese a que desde hace mucho tiempo se sabe que usar la legislación como sustituto de la educación ética tiene altos costos sociales.<sup>95</sup>

Es obvio que se requieren ciertas disposiciones legales contra la corrupción, pero sobre ellas ha de tener prioridad la educación ética, tanto porque la ética es inspiradora del derecho y no a la inversa como porque en la práctica es más efectiva. Por ejemplo, según reiteradas evaluaciones del dominio público, al comienzo del siglo XXI los países con más baja incidencia de conductas corruptas (Noruega, Dinamarca, Finlandia y Suecia) son los que a la vez tienen menos leyes al respecto. La situación privilegiada de tales países se debe a que, gracias a su homogeneidad socioeconómica, en ellos todos los círculos a los que una persona pertenece (la familia, el barrio, el ámbito laboral, los gremios, en fin, la sociedad toda) comparten valores sociales que rechazan y condenan inequívocamente las conductas contrarias a la ética.

## **5. PROFESIONALISMO Y CÓDIGOS DE CONDUCTA PROFESIONAL**

Cuando en la sociedad existe una cultura ética general bien cimentada, los códigos de conducta profesionales cumplen una función complementaria de importancia, pues cada ocupación específica enfrenta dilemas éticos especializados que no están incluidos sino tácitamente en el código moral de la sociedad en extenso y, por tanto, requiere prescripciones igualmente especializadas para enfrentarlos. Estos códigos cumplen su función en la medida en que identifican tales dilemas, proponen una solución a los mismos y dan a conocer abiertamente todo ello a clientes y sociedad, incluyendo las normas explícitas de conducta profesional que los resuelven.

Lo típico es que los códigos de ética profesional expresen los principios básicos que los integrantes del gremio se comprometen a cumplir en el ejercicio de sus actividades profesionales, incluyendo aquellos que implican compromisos con a) la sociedad en general; b) sus clientes, empleados, empleadores, colegas y competidores, y c) la propia profesión. Además, es usual que enumeren las principales normas de conducta derivadas de dichos principios. Por supuesto, el código profesional debe ser compatible con el código de conducta general socialmente aceptado; esto es, debe estar basado en similar escala de valores y respetar las leyes y regulaciones pertinentes. Por ejemplo, los principios básicos del código de ética profesional de la American Society of Civil Engineers (ASCE)<sup>96</sup> son cuatro:

1. Aplicar el conocimiento y las capacidades profesionales al mejoramiento del bienestar humano y la protección del ambiente.

2. Servir con honestidad, justicia y lealtad a la sociedad, al empleador y a los clientes.

---

<sup>95</sup> “J. Bentham, ‘De los límites que separan la moral y la legislación’ en *Tratados de legislación civil y penal*, tomo 1, París, 1823, pp. 196-209. (Edición facsimilar del Tribunal Superior de Justicia del Distrito Federal, México, 2004.)

<sup>96</sup> 12 American Society of Civil Engineers, *Standards of Professional Conduct for Civil Engineers*, ASCE, Washington, abril, 2000, 18 pp.

3. Acrecentar las capacidades y el prestigio de la ingeniería como profesión.

4. Apoyar a las organizaciones profesionales y técnicas del gremio.

De tales principios se infiere que los valores a los que responden tienen el siguiente orden jerárquico: a) el bienestar social; b) la protección del ambiente; c) la honestidad profesional; d) la lealtad (a la sociedad, el empleador y el cliente), y e) el prestigio de la profesión. De los principios transcritos, la ASCE deriva siete cánones o normas generales de conducta; cada uno de dichos cánones a su vez se desdobla y precisa en un pequeño número de guías prácticas de actuación, entre una y ocho por canon. Además, el código de la ASCE da 10 guías específicas sobre problemas relativos a conflictos de interés, cumplimiento de la ley, seguridad del público y los empleados, confidencialidad, compra de bienes y servicios, dádivas o recompensas que impliquen o parezcan implicar sesgo a favor de partes interesadas, etcétera.

Entre 1950 y 1970 numerosas sociedades de ingenieros, principalmente en los Estados Unidos, formularon y pusieron en vigor códigos de ética en respuesta a sugerencias de la American Association for the Advancement of Science, organización que agrupa a sociedades científicas, tecnológicas y profesionales. Hoy cada una de estas organizaciones tiene su propio código profesional, con muchas coincidencias en el contenido; el del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) tiene la virtud de responder a las principales preocupaciones sociales de la actualidad de manera muy cuidadosa, escueta y depurada, como sigue:<sup>97</sup>

Nosotros, miembros del IEEE, reconociendo la importancia de los efectos que nuestras tecnologías tienen en la calidad de vida en todo el mundo, y respondiendo a un deber personal con nuestra profesión, sus miembros y las comunidades a las que servimos, por este medio nos comprometemos con los más altos estándares de conducta profesional y concordamos en:

1. Aceptar la responsabilidad de tomar decisiones profesionales consistentes con la seguridad, la salud y el bienestar del público, y desglosar oportunamente factores que puedan poner en peligro al público y al medio ambiente.

2. Siempre que sea posible, evitar conflictos de interés o la apariencia de que existen, y en caso de que los haya, exponerlos francamente ante las partes interesadas.

3. Ser honestos al hacer aseveraciones o estimaciones basadas en la información disponible.

4. Rechazar toda forma de soborno.

5. Mejorar la comprensión de la tecnología, sus consecuencias potenciales y la forma de aplicarla.

---

<sup>97</sup> < [www.ieee.org/portal/pages/about/whatis/code.html](http://www.ieee.org/portal/pages/about/whatis/code.html) >

6. Mantener y mejorar nuestra competencia técnica y sólo aceptar encomiendas profesionales para las que seamos competentes o estemos capacitados por preparación expresa o experiencia, o bien después de desglosar plenamente nuestras limitaciones al respecto.

7. Buscar, aceptar y ofrecer la crítica honesta de tareas técnicas para identificar errores y corregirlos, y dar el debido crédito a las contribuciones de otros.

8. Tratar dignamente a toda persona, independientemente de factores como raza, religión, género, discapacidad, edad, o nacionalidad.

9. Evitar acciones maliciosas o falsas que dañen a otros, o a su patrimonio, reputación o empleo.

10. Ayudar a colegas y colaboradores en su desarrollo profesional y apoyarlos en el cumplimiento de este código de ética.

Suele creerse que una vez adoptadas y publicadas las normas de conducta profesional no hay mucho más qué hacer, pero sucede lo contrario, pues entonces se requiere un esfuerzo organizado mayor, por un lado, para que quienes encabezan equipos de trabajo en el gremio y sus diversas empresas y organizaciones mantengan la convicción de que dichas normas tienen importancia y den el ejemplo de cumplirlas estrictamente y, por otro, para revisar con frecuencia que el código se respeta y se cumple por todos días tras día. Si así se procede, los códigos de conducta pueden efectivamente contribuir a clarificar las relaciones y fortalecer la confianza entre una profesión y la sociedad. Ahora bien, dado que la moral solamente cobra sentido en la medida en que abarca y compromete a todos los individuos y aspectos de la vida social, los códigos de conducta profesional son insuficientes para lograr un alto nivel de comportamiento ético, incluso en el ámbito limitado de la organización que los formula y adopta. Su insuficiencia se debe, por una parte, a que no pueden cubrir exhaustivamente todas las posibles situaciones y dilemas morales de la profesión de que se trata y, por otra, a que no comprometen a quienes desde fuera interactúan con ella en el ejercicio de su actividad. Además, los códigos no pueden anticipar nuevos problemas éticos que la evolución social y tecnológica va planteando, por lo que requieren revisión y actualización frecuentes. En los propios Estados Unidos, donde surgió la iniciativa y se concentró un gran esfuerzo al respecto a mediados del siglo xx, no se han dado los frutos esperados, a juzgar por el hecho de que la confianza pública en la mayoría de las profesiones sufrió después graves deterioros. Aunque médicos e ingenieros siguen recibiendo las calificaciones más altas, éstas también son sustancialmente menores que las de décadas atrás.<sup>98</sup> Es del dominio público que ese deterioro no se ha revertido hasta la fecha.

Por otra parte, quien conozca la tradición de las más antiguas profesiones (la medicina, el derecho y la propia ingeniería) habrá reconocido en los párrafos de este apartado la casi completa equivalencia entre los códigos de conducta profesional y lo que en aquella tradición se llama profesionalismo. En ambos casos el paradigma del buen profesional incluye la posesión y dominio de cierto cuerpo de conocimientos especializados y pertinentes, pero no se reduce a ello, sino que además abarca la intención y la capacidad de aplicar esos conocimientos con sensibilidad, autonomía, lealtad, consistencia y altas miras. Por tradición, el profesionalismo implica que el profesional a) busque que los intereses del cliente, de la sociedad y los suyos propios se compatibilicen en torno al asunto que se trata, y que cliente y sociedad reciban un servicio valioso más allá de lo inmediato; b) se compenetre del problema que se le plantea y se esfuerce por entender tanto las facetas técnicas como las humanas del mismo; c) esté libre de sesgo con respecto a intereses y visiones parciales, y busque decir con claridad, honestidad e independencia lo que él piensa y propone, no lo que supone que el cliente quiere escuchar, y d) evite tener conflictos de intereses y, si éstos surgen, los explique al cliente de inmediato con la mayor sencillez y claridad a fin de decidir junto con él lo que proceda. El profesionalismo implica cumplir con la regla de oro; es decir, obliga a dar a otros justamente el trato que, si se invirtieran los papeles, el propio profesional desearía para sí. El tiempo ha demostrado que quienes se adhieren resueltamente a estos estándares de comportamiento son capaces

---

<sup>98</sup> 14 w Gale Cutler, "What future engineers and scientists learn about ethics", *Research Technology Management*, noviembre-diciembre de 1992, pp. 39-48.



de servir mejor a sus clientes, ganarse la confianza duradera de ellos, y hacer una reputación que a su vez les atrae más clientes.

Profesionalismo y ética profesional tienden pues a coincidir. Ambos buscan, con visión de largo plazo, conciliar los intereses del cuerpo social en su totalidad con los de quien toma las decisiones, pero sólo la ética constituye una doctrina completa para ese fin.

## **6. LA EDUCACIÓN ÉTICA Y OTROS REQUERIMIENTOS**

Para promover la moralidad en las profesiones las medidas legislativas no bastan o son contraproducentes, y los códigos de conducta profesional son insuficientes porque soslayan la cuestión de fondo: que el comportamiento moral nace de emociones y convicciones íntimas creadas por la educación y estimuladas por la emulación. Por otra parte, el buen comportamiento profesional implica y exige comportamiento similar en el ámbito social más amplio, pues las obligaciones éticas, para ser socialmente útiles, deben abarcar todas las actividades y a todos los miembros de la sociedad. Por tanto, pretender que los problemas morales se resuelvan por sectores y cuidando en cada uno de éstos sólo los aspectos profesionales tiene dos efectos negativos: dejar fuera a quienes no pertenecen a esos sectores, y segmentar la ética en función de la actividad especializada de cada quien. Así se ha dado en hablar, con evidente falta de propiedad, de ética para altos ejecutivos, para funcionarios públicos, para contadores, para médicos, etc.; pero la buena conducta individual cobra sentido sólo cuando se rige por normas adoptadas para todo propósito por la mayoría de la sociedad, pues, siendo el ser humano un ente social, la calidad de vida de los individuos no puede mejorar sustancialmente sino en forma generalizada.

No es que los códigos de conducta especializados carezcan de importancia; son ciertamente útiles por cuanto dan solución a dilemas éticos característicos de cada profesión, pero no son suficientes para mejorar la moralidad social en grado significativo. Reducir las desviaciones morales en la sociedad exige acciones educativas de alcance mucho más general, no sólo en las profesiones sino también en el entorno de ellas. Los códigos morales, sean generales o especializados, no sirven a este fin, pues sólo abordan algunos de los dilemas morales ya resueltos por la ética, no la infinidad de los que la vida social plantea; además, dan soluciones estáticas, inaplicables a los nuevos problemas que se presentan como consecuencia del cambio social y tecnológico y que requieren interacciones sociales en tiempo real. Para tales fines lo único de alcance suficiente es una ética; esto es, un sistema axiológico como el definido en la parte inicial de este capítulo, capaz de dilucidar cualquier dilema moral.

Así pues, una promoción eficaz del comportamiento moralmente aceptable exige la más amplia difusión de una ética, y no simplemente de códigos morales. Los primeros pasos en pro de una ética ampliamente compartida consistirían en lograr que la familia retomara el papel educador que en estos asuntos tuvo por mucho tiempo, a la vez que los maestros y la escuela predicaran con el ejemplo y asumieran el compromiso de no ofrecer sino educación de calidad, pues sólo ésta es útil. Familia y escuela deben constituir los centros de irradiación de la moral práctica y su doctrina, respectivamente; es decir, de las buenas costumbres la primera y de la difusión de la ética la segunda. Sólo así se podrá asegurar que en la edad adulta cada individuo comprenda la importancia de tomar decisiones apegadas a la ética y posea la motivación y las capacidades necesarias. Pero se requiere también otro tipo de actor social que pueda actuar como conciencia crítica de la sociedad toda, y que no tenga más autoridad que esa; alguien que juegue un papel equiparable al que cumplieron los filósofos de la Grecia clásica. Según lo expuesto en el capítulo x, la lección que estos actores sociales nos dejaron es que nada promueve la moralidad tan

eficazmente como la presencia pública, ubicua y permanente de quien pueda criticar la racionalidad de los comportamientos públicos de cualquier persona desde una posición de honestidad intelectual socialmente reconocida; tales personajes se vuelven entonces los grandes promotores de la sabiduría, es decir, del arte de vivir.

Las sociedades contemporáneas necesitan revisar y jerarquizar las preocupaciones básicas de la vida, repensar lo que más importa de ella y vivirla en consecuencia, que es la función principal que cumplían aquellos filósofos. Por tanto, no es vano preguntarse cómo se podría institucionalizar la presencia de auténticos pensadores en todos los espacios de convivencia social, como ocurrió en Atenas entre los siglos vi y iii antes de nuestra era. ¡Cuánto bien haría multiplicar en órdenes de magnitud el número de filósofos que vivieran fuera de las torres de marfil y espontáneamente intervinieran en las discusiones públicas, lo mismo las de la gente común que las de los políticos y los expertos en cualesquiera asuntos específicos; filósofos que buscaran toda oportunidad de escuchar y clarificar ante la gente cada una de tales discusiones con base en conceptos fundamentales al alcance de todos! ¿Cuál actividad más trascendente que la de desenmascarar con lógica y según el bien común los engaños de la propaganda y del razonamiento arbitrario? ¡Cuánto podrían contribuir tales personajes a la sistematización y el análisis de lo que a todos interesa! ¡Y cuánto ganaría en rigor y alcance social la capacidad de tomar decisiones éticas! Ésta es la función central que los medios de comunicación debieran cumplir y en nuestra época no están cumpliendo. No puede imaginarse una contribución mayor para establecer en la sociedad valores que, por estar escrupulosamente basados en la razón, puedan ser asumidos por todos, en vez de conformarnos con adoptar como valores sociales cualesquiera que se ocurran al amparo de nuestro libre albedrío. Si una sociedad con bienes materiales tan limitados como la antigua Atenas pudo sostener a tan numerosos y omnipresentes filósofos, ¿por qué no ha de poder hacerlo el mundo actual, dotado de mucho más riqueza? Lograrlo devolvería a la filosofía sus legítimos fueros como promotora de la sabiduría práctica y el bien común, y conjuntamente con la familia y la educación escolarizada produciría la asimilación social de nociones tan necesarias como las siguientes:

1. Si bien la moral no es sino una convención, su valor no radica nada más en su contenido, sino en el hecho de ser ampliamente compartida. Suele decirse con ironía que lo moral es tan sólo lo que deseamos; esta definición no es cínica si por “lo que deseamos” se entiende el conjunto de nuestras aspiraciones vitales y éstas toman en cuenta las del resto de los seres humanos, entre los que están desde nuestros familiares y seres más queridos hasta personas que ni siquiera conocemos. Pensar en la totalidad de nuestras aspiraciones nos obliga a ser racionales (esto es, a evitar deseos que se contradigan entre sí); por su parte, tener en cuenta las aspiraciones de los demás hace evidente la conveniencia de que haya reciprocidad en nuestra conducta; es decir, que hagamos lo que queramos que hagan los demás. Puede ser admisible que cada individuo tenga su propio código de valores, siempre que al escogerlo se esmere en que sea aceptable por los demás, y esto obliga a que los valores de que se trate estén fundados en la razón; así se van constituyendo los códigos de conducta socialmente compartidos. En esas condiciones, elegir la conducta éticamente correcta es equiparable a escoger la opción que más intensamente deseamos, pues la interdependencia que nos liga con el resto de los seres humanos nos obliga a ponderar todas las consecuencias futuras que tal elección tendrá en nuestra felicidad. Vistos así, los valores éticos son a la vez valores estéticos y hacen evidente por qué la felicidad constituye el objetivo último de la vida humana, especialmente la felicidad basada en la razón.

2. La ética supone libertad y responsabilidad personales. Hacer el bien bajo coerción externa no es obrar con ética. Sólo hay decisión ética si existe libertad para elegir entre opciones de conducta y si el sujeto tiene la responsabilidad de su elección.<sup>99</sup> Por eso la ética da reglas de inferencia para elegir conductas teniendo en cuenta las consecuencias de éstas.

En un ambiente de libertad, la felicidad del individuo depende en altísimo grado de sus propias decisiones o elecciones; es decir, del tino o sabiduría con que elija entre las opciones a su alcance cada vez que toma una decisión. No obstante, la posibilidad de que cada quien labre su propia felicidad de modo egoísta, arbitrario e irresponsable tiene límites, pues siendo la humana una especie social, la felicidad de cada individuo depende también de la de los demás y del grado en que éstos aprueben la conducta de aquél. A la vez, las decisiones de cada uno repercuten en grado variable sobre la felicidad de otros, incluso lejanos en el tiempo, pues decisiones de hoy afectan a nuestros descendientes o, en general, a las generaciones futuras. De tal interdependencia de felicidades se desprende que la reciprocidad en la ética es no sólo deseable, sino un imperativo. La responsabilidad surge de que cada elección de conducta afecta a quien la toma y a los demás: el sujeto libre debe responder de sus propias decisiones ante sí mismo y ante sus congéneres. Libertad y responsabilidad constituyen por eso el contexto indispensable para que la ética pueda practicarse; si el individuo tiene coartada su libertad y es obligado a descartar ciertas opciones, no puede ser responsable de su decisión sino en grado correspondiente- mente menor.

3. La relación axiomática entre ética y felicidad conduce a su vez a una conclusión mucho menos evidente: que la ética no sólo es el medio para alcanzar la felicidad, sino que maximizar la felicidad de quien decide es precisamente el criterio ético con el que siempre debe elegirse entre opciones de conducta.<sup>100</sup> Que este aparente egocentrismo no produzca una lucha salvaje y un desastre general se debe a dos condiciones innatas en la naturaleza humana: a) la conciencia de que todos los seres de nuestra especie somos interdependientes y, por tanto, a nadie conviene ignorar la felicidad del prójimo, y b) la capacidad humana de previsión, que permite anticipar y sopesar las consecuencias mediatas de nuestros actos antes de realizarlos. A la vez, dos limitaciones prácticas, también típicamente humanas, suelen lastrar la toma de decisiones éticas y, por consiguiente, la posibilidad de ser felices: una es la imperfección de nuestros razonamientos, intuiciones y previsiones; otra, la debilidad de carácter que suele hacernos caer en tentación; esto es, saber que una decisión puede tener consecuencias mediatas cuya gravedad es de mayor monta que la gratificación inmediata que nos da, y sin embargo la adoptamos por falta de voluntad. Así pues, la capacidad de mirar correctamente nuestra vida en prospectiva resulta el atributo más necesario para tomar decisiones éticas; sin él sería imposible identificar las consecuencias de nuestras elecciones; por tanto, uno de los objetivos centrales de la educación debiera ser desarrollar, pulir y ejercitar nuestra capacidad de mirar hacia adelante para

---

<sup>99</sup> Según Kant, la liga entre libertad y ética es insoluble porque la libertad es la razón de ser de los principios morales y, a la vez, éstos constituyen la causa por la que conocemos la libertad (E. Kant, *Crítica de la razón práctica*, prefacio y cap. i, vm).

<sup>100</sup> J. S. Mill, *Utilitarianism*, Great Books of the Western World, vol. 43, Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, 1952, pp. 443-476.

anticipar las consecuencias de nuestros actos, y convertir esta capacidad en hábito certero.

4. La ética es sobre todo un arte práctico; es decir, una estrategia al servicio de la buena vida: la aptitud de actuar de modo que se logre la mayor suma de felicidad entre todos los seres sensibles a los que el sujeto está ligado directa e indirectamente y de los que depende su propia felicidad<sup>101</sup>. A partir de estos conceptos, cada escuela filosófica postula los axiomas y reglas de inferencia de su propia ética; por ejemplo, la principal regla de inferencia del utilitarismo dice que entre todas las opciones posibles, la decisión éticamente correcta es la que maximiza la utilidad (felicidad) futura de quien toma la decisión, según su propia visión de las felicidades de los demás.<sup>102</sup> Aun en el supuesto de que el resto de la ética permanezca invariante, con el tiempo y de una sociedad a otra hay cambios en la escala de valores que hacen variar las normas de conducta.

5. De la definición axiomática de una ética se colige que ciertas decisiones éticamente fundadas pueden no ser morales, si el código moral de quien las toma no coincide del todo con el de la sociedad en que éste actúa. De aquí surgen las llamadas objeciones de conciencia. Casos de este tipo pueden surgir en las decisiones profesionales que corresponden a los ingenieros, y en general plantean los dilemas morales más difíciles, pues a menos que se logre compatibilizar dichos códigos, el sujeto queda expuesto a sufrir el reproche social o bien el de su propia conciencia.

6. Dado que una decisión éticamente correcta maximiza la felicidad de quien decide, el hecho de que alguien opte por otra decisión no puede explicarse como un acto voluntario, sino como una falla de la inteligencia, pues nadie actúa en contra de su interés a sabiendas. Por esto es crucial que el sujeto comprenda por qué cualquier curso de acción distinto del indicado por la ética implica dañarse a sí mismo. La sabiduría se reduce a poseer tal comprensión y obrar en consecuencia: persona sabia (virtuosa, ética) es la que sabe lo que está bien, sabe por qué está bien y lo hace.

7. Atinar a la opción éticamente correcta exige al menos tres atributos: a) capacidad prospectiva para identificar las consecuencias que con el tiempo tendría cada posible comportamiento; b) capacidad de

---

<sup>101</sup> Por sencillez omito en esta definición dos acotaciones: a) que cabe aplicar cierta tasa de descuento a las felicidades futuras, pues tiene más valor un bien ahora que el mismo bien algún tiempo después, y b) que algunas corrientes filosóficas proponen o aceptan ponderar con un peso mayor la felicidad de los seres más cercanos al afecto del sujeto, noción que recibió un importante respaldo científico en el siglo xx, cuando la naciente sociobiología descubrió que tal comportamiento es una de las bases de la evolución biológica y social, y que todo ser vivo, humano o no, actúa naturalmente de modo que se maximice la supervivencia de sus propios genes. De ello proviene en los animales superiores y en el hombre el apego a la familia, a los connacionales, etc. (E. O. Wilson, *On Human Nature*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1978). Esto mismo da base científica a la importancia que en todos los grupos humanos se asigna a la identidad compartida.

<sup>102</sup> Suele objetarse la ética utilitarista principalmente por la confusión a que da lugar la resonancia materialista del adjetivo, pero la objeción es vacua, pues este adjetivo proviene exclusivamente de que se llama utilidad a la medida de la preferencia que el sujeto tiene por cada consecuencia de sus posibles decisiones. Como señala Mill, la utilidad no mide la felicidad del sujeto aislado, sino la que le resulta de la felicidad de todos los afectados por su conducta, y tal felicidad se deriva no sólo de bienes tangibles, sino de los bienes espirituales que hacen feliz al sujeto y a sus congéneres. Por lo demás, como atinadamente apunta Mill en el primer párrafo de su tratado, el utilitarismo se remonta a Sócrates y con nombres diferentes ha sido postulado por pensadores de todas las épocas (J. S. Mill, op. cit., cap. 2, pp. 447-457).

aceptar la incertidumbre y lidiar con ella, pues no se puede ignorar que las consecuencias de nuestros actos son muy inciertas, ni cabe que ello nos inhiba de actuar, y c) empatía (imaginación moral, en el lenguaje de Kant) para prever los sentimientos y reacciones (la felicidad) de los demás ante nuestros actos (por las dudas, la regla de oro de numerosas éticas, tanto laicas como religiosas, fija un mínimo a la empatía: tratar a los demás como quisiéramos ser tratados).

Lo anterior confirma que sólo los problemas éticos más ordinarios pueden resolverse mediante los códigos morales socialmente adquiridos, y aun en esos casos, si el individuo no comprende el por qué de las normas contenidas en tales códigos, no se sentirá movido éticamente y será, cuando más, un seguidor mecánico de recetas morales, carente de empatía, incapaz de prever las consecuencias de sus actos, perplejo ante la incertidumbre que como consecuencia de ellos le guarda el futuro, y sin código moral propio; por tanto, incapaz de enfrentar y resolver los dilemas inesperados que la vida plantea continuamente. Un ingeniero en tales condiciones no podría ser socialmente responsable y estaría impedido de cumplir la parte trascendente de sus funciones. Para no ser así, se necesitan motivación y sentido de orientación moral, que sólo puede darnos la tradición filosófica de nuestra cultura; así como no es imaginable prescindir del conocimiento y los medios materiales heredados a la humanidad por las generaciones previas, tampoco podemos proceder como si no existiera aquel patrimonio intangible que tales generaciones nos legaron; en otras palabras: no hay sustituto para la cultura.

## **7. OBSTÁCULOS QUE ENFRENTA EL COMPORTAMIENTO ÉTICO**

En el marco de la ingeniería como actividad creadora de riqueza social, hay un asunto que no se debe eludir: la tendencia a valorar excesivamente el lucro. Ésta es una de las fallas morales más extendidas, y no sólo en nuestro tiempo; constituye, por tanto, un obstáculo omnipresente para el comportamiento moralmente aceptable. Toda persona adulta da alta prioridad a la maximización de sus ingresos, aunque pocas lo acepten abiertamente; hasta este punto puede no haber falta alguna. La falla ocurre cuando para lograrlo se está dispuesto a tomar decisiones de moralidad cuestionable, y se sabe que en todas las culturas los delitos patrimoniales son los más frecuentes y con más modalidades tipificadas. Esto es grave porque en el mundo hay grandes diferencias de riqueza entre países y, sobre todo, entre habitantes de un mismo país. Las consecuencias de dicha debilidad moral son mayores en las sociedades desiguales que en las igualitarias, pues en aquéllas los medios para defenderse también están mal distribuidos. Si el problema no se atiende, la desigualdad entre ricos y miserables puede propiciar diferencias de moralidad con efectos muy perversos para todos, incluso para los más favorecidos: la inseguridad urbana y el terrorismo no son sino dos de las manifestaciones que ya se han hecho presentes. El mal podría aliviarse con un esfuerzo universal que desencadenara un círculo virtuoso: disminuir la desigualdad en aras de una moral compartida, y abrazar una moral compartida que atenúe la desigualdad. Esto exige cambiar apenas un poco nuestra escala de valores, asignando la misma jerarquía a la riqueza y a la paz social; como en muchos problemas, en éste la solución óptima no está en los extremos: hay evidencias sociológicas de que si se exagera en la moderación del lucro se

puede inhibir la voluntad de prosperar, lo que dificultaría aún más corregir las desigualdades económicas.

Mientras tanto, la ingeniería tiene aportaciones qué hacer al respecto, insuficientes pero importantes: a) evaluar con rigor sus obras y proyectos, sobre todo si se realizan con recursos públicos, para asegurar que no empobrecen a la sociedad; esto es, que son rentables considerando todos sus costos y beneficios, directos, indirectos, inmediatos y mediatos, incluyendo costos y beneficios sociales y ambientales, como se discute en el capítulo vm; b) colaborar con las instituciones sociales pertinentes para asegurar que los beneficios derivados de las inversiones públicas no marginan más a los marginados ni privilegian más a los privilegiados, y c) contribuir al seguimiento social de dichas obras y proyectos una vez puestos en operación, de modo que los supuestos adoptados durante el diseño se puedan verificar o corregir a la luz de la evidencia práctica.

Pero no todas las trabas para el buen comportamiento ético son de naturaleza deshonestas; también hay obstáculos no culposos que todos enfrentamos al buscar comportarnos con moralidad. El principal de éstos es la tarea, nada trivial por cierto, de identificar y evaluar caso por caso las diversas alternativas de conducta que tenemos y sus probables consecuencias para nosotros mismos y los demás. Esto exige formalidad, racionalidad, orden y parsimonia, que la prisa de estos tiempos no propicia pero que hemos de allegarnos.



Otro obstáculo no culposamente difícil de superar es la eventual incompatibilidad de nuestro código personal de conducta con el socialmente aceptado. Esta incompatibilidad suele surgir ante cuestiones poco discutidas previamente en la sociedad, y por ello no consensuadas; con frecuencia surge ante nuevas circunstancias en las que la ingeniería o la ciencia tienen un papel central, como en el cuidado de los bienes comunitarios vitales (aire limpio, selvas y mares propicios para la diversidad, paisajes naturales imperturbados, reservas de agua, etc.); o como en la proliferación nuclear y la manipulación genética; o como en cuestiones que implican la asignación tácita de valor a la vida humana o la definición del instante en que ésta comienza o termina; o como en la búsqueda de la justicia social (en qué medida debe lograrse mediante más producción y más consumo y en cuánto adoptando modos generalizados de vida más sencillos y austeros?). Es obvio que no hay reglas simples para dilemas tan diversos; lo que se requiere es aptitud ética del sujeto, es decir, de todos; como se planteó antes, tal aptitud sólo puede provenir de una formación moral ampliamente compartida y de que la sociedad tenga información significativa sobre las cuestiones importantes de la época.

Un obstáculo más para la ética es la diversidad humana y social, resultado del fortalecimiento de legítimas identidades antes reprimidas (étnicas, sexuales, religiosas, ideológicas, etc.) y la falta de reflexión y mesura con que a veces se manifiesta. Un caso concreto es la pretensión no justificable de dar a estas peculiaridades que nos diferencian un peso mayor que a lo que nos iguala. Dado que la moral tiene su raíz en circunstancias y creencias compartidas, sin una base cultural común es impensable una ética compartida, y sin ésta es imposible convivir satisfactoriamente. Las diferencias entre grupos y personas existen y deben respetarse, pero enfatizarlas demasiado puede conducir a una creciente variedad de códigos morales, que luego impedirán reacciones generalizadas de condena moral inequívoca ante conductas dañinas. Cualesquiera diferencias sociales o personales pueden generar códigos morales incompatibles entre sí; para evitarlo, y así mantener la posibilidad de convivencia, cuando eso comienza a ocurrir es necesario negociar ajustes mutuos en los respectivos códigos de conducta. La base común de negociación de tales ajustes es el humanismo (véase el capítulo x), pues ninguna diferencia entre personas tiene más peso que el atributo común a todas ellas; esto es, la dignidad innata de ser individuos de la única especie con libre albedrío y responsabilidad personal. La educación en general, y en particular un mínimo de educación filosófica generalizada, constituyen los mejores medios para lograrlo.

## TERCERA PARTE

### EL CONTEXTO DE LA INGENIERÍA

## ***XII. La tecnología y los valores sociales***

### **1. INGENIERÍA, TECNOLOGÍA Y VALORES**

La tecnología es parte del instrumental tangible e intangible con el que la ingeniería realiza su trabajo. La porción intangible de la tecnología está constituida por los métodos y algoritmos que se usan en el diagnóstico y el diseño; la tangible está incorporada en la maquinaria, el equipo y las herramientas de todo tipo que el ingeniero utiliza. Comprender lo que la tecnología es y lo que implica es para el ingeniero tan importante como saber usarla; por tanto, éste debe conocer no sólo la tecnología que aplica, sino las consecuencias de optar por una tecnología u otra, las implicaciones que el cambio tecnológico tiene en la sociedad.

En particular, el ingeniero debe saber que entre la tecnología en uso y los llamados valores sociales, ese conjunto de creencias peculiares que forma parte de la ideología compartida por cada sociedad, hay efectos mutuos. La importancia de conocer las relaciones entre tecnología y valores radica en que para el ingeniero, y para todo actor social que toma decisiones prácticas, los valores sociales necesariamente forman parte del contexto y a veces guían tales decisiones, sobre todo las de mayor connotación ética.

La ingeniería tiene obligación de maximizar lo que se considera beneficioso para la sociedad según los valores prevalecientes. Pero los medios de que dispone el ingeniero para ese propósito están acotados por la tecnología disponible. Entonces la tecnología no sólo provee a la ingeniería medios de trabajo, sino que le impone límites a lo que puede hacer. En este espacio de lo posible delimitado por la tecnología, los valores sociales matizan los criterios con que el ingeniero elige la solución a cada problema que debe resolver.

La mejor manera de comprender la naturaleza de la tecnología y el significado de los valores sociales, dado que ambos están correlacionados, consiste en discutirlos a la vez. Tal es el propósito de este capítulo.<sup>103</sup>

### **2. LO PECULIAR DE NUESTRA ESPECIE**

El hombre se distingue de otras especies por su capacidad sobresaliente de aprender, y el saber da capacidad de hacer. Entonces el *Homo sapiens* inevitablemente deviene *Homo faber*. El atributo de la razón determina esta manera de ser del hombre: por eso, el saber y luego el hacer constituyen sus inclinaciones naturales. Pero como tiene conciencia de sí mismo, antes, después y durante el hacer se cuestiona ¿para qué?, lo que desencadena una sucesión infinita de otros para qué, pues ante cada respuesta se puede seguir preguntando lo mismo ¿o hay un fin último del actuar humano? A esta última pregunta diversas culturas y épocas postulan respuestas diferentes, y ello demuestra que el fin último de nuestros afanes es indeterminable a priori. Incluso la respuesta ampliamente aceptada del humanismo, que postula la felicidad como el bien supremo, queda en cierto

---

<sup>103</sup> El título y parte del contenido de este capítulo provienen de una publicación previa del autor (D. Reséndiz, "La tecnología y los valores sociales", en R. Pérez Tamayo y E. Florescano [coords.], Sociedad, ciencia y cultura, Cal y Arena, México, 1995, pp. 175-195).

grado indeterminada porque cada quien busca la felicidad de modo diferente. En esto radica la dignidad intrínseca del ser humano, según lo expuesto en el capítulo x, y quizá también el desafío y el encanto de vivir.

Así pues, nuestra capacidad de razonar determina las capacidades peculiares de la especie humana: aprender, disponer de lenguaje, inventar, trabajar. Pero éstos son sólo medios. De nuestros fines apenas podemos decir que consisten en que cada grupo social, y dentro de él cada individuo, se forje un perfil propio conforme a su libre albedrío y capacidad. Nuestros fines, pues, lo mismo individuales que colectivos, están abiertos, aceptan variantes, y hemos de buscarlos paso a paso sin ninguna garantía de buen éxito. El único aspecto que, en cuanto se refiere a su destino, homologa a los humanos es la búsqueda de la felicidad, pero cada uno a su manera, según lo dicho en los capítulos y, x y xi.

Sin embargo, la experiencia ha enseñado al hombre la necesidad de que la búsqueda de los fines individuales se concilie con la de los sociales. Para eso cada sociedad y cada época adoptan ciertos patrones de comportamiento deseable, modos de proceder que compatibilizan los intereses del individuo con los del grupo social. No son normas jurídicas, sino otras de carácter más fundamental que denominamos valores sociales, una de las partes constitutivas de la ética de cada comunidad, según se explicó en el capítulo xi. Éstos nos orientan en cada instante sobre cómo proceder y permiten que nuestras acciones individuales nos aproximen a los fines que la sociedad postula. La variación de los valores sociales en el tiempo y en la geografía se debe, por supuesto, a que los fines de la sociedad son mutables.

### **3. NATURALEZA DE LOS VALORES SOCIALES**

Los valores sociales son un conjunto de preceptos jerarquizados. Tanto el conjunto de ellos como cada uno de tales preceptos son irreductibles; es decir, constituyen axiomas sobre qué es bueno o deseable, qué es malo o inconveniente, y cuál de cada par de valores es preferible. Son irreductibles porque no pueden derivarse de otros postulados, sino que ellos constituyen puntos de partida de toda deducción o evaluación que tenga como fin una decisión con repercusiones sociales. Por eso se les llama también principios.

Un sistema de valores es, pues, un conjunto de principios que nos permite determinar qué decisión es la mejor entre las diversas opciones. Cada vez que se elige un curso de acción, el sistema de valores socialmente compartido nos permite saber cuál es la opción que la sociedad aprueba. Los valores sociales no necesariamente están codificados de manera formal, ni hay sanciones precisas por violarlos; cuando se codifican y se estipula explícitamente la sanción que corresponde a la violación de cada principio, éstos dejan de ser valores y se convierten en normas jurídicas de observancia obligatoria. No es una sanción jurídica sino la presión social la que logra, informal pero efectivamente, que los individuos tiendan a conformar sus actos a la escala de valores de la comunidad. Sin embargo, en la vida moderna suele considerarse legítimo que el sistema de valores de un individuo tenga ciertas pequeñas diferencias con respecto al sistema predominante en la sociedad.

La sociobiología ha sugerido que ciertos valores sociales como la cooperación, la defensa de la prole, etc. son necesidades determinadas biológicamente, y que gracias a ellos es posible la supervivencia de una

especie.<sup>104</sup> Sin embargo, es evidente que en general los valores son más que eso, pues dentro de la especie humana varían con las culturas y suelen modificarse con el tiempo. En especial, los valores sociales resultan condicionados fuertemente por el conocimiento científico y la tecnología; mucho más por la segunda que por el primero, pues la tecnología es la ciencia positiva; esto es, el conocimiento que se usa y, por tanto, está a la vista y es percibida por todos, sea o no entendida por todos.

---

<sup>104</sup> E. O. Wilson, *On Human Nature*, Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1978, 260 pp.

Cada sociedad escoge y ensalza así un conjunto específico de valores. Cuando las condiciones sociales y la tecnología disponible obligaban al enfrentamiento directo para defender la vida y los escasos bienes propios, las sociedades primitivas honraron el arrojo y el heroísmo. La tecnología intensiva en mano de obra determinó que en todas las civilizaciones hubiera una época en que la esclavitud se legitimó como un bien social. Ninguna de esas sociedades habría institucionalizado la caridad como valor social, pues ésta fue producto de una tecnología más evolucionada que, al producir mayores concentraciones de población urbana, dio lugar a plagas y miserias que exigieron la estrecha convivencia entre extraños y el despliegue del altruismo en aras de los intereses propios. A su vez, las urbes de la Edad Media no habrían podido adoptar virtudes de limpieza y laboriosidad como las que abrazó en el siglo xx la sociedad de los nacientes Estados Unidos de América, pues ésta se derivó de condiciones objetivas muy diferentes de las del Medievo; a saber, la alta productividad del trabajo generada por la innovación tecnológica angloamericana, más la tecnología industrial y la ingeniería sanitaria nacidas en la Inglaterra del siglo XVIII. Finalmente, un ejemplo de nuestro tiempo: si no para todos nuestros contemporáneos, al menos para muchos de los jóvenes occidentales de hoy, educados, capacitados, y cuya amplia gama de necesidades ha estado satisfecha a plenitud por la moderna tecnología, ningún valor es tan altamente estimado como la libertad, pues de ella depende la movilidad que les permite ubicarse continuamente en el nicho que más ventajas les aporta.

#### **4. PROGRESO Y CIRCULARIDAD**

Al hombre original, único ser consciente de sí mismo en el mundo, la naturaleza le resultó desde siempre hostil: la intemperie, el alimento insuficiente, la enfermedad, la amenaza de los animales carnívoros, todo lo natural le ofrece penalidades que percibe como tales en virtud de su inteligencia. Pero gracias a esta inteligencia, la naturaleza le fue siendo poco a poco comprensible y pudo ir modificando para integrarse mejor a ella. Ni ayer ni hoy la naturaleza colma por sí misma las necesidades del hombre. Para mejor satisfacerlas éste tiene que esforzarse en transformarla; es decir, debe trabajar, y aún trabajando queda una distancia grande entre los resultados colectivos de su labor (la producción) y sus apetencias también colectivas de consumo. El mundo en su estado natural apenas si tolera al hombre; lo alimenta mal y satisface peor aún otras de sus necesidades.

Además, el mundo es complejo, difícil de concebir por el espíritu y arduo de modificar por los actos humanos. En su larga historia, la clave que el hombre encontró más efectiva para superar esas enormes dificultades fue sistematizar el conocimiento que sus vivencias y reflexiones le fueron permitiendo validar; tal proceso de sistematización es hoy una actividad especializada que llamamos ciencia. Antes había tenido que sistematizar también la invención de herramientas de trabajo y el desarrollo de métodos para lo mismo, actividad que hoy denominamos tecnología. El desarrollo de la ciencia y la tecnología se ha venido acelerando conforme ambas se realimentan mutuamente desde el siglo xvii. En el conocimiento experimental y la creación de medios para modificar la naturaleza, es decir, en la ciencia y la tecnología, la humanidad ha encontrado una manera de avance ilimitado; no ha habido en esto estancamiento ni retroceso, sino

crecimiento y evolución continuos, que hoy llamamos progreso. Esto constituye un hecho admirable, un motivo de fascinación.

La religión y la filosofía, por su parte, y el arte, por la suya, dan al ser humano medios de autorrealización por cuanto aportan respuestas al para qué de nuestros afanes. Religión y filosofía han abierto al hombre la posibilidad de buscar explícitamente el por qué y el para qué de todo lo que le inquieta y le han permitido idear sistemas coherentes y totalizadores de respuestas a tales interrogantes. A su vez, el arte le ha dado la posibilidad de abandonarse temporalmente a refinadas satisfacciones y de poner en juego múltiples capacidades de expresión mediante las cuales crea belleza y la disfruta, lo que también constituye una respuesta, si bien tácita, a aquellas mismas preguntas. En la religión, la filosofía y el arte no necesariamente hay progreso, sino nuevas creaciones, interpretaciones y preferencias que se suceden o modifican ilimitadamente, a veces en trayectorias circulares. Las ideas religiosas o filosóficas, los dogmas, las utopías, los códigos morales, los valores, los gustos estéticos, etc. nacen, mueren y renacen en el alma de los pueblos. He aquí otro fenómeno admirable y fascinante.

Entre esos dos polos, sus motivos admirables y sus respectivos productos, se desarrollan la civilización y la historia. A veces la sociedad parece oscilar lentamente entre ambos polos de atracción, como en el paso de la Antigüedad a la Edad Media y de ésta al Renacimiento; otras veces, la fuerte filiación de la mayoría social a uno de los polos parece generar polarización de las minorías hacia el otro, como cuando nace el luddismo en plena Revolución industrial, o el comunismo durante el auge del capitalismo o, en nuestra época, los movimientos antitecnológicos y los fundamentalismos religiosos tras el inusitado avance de la ciencia, la tecnología y la ingeniería.

En forma menos llamativa pero más sabia, en todas las épocas la humanidad también se ha servido de la tensión dialéctica entre aquellos dos polos para tender a un equilibrio equidistante de ambos; si las circunstancias no son propicias para que esto ocurra a escala de toda la sociedad, al menos es posible en el ámbito estrictamente personal. En cualquier caso, ese deseable balance da lo mejor de ambos mundos: mediante el conocimiento y su aplicación nos liberamos de las limitaciones materiales de la naturaleza, y mediante el arte accedemos a modos de crear y vivir elevadas sensaciones que subliman nuestros problemas no resueltos, y otro tanto logramos por medio de las ideas integradoras que derivamos de la filosofía o la religión.

Por un lado, el trabajo, inevitable pero cada vez menos abrumador gracias a la ciencia y la tecnología; por otro, los placeres existenciales del arte y la filosofía (o la religión), con trayectorias aleatorias o circulares. Tales son las dos constantes, las dos fascinaciones del ser humano, cada una de las cuales aporta una porción de los valores sociales que la sociedad adopta, y un orden jerárquico de los mismos. Entre ambas tendencias se desenvuelve la vida con cercanía variable a uno u otro polo en cada cultura, en cada época, en cada individuo y, para éstos, en cada instante. Todos y cada uno somos a veces hacedores y a veces contemplativos. Todos somos inventores y usuarios de tecnología, tanto como creadores y recreadores de mitos o revelaciones, y guardianes o procesadores de misterios. Todos



usamos el método de la ciencia experimental, tanto como adoptamos dogmas a partir de sentimientos totalizadores. Así somos todos; así es nuestra especie: siempre dual, y de esa dualidad surgen las dos invariantes de nuestra historia: hacer y contemplar.

## **5. NATURALEZA DE LA TECNOLOGÍA**

La tecnología es la expresión más acabada y trascendente de nuestra capacidad de hacer, y es a la vez bendición y amenaza, poder y riesgo, solución a ciertas preocupaciones y motivo para que surjan otras.

Es verdad que la ciencia como hoy se concibe y practica surge apenas en el siglo xvii y es producto de una cultura particular, la de Occidente. No obstante, todas las culturas, dentro y fuera de la tradición occidental han empleado, desde la prehistoria, con más o menos formalidad, el mismo método para enfrentar los desafíos de la naturaleza: identificar y aislar el problema, formular una propuesta tentativa de solución, experimentar, adoptar o rechazar la propuesta en función de su efectividad y, finalmente, mejorarla y difundirla socialmente. Es el único método eficaz para fines prácticos.

La tecnología permitió a la especie sobrevivir y prosperar, aliviar necesidades, hacer menos infame su trabajo y sus condiciones de vida, producir cada vez más satisfactores con menos esfuerzo y menor cantidad de recursos. Sus creaciones tecnológicas permitieron al hombre, sucesivamente, guarecerse de la intemperie, defenderse de animales terribles, tener más alimentos, mover pesos mayores que sus propias fuerzas, transportar- se sin fatiga, navegar, erigir catedrales, curar algunas de sus enfermedades, volar, comunicarse sin trasladarse, conocer algo de los confines del universo, etc. Todo se lo fue facilitando su vocación creadora de nuevas técnicas. En el clímax de la confianza en su capacidad tecnológica, el hombre concibió incluso la utopía de que el progreso científico-técnico le permitiera un día resolver todas sus limitaciones y aspiraciones, comenzando con las de la convivencia con sus congéneres, y así reconciliar de una vez para siempre su propio ser con el de sus semejantes y su naturaleza con la naturaleza externa a él, en un estado de perfecta armonía.

Aunque bien sabemos que son recurrentes, hoy consideramos ilusiones injustificadas esas utopías del siglo xviii (el Siglo de las Luces), del siglo XIX y de un breve lapso de la primera mitad del siglo xx. Ya no aspiramos a que la ciencia haga más bueno al hombre, ni a que la tecnología nos convierta en semidioses, ni confiamos en que ella sirva para que un día los fenómenos sociales puedan predecirse o controlarse como la misma precisión y confiabilidad que los fenómenos físicos. Ya no nos parece paradójico que un mecanismo interno de nuestro refrigerador pueda controlar automáticamente toda desviación de temperatura con precisión de medio grado centígrado y que, en cambio, las perturbaciones sociales (sean inflaciones, motines o guerras) e incluso familiares no desencadenen mecanismos correctivos similares, sino pasiones.

Sin embargo, no ha cesado de existir en la sociedad la idea de que, eventualmente, el solo progreso técnico permitirá a la especie humana, a toda ella, condiciones de vida material dignas de nuestra inteligencia y

sensibilidad. Esta idea sigue pecando de optimista, pues tiene implícita la noción de que la tecnología es buena en sí misma. Igualmente yerran, pero del lado pesimista, quienes postulan catástrofes fatales a causa del progreso técnico, pues suponen que la tecnología es mala de por sí.

Ambas concepciones están erradas porque asignan autonomía y atributos morales a la tecnología. La tecnología en general o cualquier técnica específica no son buenas ni malas; cada una puede servir para hacer el bien o el mal. El hombre es quien decide a partir de sus valores. Los valores sociales deben entrar en juego para decidir cada aplicación particular de una tecnología, y no para aprobar o prohibir su desarrollo. La tecnología en sí no tiene más atributo que su efectividad empírica. Pretender transferir a la tecnología atributos morales es un acto de evasión. La moralidad es atributo sólo humano y, por tanto, sólo al hombre puede exigírsele. Por eso es irracional cualquier antitecnologismo; pero también lo es suponer que la tecnología es condición suficiente para un destino social feliz.<sup>105</sup>

La tecnología es sólo un medio. Los fines los elegimos nosotros cada vez que decidimos, y nos acercamos a ellos si atinamos, o nos alejamos si erramos por ignorancia, por negligencia o por azar. Esto exige un continuo estado de alerta.

---

<sup>105</sup> D. Reséndiz, "Sobre la racionalidad de la tecnología Complementos, nueva época, núm. 2, Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos, UNAM, 1987, 9 pp.

## **6. DE LA ANGSTIA INERME A LA ANGSTIA TECNOLÓGICA**

El hombre original, inerme ante la hostilidad de la naturaleza, se angustia por desvalido. Nada tiene para defenderse y sobrevivir, salvo su inteligencia. La pone en acción; desarrolla técnicas; se vuelve poderoso. Y cuando su poder tecnológico crece tanto que le exige ser racional y cauto, y evitar a cada paso que tal poder se vuelva en su contra, vuelve a temer y a angustiarse. Cada vez que se propone resolver un problema, no le basta saber que dispone de una técnica que le da poder para hacerlo, sino que está obligado a evaluar primero sus fines y sus consecuencias de modo que su decisión tenga validez ética. Cada paso le ofrece riesgos. No es que antes, inerme, no los tuviera aún mayores, sino que aquellos eran riesgos impuestos por lo externo, ajenos a su voluntad. Ahora, por su propio actuar, ha reducido los riesgos naturales mediante sus creaciones, pero tiene que responder ante sí mismo y su comunidad de las consecuencias de sus actos.

El continuo estado de alerta que este hecho impone genera tensión y a veces angustia. Poseer un instrumento para cazar o defenderse produce el temor de que alguien use tal arma contra nosotros; nuestras naves transoceánicas ofrecen riesgo de naufragios; las sustancias con que refinamos metales útiles pueden envenenarnos; podemos destrozarnos en nuestros veloces automóviles y aviones, y facilitar nuestro trabajo mediante diversas fuentes de energía, sea por combustión o por fisión, puede convertir en letal el ambiente en que vivimos.

Conforme el acervo tecnológico de la humanidad se incrementa, la tensión derivada de la noción de los riesgos crece también, a veces con razón y a veces irracionalmente. De tiempo en tiempo, el otro polo del espíritu humano nos lleva a sopesar si todo ello vale la pena. Éstos son los momentos en que suele tener lugar la fascinación contemplativa, individual o comunitaria, y la ilusión de que prescindir de la tecnología hace cesar la angustia. Vana ilusión.

Pero ¿acaso no hay remedios para la angustia creciente de sentirse amenazado por la tecnología? Sí los hay, pero su concepción y aplicación constituyen procesos sociales delicados y laboriosos, pues implican a) reforzar la noción de que la tecnología es sólo un medio para fines que el hombre elige; b) distinguir entre riesgo objetivo y temor irracional, y c) aceptar que no vivimos en un mundo determinista, sino en uno con incertidumbres intrínsecas e inevitables. Lo que sigue es una discusión de todo esto.

## **7. LA TECNOLOGÍA ES UNA COSA, NO UN SUJETO**

Para evitar la angustia tecnológica y centrar la atención en el ser humano y la ética es indispensable saber que la tecnología, sea tangible o intangible, es una cosa y, por tanto, no tiene capacidad de decisión; esto es, el hombre es quien decide qué hacer con ella. Además, adoptar una ética y clarificar ciertos valores sociales es la manera más efectiva de reducir los riesgos tecnológicos. Si la tecnología se percibe como una amenaza es porque se teme que algunos usos de ella puedan atacar contra lo que valoramos y, por consiguiente, contra nosotros mismos. Dado que la función tanto de la ética como del sistema de valores sociales, que es uno de sus componentes, es precisamente orientar el comportamiento humano hacia el

cuidado de lo más querido por cada sociedad, un sistema de valores apropiado, claro, fuerte y compartido disminuye la probabilidad de que las decisiones sobre el uso de la tecnología se tomen de manera negligente o malvada. Asimismo, hacer a los seres humanos inequívocamente responsables de cómo y para qué usan la tecnología de que disponen es el mejor método para minimizar las consecuencias indeseables de tal uso, pues se elimina así el equívoco o la excusa implícitos en asumir a la tecnología como ente bueno o malo autónomo del hombre.

A fin de que la tecnología no parezca autónoma y la especie no se sienta amenazada por ella, el ingeniero debe asumir su obligación de tomar las decisiones que le corresponden en cada momento con base en valores compartidos por la sociedad. En cierto sentido, eso mismo debe hacer todo individuo; de aquí la importancia de un sistema de valores fuertemente compartido. Para que se pueda proceder así y las decisiones de todos contribuyan a los fines deseados, es indispensable que en la definición de éstos haya participación social y no simples decisiones tecnocráticas. Solamente si la definición de propósitos de los proyectos de ingeniería está abierta a la participación pública por las debidas vías institucionales habrá compromiso y presión social para estimular el comportamiento deseable e inhibir el que no lo es.

## **8. TEMOR Y RIESGO**

En el manejo inteligente de los peligros de todo tipo, derivados o no de la tecnología, también es importante entender que temor y riesgo no son la misma cosa. Si procediéramos racionalmente, ante un mayor riesgo debiéramos sentir mayor temor. Sin embargo, suele no ser así. Tememos, a veces hasta el nivel de la angustia, morir o sufrir daños graves por radiaciones de diverso tipo o por consecuencia de un terremoto, a pesar de que ambos son, con las prácticas actuales y en términos de mortalidad relativa, riesgos de nivel comparativamente bajo. En cambio, no tememos viajar en automóvil y bicicleta, o tener hábitos alimenticios probadamente dañinos, que ofrecen riesgos de órdenes de magnitud mayores. Eso muestra cuán importante es educar con el propósito expreso de que los temores se asocien a la magnitud relativa de los riesgos y no a otras percepciones.

Para entender el efecto que la tecnología ha tenido en los riesgos, es ilustrativo considerar las tasas de mortalidad. Puede apreciarse entonces que, pese al temor que suele tenerse a la tecnología, casi 70% de todas las muertes en una sociedad moderna que la usa intensivamente se deben a enfermedades sin relación con aquélla, como las cardiovasculares y el cáncer. Si algún efecto ha tenido la tecnología sobre la mortalidad ha sido el de reducirla. Esto ha aumentado la longevidad durante las últimas décadas en casi todos los países y, por tanto, la mortalidad por cáncer; pero en cada intervalo de edades las tasas de mortalidad han disminuido continuamente para casi todas las enfermedades.<sup>106</sup>

Ahora bien, sería tonto y doloso negar los riesgos tecnológicos. Hacerlo fomentaría un estado de complacencia que incrementaría automáticamente dichos riesgos. La intensificación tecnológica causa muchos daños y muertes. En especial, muchas sustancias y ambientes dañinos a la salud han sido creados en tiempos recientes por la tecnología, y ellos son responsables de cierto número de muertes cada año. Sin embargo, si esos efectos del desarrollo tecnológico se ponen en un lado de la balanza y en el otro los beneficios del mismo en la reducción de la mortalidad, estos últimos son claramente mayores, como lo demuestra un solo hecho contundente: la duplicación, en poco más de un siglo, de la esperanza de vida de los pueblos industrializados.

Se puede argüir que al menos la mortalidad por accidentes automovilísticos debe atribuirse netamente a la tecnología, pues resulta

---

<sup>106</sup> “H. W Lewis, *Technological Risk*, W W Norton & Co., Nueva York, 1990, 353 pp.

responsable de la mitad de todas las muertes accidentales. Sin embargo, también en esto hay una falacia, pues seguramente transportarse distancias comparables a pie o a caballo implicaría riesgos mayores; por tanto, es la movilidad (inseparable de la mayor riqueza y libertad en numerosas naciones) a lo que debe atribuirse aquella alta tasa de mortalidad. Por lo demás, ninguna otra creación tecnológica ha producido tasas de mortalidad de magnitud comparable a las del automóvil. Riesgos tecnológicos que suelen ser muy temidos, como los accidentes nucleares o la contaminación química de agua y alimentos, aún con las hipótesis más pesimistas, dan expectativas de muerte muy inferiores a las de contingencias ordinarias de la vida.

Hay, por supuesto, riesgos tecnológicos muy amenazantes. La contaminación atmosférica de la ciudad de México es uno evidente de carácter local. El efecto invernadero es otro, y de alcance global. Este último es una amenaza mayor que los riesgos nucleares por la gravedad de sus posibles efectos y porque su causa principal, la acumulación de bióxido de carbono en la atmósfera, es casi imposible de reducir en un plazo mediano, pues es consecuencia inevitable de la combustión en que se basa la mayoría de los procesos energéticos actuales. Algo similar puede decirse de la destrucción del ozono en la alta atmósfera. Ambos son riesgos tecnológicos preocupantes para el destino de largo plazo de la humanidad, y quizá estamos a tiempo para buscar maneras de reducirlos.

Hemos dicho que actuar racionalmente obliga a que haya concordancia entre el nivel de riesgo y el de temor asociado a cada fuente de peligro. Para esto se requiere cierto esfuerzo cuantitativo; se necesita calcular el riesgo: determinar cuán probable es un evento del tipo que nos preocupa y cuáles pueden ser sus consecuencias. Es imposible eliminar todos los riesgos; por eso hace falta ordenarlos en función de su magnitud para luego aplicar nuestro esfuerzo a los más importantes. Por otro lado, no es razonable pretender abatir cualquier riesgo por debajo de cierta magnitud. Es signo de salud mental aceptar un nivel razonable de riesgo al buscar ciertos fines o beneficios. El temor irracional ante riesgos insignificantes es una enfermedad mental clínicamente caracterizada: se llama fobia. Lo distintivo de una fobia es la exageración del temor muy por encima de la magnitud del peligro. La propaganda que crea temor infundado en la tecnología, genéricamente o en ciertas tecnologías específicas, produce fobias, pero no reduce riesgos.

La magnitud de un riesgo resulta de multiplicar la probabilidad de que el evento ocurra por la pérdida potencial que sobrevendría en tal caso. Los eventos que deben causarnos mayor temor son aquellos en que dicho producto es más grande, y no los casos en que uno de los dos factores, o ambos, son suficientemente pequeños para que su producto también lo sea. Habrá eventualidades cuyas consecuencias potenciales son aterradoras y, sin embargo, debemos temer poco porque su probabilidad de ocurrencia es bajísima; y otras de consecuencias moderadamente graves que debemos temer más, porque su ocurrencia es mucho más probable. Otra vez viene al caso comparar para ese fin el riesgo (y el costo social) de los accidentes nucleares y los automovilísticos.

Aunque es un poco más complejo que lo aquí descrito, lo importante es que, para actuar racionalmente ante los riesgos, siempre debe hacerse

una cuantificación como la indicada. Para ese fin pueden distinguirse dos clases de riesgos, que requieren tratamientos diferentes:

1. Los riesgos ordinarios, sobre cuyas consecuencias y probabilidades hay mucha información, pues las primeras se han observado muchas veces y sobre las segundas hay estadísticas que dan estimaciones excelentes de las probabilidades de ocurrencia futura

2. Los riesgos de eventos extraordinarios, con probabilidad muy pequeña por unidad de tiempo pero con consecuencias potenciales sumamente graves: grandes inundaciones o terremotos, accidentes nucleares, cambios climáticos, etc. La cuantificación de estos riesgos es considerablemente más difícil y discutible. Muchos de estos eventos nunca han ocurrido y, por tanto, no se pueden definir sus consecuencias sino de manera imaginaria y muy incierta; por lo mismo, no hay información estadística sobre su frecuencia y, por consiguiente, su probabilidad tiene que estimarse mediante modelos matemáticos, igualmente sujetos a discusión, imperfecciones e incertidumbres. Dadas sus consecuencias potenciales, ante este tipo de riesgos se justifica una actitud de gran prudencia; es decir, ante la duda, abstenerse.

Ambas familias de riesgos tienen incertidumbres inherentes, pues en ambas concurren factores aleatorios. Sin embargo, son los riesgos del segundo tipo los que más se prestan al desacuerdo y la especulación. Es comprensible que así ocurra: la falta de vivencias equiparables sobre las consecuencias de un evento raro estimula la imaginación de escenarios dantescos, a la vez que el cálculo de su probabilidad de ocurrencia es muy incierto e imposible de abordar experimentalmente. La discusión pública de aquellos escenarios o estas probabilidades siempre ofrece cabida para charlatanismos o demagogia que provocan un claro sesgo hacia la exageración de los riesgos. Y, sin embargo, la solución no es inhibir la discusión abierta, sino educar e informar bien al público acerca de tales cuestiones.

## **9. CON LA INCERTIDUMBRE VOLVEMOS A TOPAR**

Es bueno estar conscientes de que a los seres humanos nos resulta muy difícil ser objetivos. Esto es especialmente cierto en la evaluación de riesgos públicos, en la que intervienen por necesidad diversas partes y profesiones. La dificultad de la comunicación entre profesiones y de éstas con el público es una primera causa de debilitamiento de la objetividad. Pero lo peor se debe a otra característica natural de los seres humanos: su inclinación por argüir y ganar discusiones. Los científicos y los ingenieros, con toda nuestra pretensión de objetividad profesional, somos tan susceptibles como los demás a esta tentación. Un ejemplo muy ilustrativo son las agrias controversias técnicas, legales y publicitarias en torno al riesgo sísmico de las plantas nucleares del estado de California<sup>107</sup>, debidas a que:

1. Conciliar conocimiento científico, tecnología, leyes, intereses particulares e interés público es muy difícil, y cuando esta dificultad aflora los expertos que supuestamente representan la verdad científica pierden la objetividad.

---

<sup>107</sup> R. L. Meehan, *The Atom and the Fault*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1984, 161 pp.

2. Los científicos que participan en audiencias públicas o testifican en ellas con frecuencia hablan como legos, pues están fuera de su campo específico de conocimiento en vista de que la ciencia moderna obliga a especializarse en dominios muy estrechos.

3. No sólo es usual que haya diferencias de criterio entre científicos, ingenieros, abogados y funcionarios, sino que en cuestiones de política pública la congruencia científica desaparece, pues quienes hablan en nombre de la ciencia no usan en esos casos un método de razonamiento único, riguroso y sin ambigüedades.

4. Al contrario de los diálogos profesionales entre colegas de un mismo campo, la expresión de ideas y opiniones destinadas al público está muy influida por el temperamento de cada quien.

5. Como consecuencia de todo ello, es evidente que hace falta institucionalizar ciertas normas o estándares para escoger expertos en problemas de interés público.

La cuantificación de riesgos es difícil; pero es condición necesaria para actuar con racionalidad. La capacidad de hacer tal cuantificación requiere educación. La educación también es insustituible para entender que no vivimos en un mundo determinista, sino en uno cuyos eventos futuros (los únicos que finalmente interesan al tomar decisiones) sólo pueden definirse en términos de probabilidades, como se discute en el capítulo xiv.

Tenemos incertidumbre cuando no sabemos qué efectos produce cierto hecho, o cuál es el origen de otro. Éste es un tipo de incertidumbre debida a falta de conocimiento y puede disiparse con investigación; pero si hay que tomar una decisión y no hay tiempo para investigar, la incertidumbre tiene que aceptarse y manejarse explícitamente. La incertidumbre existe incluso cuando se conoce la relación causa-efecto, pues una causa puede tener más de un efecto y un efecto puede ser producido por más de una causa.

Así pues, el mundo es intrínsecamente incierto. La incertidumbre no es un estado transitorio que siempre pueda superarse con un esfuerzo de investigación adicional, y menos una situación vergonzosa. Una parte considerable de la incertidumbre del mundo es irreductible. Acerca de cualquier riesgo, nunca es verdad que lo sabemos todo ni que nada sabemos. Nuestra estimación subjetiva de la probabilidad de un acontecimiento es una medida legítima de la incertidumbre: mide cuán seguros estamos de lo que sabemos.

La educación sobre la naturaleza incierta del mundo y sobre la manera de lidiar con ella es independiente y complementaria del reforzamiento de los valores sociales. La educación sobre la incertidumbre se refiere a cómo tomar decisiones; los valores, al para qué de ellas. Tal educación implica cierta dosis de la teoría de probabilidades, y podría darse a todos desde la escuela básica, enseñando con sencillez qué es la incertidumbre y cómo se toman decisiones ante ella (véase el capítulo xiv). Mientras esto no se logre, los ingenieros y otros profesionales tendrán la obligación de traducir a la sociedad los términos y la conclusión de cada una de tales discusiones.



## 10. EL RETORNO ES IMPOSIBLE

La confianza de la humanidad en la tecnología ha crecido continuamente desde los primeros tiempos del hombre, pero ha tenido altibajos. Los máximos de desconfianza ante la tecnología suelen estar precedidos por periodos de logros espectaculares. Tras el Renacimiento y los progresos técnicos de los siglos xvi a xviii surgió el culto rousseauiano al “buen salvaje” y la propuesta de “volver a la naturaleza”. El movimiento luddista, que pretendió, con fervor religioso, aniquilar las máquinas, que se percibían como amenaza al empleo, fue precedido por los grandes avances técnicos y productivos de la Revolución industrial. Entre 1945 y 1960 se alcanzó un máximo de confianza en que el desarrollo de la ciencia y la técnica resolvería casi todos los problemas humanos, y se vivió un periodo de gran aceleración de la productividad y la producción agropecuaria, minera, industrial y de servicios; en contrapartida, la década siguiente vio nacer un movimiento social de signo contrario, inmovilista y anticientífico. Este movimiento, iluminado con flama casi mística, prosperó en la región más boyante y que más se había beneficiado del desarrollo tecnológico precedente: California, en los Estados Unidos. Al contrario de los luddistas ingleses, los nuevos místicos no eran obreros ignorantes y temerosos, sino habitantes de ricos suburbios; eran, sobre todo, jóvenes universitarios dotados de comodidad y ocio gracias al avance tecnológico de las décadas anteriores. Estos modernos cruzados, con regimientos de elite acantonados en Berkeley y Stanford, buscaron rescatar a la naturaleza virgen de las garras amenazantes de la tecnología. Por fortuna lo intentaron de modos benignos, con el lema “amor y paz”. Fue un movimiento amplio, con raíces sociales auténticas y con repercusiones en todo el mundo occidental, algunas de ellas por cierto positivas. Fuera de los Estados Unidos sus ecos se agrandaron, no tanto por su ánimo antitecnológico como por su aire libertario, que corrió con frescura por México, Francia y la antigua Checoslovaquia. Los miles de participantes en tal movimiento fueron limpios, espontáneos y, sobre todo, buscadores de libertades; esto salvó su imagen histórica. Los resabios anticientíficos y, por tanto, paralizantes fueron pronto abandonados por la mayoría y sólo han sobrevivido en pequeñas sectas marginales y en ciertos grupos que hoy militan en el ecologismo extremo; su propuesta de parar la evolución técnica y retornar a maneras de vida “más naturales” no tiene fundamento racional, pues ninguna evidencia existe de una era en que todo fuese fácil y benigno para la humanidad, ni de que la vida de antaño fuese siquiera más sana que la de hoy.

La historia muestra que la vida supuestamente sana de siglos pasados hacía que uno de cada dos niños muriera antes de cumplir un año, y el sobreviviente con gran probabilidad falleciera antes de cumplir 40. La leche natural de vacas naturales produce tuberculosis, y los microbios innumerables del ambiente natural mataban en edad temprana a una parte considerable de la población antes de que se introdujeran masivamente ciertas tecnologías: la ingeniería sanitaria primero y los antibióticos después. La mayoría de las cosas que hoy usamos para guarecernos, vestirnos, alimentarnos, curarnos y satisfacer nuestras necesidades espirituales son, por supuesto, creaciones del ingenio y el trabajo humanos; hasta los que consideramos más naturales, como el trigo, las frutas o las papas. Si la humanidad dejara de protegerlos o cultivarlos, todos los

animales y plantas de que hoy nos servimos desaparecerían en poco tiempo, pues son resultado de una larga e ingeniosa labor de selección y modificación por el hombre, y no podrían sobrevivir sin la concurrencia de él: las especies verdaderamente naturales los expulsarían de los nichos ecológicos que les hemos creado.

Sólo los animales silvestres pueden satisfacer sus necesidades con productos naturales: para un gato montés con hambre, un conejo; para un equino, pasto. Y satisfechos con eso, ninguno buscará vestido, casa con baño, un reloj o un libro. Sólo el hombre tiene necesidades que se satisfacen con productos no naturales, y estas necesidades son inmensas. El hombre es un extraño ser cuyas necesidades se hayan en hondo desacuerdo con las condiciones naturales del planeta que habita. Por eso trabajamos: para modificar la naturaleza pura, que satisface mal o no satisface en absoluto muchas de nuestras necesidades. Por eso, poniendo en juego nuestra racionalidad, creamos tecnología y hacemos ingeniería. Una conclusión al respecto es, por tanto, que el retorno de la humanidad al estado original o a cualquier otro estado anterior menos tecnologizado es indeseable e imposible. Lo que sí debemos hacer es ser críticos de nuestras necesidades, jerarquizarlas y comparar los beneficios de satisfacerlas con sus costos económicos, ambientales y sociales, como se señala en el capítulo v y se discute en varios otros de este libro.

La amenaza fundamental para la ecología y para la propia especie humana no proviene de la tecnología, que es sólo un medio para los fines que el hombre elige. Para resolver los problemas ecológicos que hoy nos afectan o amenazan se requieren las siguientes acciones: 1) acotar la tasa de crecimiento demográfico; 2) extender y profundizar la educación; 3) reforzar los valores sociales, y 4) reducir los grandes desperdicios que hoy ocurren de energía y materiales, haciendo, en general, una mejor ingeniería y, en particular, un uso inteligente de la tecnología.

### ***XIII. Los sistemas socio-técnicos***

#### **1. SISTEMA Y SUBSISTEMAS**

Hemos dicho que, al diagnosticar y diseñar, el ingeniero se apoya en relaciones causa-efecto cuya validez ha sido probada por la ciencia o por la práctica; se trata de relaciones cuantitativas entre, por ejemplo, la lluvia que cae en cierta cuenca y los caudales de agua que escurren por sus ríos, o entre las cargas que actúan sobre una estructura y las deformaciones que ésta sufre, etc. En algunos casos tales relaciones pueden manejarse como si el fenómeno ocurriera una sola vez y en una sola dirección en el tiempo: las lluvias producen escurrimientos en los ríos y las cargas causan deformaciones en las estructuras; es decir, como si después de ocurrida la causa y producido su efecto todo se detuviera. Pero otras veces un efecto puede ser a su vez causa; esto es, producir otro efecto y así sucesivamente. Cuando se forman tales cadenas de causas y efectos se abre la posibilidad de que se generen ciclos cerrados que se realimentan a sí mismos, dando lugar a lo que se denomina un sistema en el sentido cibernético, cuyo comportamiento es entonces necesariamente dinámico, es decir, cambiante con el tiempo.

En los sistemas con los que se lidia al resolver un problema de ingeniería pueden distinguirse tres partes o subsistemas: uno inanimado, que es la obra o producto objeto de diseño; otro social, que es el conjunto de seres humanos afectados de alguna manera por el primero, y uno más constituido por el entorno natural. El ingeniero suele centrar su atención en el subsistema físico o inanimado, que así se va convirtiendo inadvertidamente en el único objeto focal del diseño (sea un puente, un avión, un aparato electrodoméstico, un edificio, etc.), pero igualmente importante es poner atención a los otros dos subsistemas para asegurarse de que el primero interactuará apropiadamente con la sociedad y no causará daños inaceptables al ambiente natural. Quizá la razón principal por la que el diseñador se concentra en la parte inanimada de los problemas que atiende sea que ésta es más fácil de estudiar y, por tanto, la ciencia ofrece más conocimiento de utilidad práctica sobre ella que sobre las otras dos.<sup>108</sup>

La evaluación de un proyecto de ingeniería exige tomar en cuenta de modo explícito las tres partes indicadas, sin cualquiera de las cuales el problema a resolver no existiría o no tendría sentido; los subsistemas natural y social deben ser también objetos de diseño y especificación al menos en cuanto a sus relaciones con el subsistema inanimado. Además, ver los problemas de ingeniería como si todo comenzara en ciertas causas y terminara en sus respectivos efectos directos e inmediatos sólo es posible o útil en circunstancias muy restringidas. Aun en cuestiones puramente técnicas, que excluyen la interacción entre la sociedad y los productos de la ingeniería, el enfoque lineal de las relaciones causa-efecto no siempre puede adoptarse, pues muchos problemas técnicos de las ingenierías eléctrica, electrónica, aeronáutica, etc. son dinámicos por sí mismos. Y desde luego, siempre que analicemos los proyectos en interacción con sus usuarios, sus beneficiarios y su medio natural será indispensable tomar en cuenta los ciclos de realimentación en que el proyecto de ingeniería influye

---

<sup>108</sup> D. Blockley, *The Nature of Structural Design and Safety*, Ellis Horwood Ltd., Chichester, Gran Bretaña, 1980, p. 231.

en dicho entorno y viceversa. Los objetos u obras diseñados afectan a la sociedad y al entorno y son influidos por éstos; así, los tres terminan por integrarse en un sistema dinámico. Trátese de un nuevo diseño de automóvil, un sistema de transporte, cierta obra de irrigación o simples artefactos domésticos, entre la porción física del proyecto, la sociedad y el ambiente natural se producen efectos mutuos, por lo que el problema técnico se transforma en socio-técnico. En esta fase del trabajo del ingeniero, la disciplina llamada teoría de sistemas o dinámica de sistemas resulta un instrumento de análisis imprescindible. Lo ilustraremos con diversos ejemplos, comenzando con uno relativo a la evaluación económica de proyectos.

## 2. EVALUACIÓN DE PROYECTOS

De todo proyecto de ingeniería se requiere estimar razonablemente los beneficios y los costos. La visión más simple del problema se puede representar como en la figura XIII.1 y es trivial,

pues nos dice que el proyecto tiene ciertos costos y beneficios que son consecuencias directas de él. Tal visión nada revela

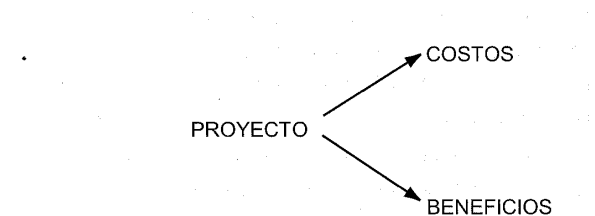


FIGURA XIII.1. *Visión lineal de los costos y beneficios de un proyecto.*

Hace falta un enfoque sistémico; es decir, uno que muestre los ciclos de realimentación del proyecto para comenzar a ver el problema de manera significativa. La imagen sistémica más sencilla que puede concebirse del mismo problema es la de la figura XIII.2, donde las consecuencias del proyecto pueden subdividirse en dos: en primer lugar, ciertos costos directos (línea de causalidad 1) y, en segundo, otros efectos (línea 2); luego puede considerarse que algunos de estos efectos constituyen los beneficios directos del proyecto (línea 3) y otros se convierten en costos adicionales, casi siempre mediatos (línea 4). En efecto, todo proyecto de ingeniería tiene efectos que repercuten en costos adicionales a los de su ejecución. Una presa, por ejemplo, tiene entre sus efectos la regulación de los escurrimientos del río, lo que produce diversos beneficios como evitar inundaciones, posibilitar la irrigación y la generación de electricidad, etc., pero a la vez repercute en costos adicionales a los de construcción, pues impide seguir cultivando las tierras inundadas por el embalse y produce daños ambientales al alterar el régimen con el que durante milenios había corrido el agua en el río. Es decir, los costos de un proyecto nunca se limitan al costo de su ejecución, sino que tienen otros componentes producidos por la línea de causalidad 4.

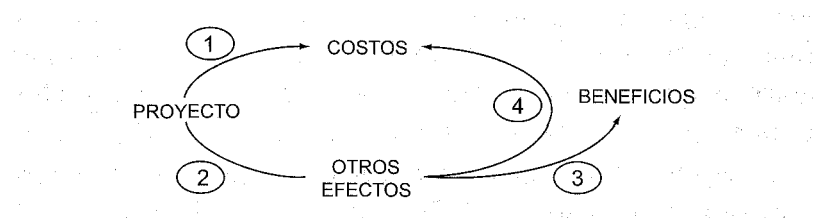


FIGURA XIII.2. *Visión sistémica sencilla de los costos y beneficios de un proyecto.*

Así pues, todo proyecto produce, además de los efectos expresamente deseados o beneficios y sus costos directos respectivos, otros de signo negativo; esto es, costos indirectos (económicos, sociales o ambientales) que deben agregarse al costo directo, inmediato o estático del proyecto para hacer posible una evaluación más realista. Por eso omitir la línea de causalidad 4, que cierra un circuito causa-efecto en la figura, implica un grave error. Veremos después que la imagen sistémica de la figura XHI.2 no es la única que puede concebirse para fines de evaluación de proyectos, sino que hay una infinidad de posibilidades de afinación de ella, que darían lugar a diagramas más y más completos (y complejos) y a las correspondientes evaluaciones más fidedignas de la factibilidad general del proyecto y de su rentabilidad económica en particular.

Sin embargo, calcular beneficios y costos a partir de una imagen estática del proyecto como la de la figura xiii.i es una práctica (o un truco) muy usual, que siempre resulta en una sobreestimación del beneficio neto del proyecto (beneficio menos costo), pues omite los costos diferidos. Además de ser usual, tal estrategia tiene como consecuencia (y en algunos casos como motivación) lo que podríamos llamar la privatización de los beneficios y la socialización de los costos de los proyectos de ingeniería. En efecto, en la medida en que se hace un balance de costos y beneficios sólo de corto plazo, el promotor (gubernamental o privado) de un proyecto suele contabilizar y vender (literalmente o en términos políticos) los beneficios del mismo antes de que se materialicen los costos indirectos o mediatos resultantes de la línea de causalidad 4; tiempo después, cuando estos últimos costos se hacen palpables, ya no los absorberá el promotor, sino la sociedad. Por supuesto, no siempre es esta obscena causa la que está detrás de la inadecuada evaluación de los proyectos, sino a veces la miopía de quien evalúa o la simpleza de los criterios que el gobierno o el ente regulador imponen como norma para dicha evaluación.

### 3. EL ENFOQUE Y EL LENGUAJE DE SISTEMAS

Errores como el descrito se pueden evitar adoptando de manera general la llamada visión sistémica, pues ésta pone atención en prever los resultados de la interacción de un proyecto con su entorno. Esta manera de ver las cosas pone énfasis en la dinámica del problema, más que en su imagen estática. El pensamiento sistémico es una disciplina para ver el todo y sus relaciones mutuas con variables internas y externas a fin de prever su evolución en el tiempo. Se basa en un conjunto de herramientas y técnicas derivadas de la teoría de los servomecanismos (rama de la ingeniería mecánica del siglo xix) y de la realimentación o feedback (concepto de la cibernética del siglo xx). La clave del enfoque de sistemas consiste en poner

atención a las relaciones del proyecto y sus componentes con los factores ambientales y los actores sociales que intervienen en él. El primer paso para tal fin es identificar las relaciones dinámicas entre todos ellos, dado que con frecuencia no son obvias; luego, hay que examinarlas y definir la naturaleza de cada una. Este enfoque, a su vez, da lugar a cierto lenguaje gráfico propio de este campo, adecuado para describir las interrelaciones que más importan, que no son las lineales o abiertas sino las circulares o cerradas, en las que de manera cíclica una variable influye sobre otra y ésta a su vez sobre la primera, y así sucesivamente. Esto da lugar a que el diagrama característico de cualquier sistema sea siempre un círculo o un conjunto enlazado de ellos, en donde cada lazo o ciclo implica un proceso de realimentación.

Hay en todos los sistemas dos grandes tipos de ciclos de realimentación: el de aceleración o crecimiento y el de estabilización. Uno del primer tipo hace que la variable que lo sufre crezca (o decrezca) cada vez más rápidamente con el tiempo; en cambio, un ciclo estabilizador da lugar a que la variable, al ser desviada por cualquier motivo de su estado de equilibrio, tienda a volver espontáneamente a su posición inicial. Los ciclos o procesos de crecimiento funcionan como las bolas de nieve, que crecen y crecen conforme avanzan, alimentadas por su propio movimiento; en cambio, los de estabilización movilizan una resistencia al cambio en el sistema. En ambos casos, la tendencia del ciclo a incrementar o a estabilizar variables es intrínseca; es decir, proviene de las características del propio sistema.

Suele decirse que en la teoría de sistemas “todo está relacionado con todo” y esto es cierto en principio; pero aplicarlo a pie juntillas conduciría a marañas de relaciones ininteligibles, la mayoría de ellas sutiles e intrascendentes, que es la antítesis de lo que busca el enfoque sistémico. Así pues, el único sentido práctico que debe asignarse al dicho “todo está relacionado con todo” es que interesan sobre todo los ciclos de realimentación, por ser ellos los que producen un comportamiento dinámico de los sistemas; pero entre los ciclos de realimentación hay algunos dominantes y otros poco significativos.

Es obvio que de todo sistema pueden hacerse representaciones más y más completas indefinidamente; el buen juicio del profesional que las elabora determina hasta qué grado de refinación y complejidad es prudente llegar, según la relevancia relativa de las diversas variables en juego para un fin determinado.

Por ejemplo, el problema de costos y beneficios de un proyecto, representado con dos diagramas diferentes en las figuras xiii.i y XIH.2, también puede describirse con un diagrama que incluya el ciclo acelerador que se desata cuando la rentabilidad del proyecto realimenta nuevos proyectos también rentables y así sucesivamente, como en la figura XIII.3a)

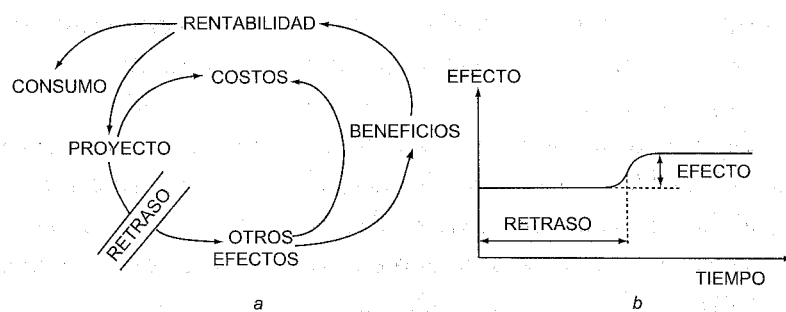


FIGURA XIII.3. *Visión más completa de los efectos de un proyecto rentable: a) representación sistémica; b) evolución en el tiempo de los efectos retrasados del proyecto.*

Esta figura es una representación más completa del ciclo de un proyecto, pues incorpora líneas causa-efecto adicionales y nuevos ciclos de realimentación significativos. En particular, muestra que los beneficios del proyecto; esto es, su rentabilidad, pueden reinvertirse en proyectos adicionales, sean extensiones del original o proyectos distintos; además, en esta nueva representación se reconoce que entre la ejecución del proyecto y la materialización de sus efectos transcurre cierto tiempo llamado retraso, que en la figura XIII.3a se representa mediante dos líneas paralelas que interrumpen la inmediatez de la relación causa-efecto (en rigor siempre hay retraso entre cualquier acción y sus consecuencias, pero conviene omitirlo cuando es pequeño, pues en tal caso no tiene repercusiones significativas). En la parte b de la propia figura se muestra la evolución en el tiempo de tal relación de causalidad retrasada. Evidentemente, si la figura XIII.3 se usara para fines de evaluación de costos y beneficios o rentabilidad de un proyecto, los resultados serían diferentes de los que se obtendrían a partir de la figura XIII.2.

De lo anterior se colige que, para expresar el pensamiento sistémico, el lenguaje ordinario no es el mejor, dado su carácter lineal. Las interacciones y ciclos de realimentación de un sistema se representan más claramente mediante diagramas circulares como los de las figuras XI.2 y XIII.3.

#### 4. DINÁMICA DE LOS SISTEMAS SOCIO-TÉCNICOS

Usaremos los sencillos elementos del enfoque sistémico hasta aquí descritos para mostrar que con ayuda de ellos se puede estudiar lo que ha dado en llamarse la dinámica de los sistemas socio-técnicos; es decir, el comportamiento de los sistemas en que los productos de la ingeniería interactúan con sus entornos social y ambiental.

Una ventaja de esta forma de representar los sistemas radica en que permite mostrar integralmente las interrelaciones internas y externas del sistema. En ello consiste el valor de este lenguaje gráfico y del enfoque sistémico en sí mismo, pues su propósito es precisamente ver a la vez el todo y sus partes actuantes, a fin de percibir los ciclos de realimentación que darán su carácter dinámico al sistema. Por supuesto, en sistemas con muchas variables, la maraña que resultaría de desagregar todas sus partes en sus elementos constitutivos y mostrar la interrelación de cada elemento con todos los demás puede llegar a ser abrumadora. Acercarse a tales extremos sería indicio de que no se está ejerciendo un sano juicio para identificar los subsistemas (esto es, las partes cuyos elementos constitutivos tienen un efecto conjunto sobre el sistema) sino que se está haciendo una simple desagregación indiscriminada, lo que impide distinguir entre lo importante o significativo y lo trivial o intrascendente.

Se explicaron ya, a grandes rasgos, los ciclos aceleradores y los estabilizadores. Veamos ahora cómo un mismo ciclo puede exhibir a la vez comportamiento estabilizador o acelerador, según la variable a la que pongamos atención. Para este fin estudiemos un problema de la ingeniería que todo ciudadano de hoy conoce: el sistema socio-técnico que resulta de la introducción de nuevas vialidades para automóviles en una urbe. Todo habitante de una ciudad ha visto que, cuando se realizan obras para acortar el tiempo de traslado entre dos puntos de la red vial, éste efectivamente se reduce, pero después vuelve a aumentar poco a poco hasta alcanzar un valor similar al original. Tal comportamiento se debe a que en el sistema ocurren dos fenómenos contrarios que se anulan mutuamente: uno es la reducción del tiempo de traslado por la adición de la nueva vialidad, y el otro, el aumento del número de vehículos en circulación, estimulado por la misma mejora y que termina por anular la reducción que se había conseguido.

Para entender el fenómeno estudiemos la figura XIII.4. En la parte a de ella se muestra un diagrama del sistema, simplificado por cuanto omite los retrasos que existen entre la puesta en servicio de una nueva vialidad y el momento en que se dejan sentir sus efectos; en la parte b se representa el sistema incluyendo los retrasos, y en la parte c se indica, con base en esta segunda representación, cómo evolucionan en el tiempo los efectos. Si en la parte c de la figura, además de observar la variable “tiempo de traslado”,  $T$ , ponemos atención al “número de vehículos”,  $N$ , encontraremos que el efecto más notable del ciclo de realimentación de este sistema es el crecimiento acelerado del parque vehicular. En la representación que incluye retrasos este crecimiento ocurre como lo indica la línea continua de la figura XIII.4c, y en el sistema hipotético de respuesta instantánea (sin retrasos), el crecimiento sigue la línea punteada; similarmente, en el modelo con retrasos, el tiempo de traslado disminuye instantáneamente con la introducción de cada nueva vialidad y luego crece otra vez poco a



poco hasta alcanzar aproximadamente el mismo valor inicial (línea continua), mientras que para el modelo sin retraso este tiempo se mantiene constante.

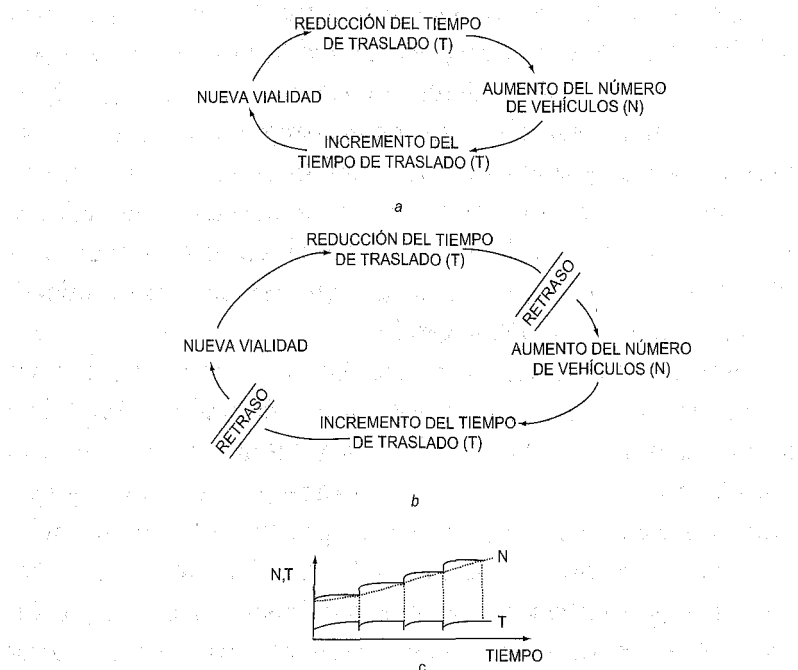


FIGURA XIII.4. Ciclo de introducción de nuevas vialidades para automóviles en el tránsito urbano: a) representación sistémica simplificada (sin retrasos); b) representación sistémica más realista (incluyendo retrasos); c) evolución de los efectos en el tiempo (sin retrasos: línea punteada; con retrasos: línea continua).

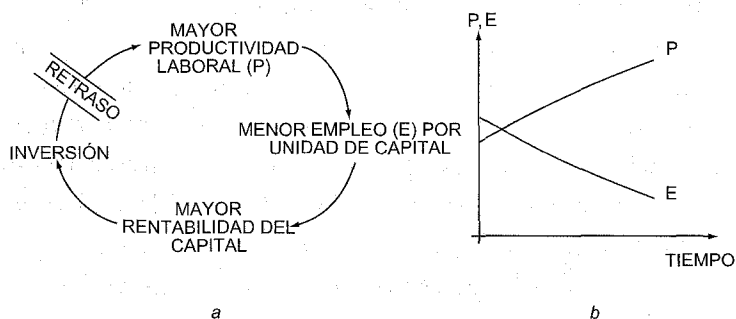


FIGURA XIII.5. Ciclo de las inversiones que aumentan la productividad laboral: a) representación del sistema; b) evolución de los efectos en el tiempo.

En la figura XIII.5 se da como ejemplo un problema de un campo diferente que, sin embargo, exhibe un comportamiento del mismo tipo. Se ilustra ahí lo que ocurre cuando una empresa hace inversiones de capital que incrementan la productividad de sus trabajadores. La parte a de la figura muestra el ciclo: con cierto retraso, la inversión hace crecer la productividad laboral,  $P$ , lo que da lugar a que el empleo,  $E$ , por unidad de inversión se reduzca; esto a su vez propicia que se hagan nuevas inversiones que producen la repetición del ciclo. En tal caso, la parte b de la figura muestra cómo evolucionan las variables  $E$  y  $P$ . Podemos observar un fenómeno similar al visto en el caso de las vialidades urbanas: si nos fijamos en la productividad  $P$ , nos damos cuenta de que ésta tiene una realimentación positiva que la hace crecer; pero si en el mismo ciclo nos interesamos en el empleo  $E$  por unidad de inversión, vemos que éste tiene realimentación negativa y por tanto decrece. El retraso entre la inversión y el crecimiento de productividad se debe a que es necesario cierto lapso para que el personal aprenda a manejar la nueva tecnología; en cualquier caso el comportamiento es el descrito y, si el retraso cambia, lo único que ocurre es que se modifica la rapidez con que  $P$  crece y  $E$  decrece. Una de las virtudes del enfoque de sistemas es que permite visualizar fácilmente situaciones muy complejas. Por ejemplo, la interacción de dos sistemas de naturaleza opuesta, uno con realimentación positiva o de crecimiento y otro con realimentación estabilizadora, pero que se encuentran interconectados por un componente común a ambos. En la vida real es muy frecuente este caso, cuyo comportamiento puede ser sorprendente. Para ilustrarlo podemos servirnos del mismo sistema esquematizado en la figura XIII.5

Mientras el entorno no se modifique, los efectos de las inversiones que incrementan la productividad laboral son obviamente positivos a escala local; es decir, en una empresa aislada, pues en cada ciclo se incrementa su rentabilidad. Pero supongamos que todas las empresas de una región o país siguieran simultáneamente la misma práctica. Entonces tendríamos una situación como la de la figura xiii.6, en que el sistema local (de la empresa) y el global (de la economía en su conjunto) comienzan a interactuar: el ciclo local de crecimiento de la productividad de cada empresa se acopla a un proceso estabilizador global que, con el tiempo, termina por impedir que crezca el conjunto de la economía a causa de la disminución del empleo, y esto a su vez comienza a afectar a las empresas. En la parte superior de cada uno de los dos ciclos del sistema se muestra la evolución que observaríamos en la productividad,  $P$ , y en la demanda agregada  $DA$ . El resultado global neto será primero la desaceleración de la tasa de crecimiento del PIB y finalmente su retroceso, pues el empleo se deprime por partida doble (en uno de los ciclos, por aumento de la productividad laboral, y en el otro, por disminución de la demanda agregada). Si se llegara a tal situación, romper el estancamiento exigiría, por ejemplo, reforzar la demanda agregada aumentando en cierta proporción salarios e impuestos, mientras con estos últimos se alimenta, por ejemplo, un seguro contra el desempleo (aunque todo ello a su vez puede tener efectos inflacionarios).

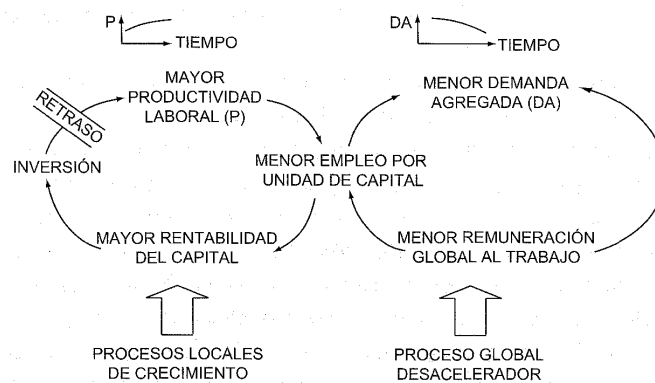


FIGURA XIII.6. *Relaciones entre inversión en bienes de capital, productividad laboral y empleo.*

Del ejemplo anterior se desprende una moraleja válida en toda la gran diversidad de sistemas en los que convive un proceso de crecimiento de efectos retrasados con otro de estabilización: manipular tales sistemas sin el debido tacto puede inducir muy fácilmente un comportamiento indeseado que el sistema no será capaz de corregir por sí mismo, y se requerirá una acción externa expresamente diseñada para romper el efecto. El acoplamiento de dos ciclos como los indicados, uno de crecimiento y otro estabilizador, es muy frecuente tanto en la naturaleza como en los sistemas socio-técnicos, y da lugar a que el crecimiento de alguna variable llegue a un tope. Si tal estancamiento es indeseable, se requerirá una acción externa sobre el sistema para introducir en él un proceso intrínsecamente acelerador.

## 5. RETRASOS Y DESESTABILIZACIÓN

Los retrasos parecerían en principio de poca trascendencia, pues no introducen procesos o ciclos adicionales en el sistema; sin embargo, suelen incrementar la probabilidad de desestabilización. Consideremos, por ejemplo, el sistema constituido por el mercado inmobiliario, que se representa en la figura XIII.7. En este mercado la decisión de construir o no un nuevo proyecto depende de que la demanda supere o no a la oferta, lo que por tanto funciona como mecanismo estabilizador intrínseco del sistema. Sin embargo, el retraso entre la fecha en que se decide construir un nuevo proyecto inmobiliario (porque hay más demanda que oferta) y aquella en que el propio proyecto se concluye, puede dar lugar a que el mercado cambie del estado de demanda insatisfecha a uno de sobreoferta, como puede apreciarse de inmediato al examinar la figura XIII.7. Efectivamente, todos los participantes individuales que, en un momento en que hay un pequeño exceso de demanda, tomaran simultáneamente la decisión de invertir, estarían contribuyendo a que el balance cambiara hacia la sobreoferta al término de su respectivo proyecto. Cuanto mayores sean el retraso (lapso entre la decisión de construir y la terminación del proyecto) y la escala los proyectos individuales, mayor desestabilización.

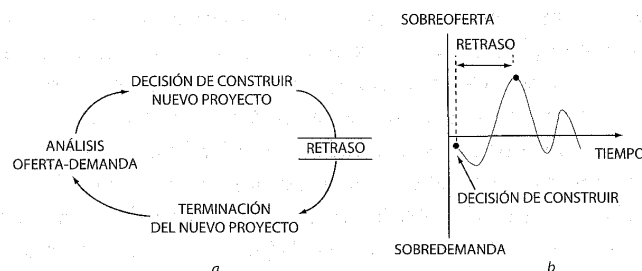


FIGURA XIII.7. El mercado inmobiliario: a) diagrama del proceso; b) desequilibrio y vuelta a la estabilidad del sistema.

La desestabilización de un sistema así siempre desemboca en oscilaciones a uno y otro lado del punto de equilibrio, pues el retraso con que el sistema responde a las decisiones de los inversionistas provoca de manera natural reacciones excesivas de éstos; entonces, ante cualquier desequilibrio, el siguiente estado del sistema es otro desequilibrio de sentido contrario, y así sucesivamente, como se ilustran la figura XIII.7b; esto explica los periodos de volatilidad que suelen afectar a este mercado y otros similares. Sin embargo, los sistemas de este tipo tienden a estabilizarse después de una breve sucesión de oscilaciones de amplitud decreciente, como se ilustra en la propia figura XIII.7b. Cuanto más rápidamente se busca corregir los desequilibrios de un sistema que tiene retrasos intrínsecos, las oscilaciones que se producen resultan más amplias y numerosas antes de que el sistema vuelva al equilibrio; por tanto, la regla de oro ante tales situaciones es actuar con medida y parsimonia. Los ciclos de refuerzo o aceleración, los de estabilización y los procesos de retraso son los tres elementos constitutivos básicos de los sistemas dinámicos en general, y la manera como se combinan determina finalmente en qué forma evolucionan éstos y sus diversas variables. Revisaremos a continuación algunos casos típicos o arquetipos de sistemas socio-técnicos.

## 6. FALSAS SOLUCIONES Y CÍRCULOS VICIOSOS

Debido a su carácter dinámico, en los sistemas socio-técnicos es frecuente que, cuando se quiere corregir su mal funcionamiento, se alivien los síntomas sin resolver la causa de fondo, por lo que el problema se vuelve recurrente y se genera un círculo vicioso. Este patrón de comportamiento constituye uno de los arquetipos de la teoría de sistemas y se presenta cuando no atinamos a identificar y atacar las causas subyacentes de un problema sino sus indicios. En la práctica suele actuarse entonces por tanteos, y lo primero que ocurre es lo obvio: eliminar los signos del problema, no el problema en sí. De tal modo se logra cierta mejoría transitoria, tras la cual se vuelve a la condición insatisfactoria, quizás agravada.

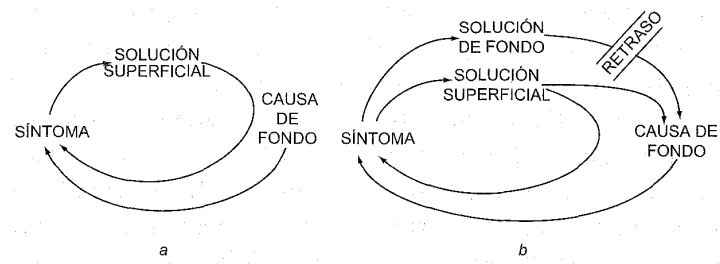


FIGURA XIII.8. Dos tipos de solución de un problema:  
a) solución superficial; b) solución de fondo.

La figura XIII.8a ilustra lo que sucede: el síntoma se atiende con una solución que llamamos superficial porque no toca la causa de fondo, lo que da lugar a un ciclo recurrente que va del síntoma a la falsa solución y viceversa, mientras el problema en sí probablemente se agrava. Aliviar sólo el síntoma puede agravar el problema porque la causa del mismo sigue actuando. En efecto, en tal caso inciden sobre el síntoma dos acciones: una que tiende a aliviarlo, producida por la solución superficial concebida expresamente para ese fin, y otra que lo mantiene o agrava, originada en la causa de fondo desatendida; aun si al principio predominara la primera de tales acciones, el balance se volcaría progresivamente hacia el efecto negativo provocado en el sistema por la causa de fondo, pues ésta se encuentra abandonada a su propia evolución.

El problema se puede resolver solamente si se hace un correcto diagnóstico de él; es decir, si se identifica y ataca la causa de fondo, como se indica en la parte b de la figura. Esto rompe el círculo vicioso y lleva el sistema a un ciclo más amplio, envolvente del anterior, que pasa por la causa de fondo y la corrige. Este nuevo ciclo hace por sí mismo que el sistema comience a estabilizarse, por el alivio progresivo tanto del síntoma como de su causa profunda. Por supuesto, atacar la causa de fondo no impide usar a la vez una solución puramente sintomática, que alivie más rápidamente el síntoma (como suele hacerse en medicina: prescribir analgésicos, pero no dejar de curar la causa del dolor).

Se paga un costo cuando se adopta una falsa solución inicial; tal costo consiste, cuando menos, en un retraso de la solución de fondo, de magnitud igual a la suma de 1) el lapso durante el cual se intentó la solución falsa, más 2) un retraso adicional derivado del agravamiento de la causa de fondo durante dicho lapso, más 3) el retraso intrínseco necesario para que la solución tenga efecto sobre la causa de fondo.

Los casos de la vida real que ejemplifican este arquetipo son numerosísimos y se dan en todos los campos; los siguientes son algunos ejemplos:

1. En el transporte urbano la adición de vialidades para automóviles suele ser una falsa solución a los congestionamientos de tráfico. Esto, como se vio al estudiar la figura XHL5, usualmente conduce al círculo vicioso "congestionamiento-ampliación de vialidades-alivio temporal-aumento del número de vehículos-vuelta al congestionamiento", además de imponer altos costos. Bien se sabe que la solución de fondo para este problema urbano es el transporte masivo.

2. En educación, la mejora de la calidad a veces exige soluciones de tipo cuantitativo como el incremento de recursos materiales y gasto; pero en muchos más casos lo que hace falta son medidas de carácter cualitativo. En este último caso, la inyección de recursos más cuantiosos es una falsa solución que, además, agrava el problema, tanto porque retrasa la solución verdadera como porque la vuelve cada vez más difícil de adoptar y más costosa. La solución de fondo, de carácter cualitativo, pasa por nuevos compromisos entre el profesorado y los padres de familia, en el caso de la educación básica, o entre estudiantes y profesores en la educación superior; una vez asumidos tales compromisos, puede ser útil asignar también más recursos tangibles si procede, pues éstos tendrán entonces un uso

consensuado que reforzará el sentido de comunidad, que es esencial a la eficacia educativa.

3. El incumplimiento de metas en organizaciones empresariales o gubernamentales empuja con frecuencia a otra falsa solución: reducir las aspiraciones corrigiendo a la baja dichas metas; la solución verdadera requiere mucho más agudeza y esfuerzo, pues implica revisar de modo autocrítico la racionalidad de la organización, sus procedimientos y sus relaciones interpersonales internas.

En general, la razón por la que son tan frecuentes los círculos viciosos radica en que las soluciones superficiales, por un lado, parecen opciones de sentido común y, por otro, siempre requieren menor esfuerzo, tanto en su concepción como en su implantación. Incluso si alguien vislumbra y señala el riesgo de incurrir en una falsa solución, la tentación y aun la presión de intentarla siempre existe, usualmente fundada en argumentos igualmente someros, como que es muy obvia, su costo es muy pequeño, implica poco esfuerzo y está al alcance.

Ahora bien, lo “profundo” de una solución es siempre relativo. Todo problema tiene una gama de soluciones potenciales que va desde las más “superficiales” hasta las más “profundas”. En vista de que las soluciones profundas suelen requerir más recursos y tener más largos retrasos; es decir, exigen más tiempo para concebirlas, implantarlas y lograr sus efectos, puede ser no sólo legítimo sino sabio resolver un problema instaurando desde el principio el doble ciclo de la figura xiii.8b, mediante la adopción simultánea de una solución superficial que alivie pronto el síntoma, y una profunda que comience a atacar sin pérdida de tiempo la causa de fondo. Se es, por cierto, el paradigma de la medicina moderna: alivio inmediato del dolor (síntoma) mediante una solución superficial (analgésicos) mientras a la vez se ataca el padecimiento de fondo, a sabiendas de que el alivio de este último tomará más tiempo, pues siempre vendrá con cierto re-

## **7. EL PROBLEMA DE LOS RECURSOS COMUNITARIOS**

El patrón que enseguida se describe también es un arquetipo que se presenta una y otra vez en casi todos los casos en que hay un recurso limitado de carácter comunitario (que pertenece a todos los integrantes de cierta comunidad local, regional, nacional, empresarial, global, etc.) y al que, por tanto, tiene acceso cualquiera que lo requiere, con o sin trámite o pago de derechos de por medio. Son los casos de todos los recursos naturales al principio de su explotación, desde el petróleo y los bosques hasta los mares, el aire, el agua, etc. Los ingenieros civiles tienen que ver con tales sistemas frecuentemente.



El ciclo se ilustra en la figura xiii.. Comienza con la explotación simultánea del recurso por dos o más usuarios individuales (1 e '2 en el ejemplo de la figura, si bien el patrón del sistema es idéntico con cualquier número de beneficiarios igual o mayor que dos). La actividad de los usuarios genera utilidades independientes a cada uno y, por tanto, una motivación para hacerla crecer. Mientras el consumo que conjuntamente hacen del recurso es sostenible, los ciclos "explotación-ganancia-más explotación" de cada usuario pueden operar sin afectarse mutuamente y, como es natural, tienen el carácter de procesos de crecimiento. Ambas actividades seguirán aumentando independientemente hasta que, con cierto retraso, el consumo del recurso se torna insostenible. A partir de ese momento el consumo conjunto de ambos usuarios se vuelve una variable clave, común a ambos ciclos, y las actividades de 1 e '2 interfieren entre sí, por lo que cesa la aceleración de ambos procesos y comienzan dos nuevos ciclos que pasan por la necesidad de limitar el consumo conjunto. Estos nuevos circuitos tienen carácter amortiguador y, por tanto, pueden conducir a un estado de equilibrio sostenible, siempre que se actúe racionalmente. En efecto, el estado de equilibrio sostenible no suele alcanzarse de modo espontáneo, sino que requiere un mecanismo de autorregulación convenido por los propios beneficiarios o uno inducido desde el exterior del sistema, sea por presión social o por dictado de un ente regulador o gubernamental.

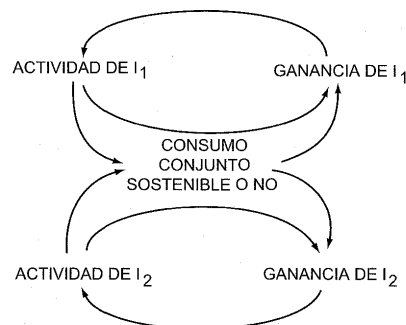


FIGURA XIII.9. Patrón de uso de los recursos comunitarios limitados.

## ***XIV. La incertidumbre y su manejo***

### **1. ACEPTAR LA INCERTIDUMBRE**

De ordinario tomamos decisiones que implican grandes incertidumbres, pues se refieren a eventos futuros más o menos probables o a posibles consecuencias futuras de hechos o condiciones presentes; sin embargo, no sentimos la necesidad de estar calculando continuamente probabilidades. Hace cuatro siglos que el filósofo inglés John Locke dio una genial explicación de tal paradoja. Según Locke, los seres humanos tenemos necesidad de certeza y para satisfacerla disponemos de una notable capacidad innata llamada juicio, que de modo inconsciente nos permite procesar la información disponible sobre eventos inciertos y lograr una confortable certeza al tomar nuestras decisiones. Todos tenemos capacidad de juicio, que además podemos orientar, desarrollar y afinar en un particular campo de actividad como la ingeniería, en cuyo caso se llama juicio profesional. No obstante, en el capítulo iv adelantamos que ciertos casos ameritan que la incertidumbre se procese no sólo mediante el juicio profesional, sino más explícitamente; en el presente capítulo se explicará sucintamente por qué y cómo hacerlo. El tratamiento del tema será principalmente conceptual, a fin de mantenerlo asequible a los no especialistas, como el resto del libro; no obstante, si el lector no conoce al menos el lenguaje elemental de la teoría de probabilidades, este capítulo puede ofrecerle ciertas dificultades inevitables. Quienes topen con esta pequeña dificultad y no tengan al menos curiosidad por el tema pueden omitir las partes del capítulo que les resulten poco inteligibles, y no por ello sacrificarán la comprensión del resto.

### **2. LA INCERTIDUMBRE OBJETIVA**

¿Es el universo determinista o incierto? ¿Pueden conocerse con certeza algunas cosas, o lo que sabemos es siempre dudoso? En otros términos, ¿podemos eliminar por completo cualquier incertidumbre y hacer aseveraciones absolutamente ciertas acerca de algo, o de todo? Pudiera parecer natural buscar la respuesta a estas preguntas en la ciencia, pues el objetivo declarado de ésta es desentrañar la verdad acerca de todas las cosas del mundo; pero al intentarlo nos encontramos con la sorpresa de que los científicos tienen al respecto sólo respuestas personales y que éstas cubren toda la gama de posibilidades, a saber:

- Respuesta 1: El mundo es cierto o determinista, como lo prueba el hecho de que las teorías científicas permiten hacer predicciones cuando se conocen los parámetros y variables que definen de manera completa el estado inicial del fenómeno de interés (por ejemplo, la trayectoria que seguirá un proyectil si conocemos su posición y velocidad en un instante cualquiera).
- Respuesta 2: El mundo es determinista, pero predecir ciertas cosas, aun tan sencillas como lo que resultará de tirar un dado, es en la práctica muy engorroso, y exige conocer con gran precisión un número tan grande de variables y parámetros que es preferible suponer que el fenómeno es aleatorio.

- Respuesta 3: El mundo es determinista, pero muchos de sus fenómenos (como el clima y el tiro de dados) son tan sensibles a pequeñas variaciones en las condiciones iniciales que resulta indispensable tratarlos como aleatorios.

- Respuesta 4: El universo y cualquier fenómeno en él, sea cual sea su escala, son procesos en los que inevitablemente interviene el azar, como lo evidencian, por ejemplo, los fenómenos que estudia la mecánica cuántica, la evolución de las especies y la historia del universo mismo; por tanto, el planteamiento determinista de cualquier fenómeno, si acaso resulta posible, no es más que una aproximación imperfecta a la verdadera naturaleza de las cosas.

Las cuatro respuestas anteriores, y cualesquiera otras que puedan darse a la pregunta sobre lo cierto o incierto del mundo, finalmente se reducen a dos posiciones o escuelas de pensamiento opuestas: el determinismo y el indeterminismo. El determinismo considera que, aunque tome mucho tiempo, en principio es posible reunir suficiente conocimiento o información sobre cualquier fenómeno para que toda proposición acerca de él pueda ser clasificada como verdadera o como falsa; en otras palabras, el determinismo asume que es viable eliminar toda duda sobre la veracidad de cualquier aseveración. Por su parte, el indeterminismo sostiene que en cada proposición hay un grado último de incertidumbre que es imposible reducir o eliminar; esto es, que existe una barrera infranqueable al conocimiento, impuesta por la naturaleza intrínsecamente indeterminada de las cosas, lo que impide conocerlas con absoluta certeza; una manera de expresar esta convicción científica es el

principio de incertidumbre de Heisenberg, según el cual nuestro conocimiento de la materia no puede detallar el estado o el comportamiento de las partículas que la constituyen, sino apenas el estado o comportamiento medio de grandes agregados de ellas.

Una conclusión fatal se desprende de todo esto: sea porque el universo y sus partes tengan naturaleza intrínsecamente incierta, o porque resulte impráctico reunir toda la información necesaria para un tratamiento determinista, debemos aceptar la incertidumbre como un hecho insuperable y tomarla en cuenta expresamente en nuestros planteamientos y decisiones. A mayor abundamiento, fuera del ámbito controlado de los experimentos de laboratorio que la ciencia usa como método de indagación, es imposible evitar la aparición de cambios inesperados en el entorno natural o social de cualquier situación práctica, y esto es suficiente para frustrar la posibilidad de predecir con certeza. Por eso sólo la ciencia, cuyo enfoque reduccionista hace legítimo estudiar porciones de la realidad convenientemente aisladas de perturbaciones externas, puede optar con libertad indiferencia por el determinismo o el indeterminismo, como lo han hecho indistinta y libremente los integrantes de la comunidad científica. Cualquier otra actividad, y en particular la ingeniería, aborda problemas que están sujetos no sólo a lo aleatorio de los fenómenos del mundo físico, sino también a la enorme incertidumbre de sus componentes sociales, derivada del libre albedrío de los seres humanos, cuyas decisiones futuras es imposible prever con certeza.

Al observar la historia de la ciencia después de Einstein, un ingeniero no puede evitar la siguiente conjetura: quizá para los científicos que optan por el determinismo éste tenga un atractivo casi místico, derivado de que permite mantener vivo y en manos de la ciencia el reto formidable de vencer la barrera que separa a la humanidad del conocimiento cierto; tal fue precisamente el desafío que Einstein aceptó hasta el fin de sus días, desde que pronunció su famosa sentencia de fe determinista: "Dios no juega a los dados". El reto, sin embargo, resultó insuperable aun para la mente de ese

hombre sin par. La comunidad científica sabe muy bien que, finalmente, optar por el indeterminismo implica dejar que el asunto salga del territorio de la ciencia y pase al de la filosofía, con lo que cambia la naturaleza misma del problema. En el dominio de la ciencia la pregunta pertinente es qué queda por descubrir para alcanzar el conocimiento absolutamente cierto; en la filosofía es más bien si lo alcanzaremos o no y por qué.

Actividades como la ingeniería y la medicina no pueden sino afiliarse al indeterminismo, pues están sujetas tanto a lo aleatorio del mundo físico como a la enorme incertidumbre derivada del libre albedrío de los seres humanos, del que depende en gran medida el comportamiento de los sistemas con los que aquellas profesiones lidian. Resulta imposible, por ejemplo, prever con certeza cuán diferentes de las de diseño serán las condiciones objetivas, sobre todo sociales, que priven durante la vida útil de las obras y artefactos que el ingeniero diseña; incluso cuando éste usa formulaciones deterministas, en realidad se pregunta cómo irán a proceder en el futuro los usuarios de sus creaciones, y él mismo se responde apenas mediante una hipótesis apoyada en su juicio profesional. Igualmente incierto es el estado futuro de la salud de un paciente según su voluntad de seguir o no ciertas prescripciones médicas.

### **3. LA INCERTIDUMBRE SUBJETIVA**

Existe otro tipo de incertidumbre, además del derivado de la naturaleza del mundo. En efecto, si lo consideramos cuidadosamente, todo lo que creemos saber o conocer tiene cierto carácter elusivo, sin importar que las cosas sean o no inciertas en sí mismas. Lo que en general llamamos hechos, incluyendo los hechos científicos, no son la realidad, pues no constituyen entidades concretas externas a la mente, sino modelos abstractos (modelos mentales) de la realidad. Esto es así porque percibimos la realidad a través de nuestros sentidos, que no son absolutamente fieles ni infinitamente sensibles y suelen ser interferidos o condicionados por nuestra imaginación y otros fenómenos psicológicos. Más aún, los hechos que extraemos de la observación y la experimentación resultan de sutiles interpolaciones, extrapolaciones, inferencias o hipótesis (por ejemplo, el supuesto de que los instrumentos con que observamos o medimos se comportan con cierta regularidad). No son, pues, idénticos los hechos y la realidad.

Podemos concluir que, si la realidad es incierta, los hechos son aún más, pues en ellos se suman las incertidumbres de la naturaleza y de la observación; es decir, la incertidumbre objetiva y la del sujeto que observa. Pero si los hechos no son la realidad, ¿para qué nos sirven? ¿Qué podemos hacer con ellos? Distintos filósofos han concebido al respecto tres posiciones diferentes, generalmente antagónicas aunque a veces tienen traslapos: una es el empirismo, que no reconoce como fuente de conocimiento ni la razón ni ideas innatas, sino sólo la experiencia concreta, mientras a la vez sostiene que los hechos no son la realidad, sino sensaciones que ésta produce en el cerebro de quien la observa y, por tanto, son fenómenos subjetivos imposibles de extrapolación a otros sujetos y más aún de generalización a todos los sujetos; la antípoda del empirismo extremo es el racionalismo puro, según el cual la razón es innata o a priori y, por tanto, no sólo independiente de la experiencia, sino dato primario y absoluto del conocimiento, por lo que los hechos son nociones válidas de la realidad, abstractas, es cierto, pero por esto mismo de carácter universal, en el

sentido de los universales de Platón; finalmente está el realismo, que sostiene la existencia de una realidad externa e independiente de la mente humana pero que ésta puede conocer al menos en parte o aproximadamente mediante la experiencia. Nótese que entre cada par de esas posiciones hay (o puede haber) cierto punto de coincidencia, y que las tres consideran a la experiencia y a la razón elementos necesarios para el conocimiento.

Empero, si el empirismo o el racionalismo se llevan a sus extremos resultan irreconciliables y entonces cualquiera de dichas dos posiciones conduce a un callejón sin salida, pues un conjunto de hechos particulares no generalizables es tan inútil para fines prácticos como una colección de conceptos universales abstractos extraídos de la razón pura. Por tanto, casi todo ser humano suele adoptar, al menos tácitamente, una posición dualista o intermedia entre el empirismo y el racionalismo: asumimos que si acaso los hechos como los percibimos no constituyen la realidad (es decir, difieren de ésta en grados indeterminados) son aceptables para fines operacionales como representaciones aproximadas de ella, y que son generalizables por inducción. Esto significa que si en un número suficiente de observaciones o experimentos se reproduce el mismo hecho, éste constituye una expresión general de la realidad, sólo susceptible de desmentirse si una observación posterior la contradice. Esta ingeniosa solución tiene dos implicaciones, seamos o no conscientes de ellas: a) que el conocimiento al que arribamos siempre tiene, aparte de la indeterminación que en su caso atribuyamos a la naturaleza, un grado de incertidumbre derivado ya no del objeto de interés, sino del sujeto que se interesa en él, y b) que si bien los hechos con que trabajamos son entidades abstractas y particulares, resultan generalizables al menos provisionalmente; es decir, mientras no aparezcan otros hechos que los contradigan.

Tal posición filosófica es la de la ciencia moderna, y resulta equivalente al realismo, siempre que la realidad aludida no sea la de todo lo inteligible, sino solamente la del mundo material.

#### **4. VENTAJAS DE LA INCERTIDUMBRE**

Es evidente que la incertidumbre tiene desventajas: de inmediato percibimos que contribuye a nuestra infelicidad porque lo incierto del conocimiento hace más problemática la toma de decisiones, y a veces la vuelve psicológicamente dolorosa; por tanto, hace más complejo resolver cualquier problema. Además, y sobre todo, cuando los errores de predicción pueden acarrear consecuencias muy graves, la incertidumbre nos hace incurrir en grandes riesgos. Por otra parte, aunque no es obvio, también es verdad que la incertidumbre tiene ventajas. He aquí algunas de ellas:

1. En un mundo incierto toda persona tiene alguna probabilidad de éxito, aunque sea por azar. Si el mundo fuera determinado y todos procediéramos con absoluta certeza, los menos inteligentes pasarían a no tener posibilidad alguna de éxito; tal fatalidad bastaría para que la vida resultara intolerable para esos individuos a la vez que volvería terrible la convivencia social.

2. La esperanza no existiría en un mundo determinista, pues la tenemos gracias a que no sabemos con certeza lo que el futuro nos depara.

Tampoco habría desafíos si pudiéramos predecir el futuro. Sería tanto como vivir nuestras vidas sabiendo de memoria en qué preciso instante va a ocurrir cada uno de los acontecimientos que nos interesan; por supuesto, la espera de los momentos más ingratos nos volvería dementes.

3. Si no hubiera incertidumbre acerca de las consecuencias de nuestro comportamiento, no habría libre albedrío, pues el futuro estaría absolutamente determinado por el pasado y, en consecuencia, no habría nada que decidir; es precisamente la incertidumbre la que nos obliga a sopesar con cuidado las probables consecuencias futuras de nuestras decisiones; porque hay incertidumbre es que tenemos derecho a escoger libremente lo que hacemos, y por lo mismo tenemos obligación de asumir sus consecuencias: en un mundo cierto la ética carecería de sentido.

Así es como el indeterminismo nos plantea una paradoja cada vez que vamos a tomar una decisión: deseamos fervientemente la certeza y nos esforzamos por reducir la incertidumbre, pero nadie querría conscientemente eliminarla del todo, pues un mundo determinista sería horripilante.

## 5. MANEJO DE LA INCERTIDUMBRE EN INGENIERÍA

Las obras y artefactos que la ingeniería concibe y realiza son diseñados para funcionar bajo condiciones y eventos que son inciertos principalmente porque ocurrirán en el futuro. Por tanto, no se puede afirmar que tales obras y artefactos son absolutamente seguros, y esto, como es natural, inquieta a los usuarios. Supongo que a estas alturas el lector habrá sacado de lo dicho en el presente capítulo el siguiente corolario: la seguridad absoluta de cualquier cosa, sea obra de la ingeniería o de otra actividad, es simplemente imposible. Si el corolario no se acepta, no hay nada que hacer, excepto repetir de modo más convincente lo hasta aquí dicho; en cambio, si se reconoce que lo absolutamente seguro es inasequible, cualquier producto ingenieril se podrá diseñar de modo que su seguridad sea tan alta como se desee; es decir, su probabilidad de falla tan baja cuanto se quiera, aunque a costo creciente. En efecto, si se plantean de modo explícito diversos niveles de seguridad y sus correspondientes costos, será posible que el ingeniero, su cliente y la sociedad adopten conjuntamente aquel que resulte satisfactorio para todos; la opinión que menos pese en tal decisión ha de ser la del ingeniero, pero es él quien debe plantear el problema en términos inteligibles por todos; el cliente sería el siguiente actor con más peso, y es quien normalmente propone una decisión, aunque ésta finalmente ha de ser compatible con el sentir general para ser sancionada por la sociedad.

El primer paso para poder lidiar con la incertidumbre es, pues, reconocer abiertamente que existe: aceptar que nuestro conocimiento de la realidad es imperfecto y que para contender con ello no importa que las imperfecciones provengan de la incertidumbre propia de la naturaleza, de la imposibilidad circunstancial de reunir toda la información necesaria para eliminarla, de la falibilidad y limitaciones de nuestros sentidos e instrumentos, o de todo ello junto.

Para enfrentar racionalmente lo incierto siempre es útil formular los problemas de ingeniería en términos expresamente probabilistas, pero en dos casos esto es indispensable: cuando intervienen variables con muy grande incertidumbre (pues entonces es más incierta la probabilidad de falla) y cuando la falla es capaz de producir pérdidas muy graves o cuantiosas aunque la probabilidad de falla sea pequeña o moderada. Una mejor manera de decir lo mismo es que ameritan tratamiento probabilista las cuestiones que implican mayor riesgo según este término se define en ingeniería; esto es, como el producto de la probabilidad de falla por la cuantía de las consecuencias de la falta. Dos ejemplos: a) tanto los sismos como el peso propio de las edificaciones pueden producir una falla, pero como las cargas sísmicas son más inciertas, es más frecuente la formulación probabilista del diseño sísmico y no del diseño bajo peso propio; b) las condiciones de operación a que estarán sujetos artefactos de tipo muy variado, desde electrodomésticos hasta aviones, son casi todas muy inciertas, pero las consecuencias de las fallas son muy superiores en aviones; por tanto, la formulación probabilista del diseño de éstos es muchísimo más usual que el de electrodomésticos y también más frecuente que en edificaciones sujetas a riesgo sísmico.



Grosso modo, prevalecen tres maneras de resolver un problema de ingeniería, una vez aceptado que al menos algunas de las variables que en él intervienen deben asumirse expresamente como inciertas:

1. El uso formal de la teoría de probabilidades; esto es, de los métodos matemáticos que permiten calcular la probabilidad de que ocurra cierto evento a partir de las probabilidades conocidas de otros eventos asociados al primero.

2. La aplicación de métodos que aceptan la incertidumbre y la necesidad de hacerla explícita pero no la expresan de manera cuantitativa, sino con términos cualitativos como alta, media, baja, ni la procesan mediante la teoría de probabilidades, sino con procedimientos más o menos intuitivos y arbitrarios.

3. La aplicación del juicio profesional a secas.

Cada uno de dichos enfoques tiene sus adeptos y cualesquiera de los tres puede conducir indistintamente a decisiones sensatas o a graves errores, dependiendo de quién lo usa.<sup>109</sup> No obstante, en generales el método más riesgoso es el señalado en segundo lugar, pues si bien por un lado da la impresión de permitir una evaluación formal del problema, por otro no ofrece garantía alguna de racionalidad, esto es, de ausencia de contradicciones, lo que hace del resultado final algo no sólo incierto sino de dudoso significado; métodos de este tipo pueden servir en algunos casos para hacer una primera selección de las cuestiones y variables que luego deben someterse al método formal y cuantitativo del cálculo de probabilidades, pero en muchos casos su uso no parece tener otro propósito que eludir este último modo de proceder.

El método probabilista formal ofrece la ventaja de garantizar que, salvo error, no habrá contradicción o arbitrariedad en el procesamiento de las medidas cuantitativas de la incertidumbre. El objetivo de la teoría de probabilidades es precisamente dar las reglas aritméticas para pasar de los valores de la probabilidad de eventos simples (que por ello son valores más fácilmente asequibles) a la probabilidad de eventos más complejos, que dependen de los primeros y cuya probabilidad es más arriesgado estimar directamente. Ninguno de los otros dos métodos proporciona un enfoque más confiable para determinar la probabilidad de eventos complejos.

Si el ingeniero tiene experiencia personal en el tipo de problema de que se trata, el método basado en el puro juicio profesional es el segundo mejor, sobre todo si ese juicio profesional se ha formado de la manera referida en el capítulo iv. La aplicación del juicio profesional al manejo de la incertidumbre en ingeniería tiene las siguientes dos vertientes:

1. Para problemas ordinarios (aquellos sobre los que hay amplia experiencia en la profesión), el ingeniero usa los factores de seguridad, los criterios de diseño y otros procedimientos que se han ido decantando de modo natural en la práctica local o internacional hasta alcanzar consenso casi general. La justificación de este proceder reside en el hecho de que tales factores, criterios y procedimientos son los que han demostrado empíricamente ser satisfactorios ante las incertidumbres típicas de la mayoría de los casos que el ingeniero encuentra día a día y, por tanto, expresan el juicio no de uno, sino de casi todos los miembros de la respectiva profesión.

2. Para casos no comunes (los que están fuera de la tipología o de los límites en que han sido suficientemente probados los referidos factores,

---

<sup>109</sup> 1 Exposiciones extensas de cada uno de los tres enfoques indicados y ejemplos de su aplicación pueden hallarse en las siguientes referencias. Del enfoque 1: J. R. Benjamin y C. A. Cornell, *Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers*, McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1970, 684 pp.; del enfoque 2: N. G. Smith (ed.), *Appraisal, Risk, and Uncertainty*, Construction Management Series, Thomas Telford Ltd., Londres, 2003, 132 pp., y del enfoque 3: A. Casagrande, "Role of 'calculated risk' in earthwork and foundation engineering" *Proceedings, American Society of Civil Engineers*, vol. 91, SM 4, julio de 1965, pp. 1-40.

criterios y procedimientos), el ingeniero debe poner en juego llanamente su propio juicio profesional, asegurándose de que éste corresponde a las características y circunstancias del problema en cuestión.<sup>110</sup>

---

<sup>110</sup>La manera como un buen ingeniero pone en juego en estos casos su juicio profesional ha sido descrita con gran maestría por Arthur Casagrande en la tercera referencia citada en la nota anterior.

## 6. USO DE LA TEORÍA DE PROBABILIDADES

Usar la teoría de probabilidades implica ver los acontecimientos inciertos que interesan como si fueran experimentos cuyos resultados posibles podemos imaginar pero no sabemos con certeza cuál de ellos efectivamente se materializará. A cada uno de los posibles resultados se le llama evento; al conjunto de todos ellos, espacio o campo del experimento. Definido el campo del experimento y los eventos que lo constituyen, el siguiente paso es asignar una medida cuantitativa al grado de incertidumbre que tenemos sobre la ocurrencia de cada evento; a esa medida del grado de incertidumbre se le llama probabilidad. Por ejemplo, si el experimento consiste en tirar un dado, los eventos posibles son los números del 1 al 6 y el campo del experimento es el conjunto de dichos números.

La probabilidad de un evento es un número que puede variar de cero a uno y que representa una de dos cosas: a) la frecuencia relativa con que el evento ocurre si acaso tenemos antecedentes de él en los que hayamos hecho observaciones reiteradas y éstas hayan revelado cierta regularidad, o bien b) nuestro grado de convicción subjetiva de que el evento efectivamente ocurrirá. Si nuestra convicción es plena o el evento ocurre siempre que se da el experimento, la probabilidad que le corresponde es uno y decimos que se trata de un evento cierto; si nuestra convicción es nula; es decir, estamos seguros de que el evento no ocurrirá, o bien nunca ha ocurrido en repetidos experimentos, la probabilidad que debemos asignarle es cero y se dice que el evento es imposible. Cualquier probabilidad mayor que 0.5 significa que confiamos más en la ocurrencia que en la no ocurrencia del evento, y viceversa. Asignar probabilidad de 0.5 a un evento discreto equivale a decir que tenemos acerca de él la máxima incertidumbre, pues consideramos igualmente probable que ocurra o que no; por el contrario, manifestamos mayor certeza cuanto más cercana a los valores extremos cero o uno es la probabilidad, y absoluta certeza si la probabilidad asignada es precisamente cero o uno.

Si lo que enfrentamos no es un evento discreto (que simplemente ocurre o no, como la aparición de cierto número en una tirada de dados o como el evento lluvia-no lluvia), sino una variable continua (que puede adquirir cualquier valor en cierto intervalo, como la precipitación pluvial en un día en cierto sitio, o como la temperatura máxima anual en una fecha y localidad), entonces la incertidumbre ya no puede caracterizarse mediante un solo número o una sola probabilidad, sino con una serie de  $n$  números llamada distribución de probabilidad de la variable. Para especificar la distribución de probabilidad subdividimos el intervalo completo de valores posibles de dicha variable en  $n$  subintervalos (iguales o no) y determinamos la probabilidad de que la variable caiga dentro de cada uno de tales subintervalos. La serie de  $n$  números resultante es la distribución de probabilidad (figura xiv.i). Cuanto mayor sea  $n$ , con más precisión estaremos describiendo la distribución de probabilidad de la variable. Así pues, una variable aleatoria continua equivale a una serie de  $n$  eventos aleatorios discretos; la suma de las probabilidades de tal serie es, por supuesto, siempre igual a 1, pues representa la probabilidad de que la variable tenga cualquier valor dentro del campo del experimento; es decir, cualquier valor posible, y esto es absolutamente seguro; por tanto, la probabilidad es la de un evento cierto

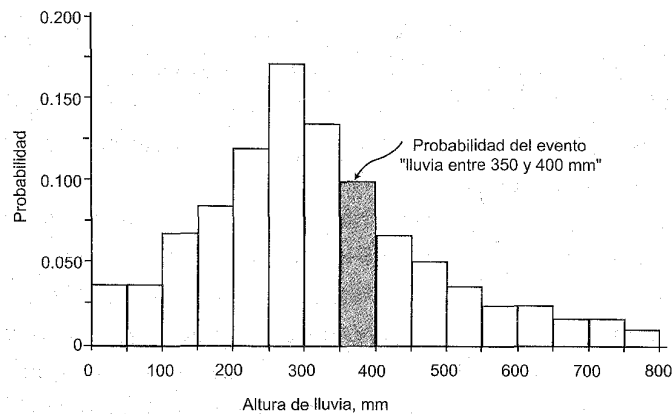


FIGURA XIV.1. *Distribución de probabilidad de la lluvia anual en un sitio.*

Para poder aplicar la teoría de probabilidades el ingeniero debe, primero, identificar los eventos y variables más básicos que intervienen en el fenómeno que estudia. Luego, tiene que asignar a los eventos una probabilidad y a las variables una distribución de probabilidad. Hecho eso, no tiene más que aplicar las reglas aritméticas que la propia teoría de probabilidades aporta para calcular, a partir de las probabilidades de los eventos básicos, la de cualquier otro evento o variable que dependa de aquéllos.

Al asignar probabilidades a eventos y variables básicos debemos estar conscientes de que suele haber sesgos personales que inducen a subestimar o bien a exagerar la incertidumbre. El sesgo más frecuente es el del primer tipo, que si es muy fuerte casi equivale a negar la incertidumbre. Este tipo de sesgo consiste en estar más seguro de lo debido acerca de la ocurrencia o no ocurrencia de un evento y, consecuentemente, asignar a éste una probabilidad muy cercana a cualquiera de los extremos cero o uno, o bien en asignar a variables continuas una distribución de probabilidad muy concentrada cerca del valor medio (es decir, distribuciones muy estrechas o con poca dispersión). El sesgo de este tipo es comprensible en vista de lo que Locke llamó la necesidad de certeza del ser humano; se dice que casi equivale a negar la incertidumbre porque denota una confianza exagerada en que lo que se sabe es cierto; a veces esta excesiva confianza proviene de sobrevalorar la capacidad de predicción de una teoría determinista. Por su parte, el segundo tipo de sesgo, consistente en exagerar la incertidumbre, suele darse más entre quienes acaban de cobrar conciencia de que ésta existe, por lo que buscan indicios de ella con demasiado afán, y cuando los hallan les dan más peso que a los indicios contrarios. En consecuencia, tienden a suponer, para eventos discretos, incertidumbres cercanas a la máxima; esto es, probabilidades próximas a 0.5, o bien, para variables continuas, distribuciones de probabilidad muy planas (uniformes) a lo largo de todo el intervalo de valores posibles.

Decíamos que el cálculo de probabilidades permite estimar cuán probable es un evento complejo mediante sencillas operaciones aritméticas con las probabilidades de los eventos más simples que determinan la ocurrencia del primero. Por ejemplo, si se tiene confianza en que cierto puente de ferrocarril es capaz de soportar satisfactoriamente las solicitaciones para las que expresamente fue diseñado (digamos, cierta

magnitud de avenida en el río y cierta carga del ferrocarril) pero se cree que tales sollicitaciones pueden excederse, interesará calcular cuál es la probabilidad de que el puente falle, Es obvio que para tal falla sería necesario que ocurriera al menos uno de los siguientes eventos:

Evento A: Avenida en el río mayor que la de diseño.

Evento B: Carga del ferrocarril mayor que la de diseño.

Las probabilidades de los eventos A y B dependen, respectivamente, de la distribución de probabilidad de las variables aleatorias avenida en el río y carga del ferrocarril, que se pueden estimar, en el primer caso, mediante los registros de avenidas del pasado de las que se disponga, y en el segundo similarmente de los registros de carga de los trenes que se prevé pasarán por el puente. Conocidas tales distribuciones de probabilidad, inmediatamente podemos determinar cuál es la probabilidad de los eventos A y B arriba indicados; es decir, la de que cada una de esas variables exceda el correspondiente valor de diseño, a la que llamaremos respectivamente probabilidad de A,  $P(A)$ , y probabilidad de B,  $P(B)$ .

La eventualidad de que el puente falle está dada por la probabilidad de que ocurra uno cualquiera de los eventos A o B, que denotamos  $P(A \cup B)$ , y la teoría de probabilidades nos dice que dicha probabilidad está dada por la fórmula  $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A)P(B)$ . Esta ecuación se puede interpretar intuitivamente como sigue: si A y B fueran eventos mutuamente excluyentes; es decir, no pudieran ocurrir sino uno u otro,  $P(A \cup B)$  sería obviamente igual a la suma  $P(A) + P(B)$ ; pero A y B no son mutuamente excluyentes, sino que pueden traslaparse; esto es, ocurrir a la vez una avenida y una carga superiores a las de diseño; por tanto, la probabilidad de que sucedan A o B no es simplemente la suma de las probabilidades  $P(A)$  y  $P(B)$ , sino que a dicha suma debe restarse una cantidad que represente la probabilidad de traslapo de ambos eventos a fin de que tal probabilidad de ocurrencia de la unión de A y B no se duplique; el término sustractivo de la fórmula es precisamente tal cantidad, igual al producto de las probabilidades de A y de B en vista de que ambos eventos son independientes (es decir, no tienen entre sí relación causal alguna). Si, por ejemplo,  $P(A) = P(B) = 0.001$ , entonces la probabilidad de que el puente falle es  $P(A \cup B) = 0.001 + 0.001 - 0.001 \times 0.001 = 0.001999$  0.002, lo que nos deja una lección práctica muy útil: cuando  $P(A)$  y  $P(B)$  son pequeñas el término sustractivo de la fórmula es muchísimo más pequeño que ambas y puede despreciarse. Dada esta regla, no necesitamos saber más que la definición de probabilidad dada en párrafos previos y la fórmula de sentido común  $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$  para resolver problemas como el anterior.

Al acto de identificar, como en el ejemplo anterior, los eventos básicos de los que depende un acontecimiento aleatorio más complejo, se le llama decomposición. Si los eventos básicos resultantes son tales que podemos definir sus respectivas probabilidades con base en la información disponible, o bien nuestro juicio profesional es capaz de asignar dichas probabilidades, la decomposición habrá sido exitosa, y entonces podremos calcular la probabilidad del evento que finalmente interesa (en el ejemplo la probabilidad de falla del puente).

Ahora bien, cabe señalar que las probabilidades de los eventos básicos en realidad no se calculan, sino se asignan, sea para ello tomemos como guía cierta información sobre lo observado en el pasado (como en el ejemplo previo), o que por cualquier otra causa tengamos una convicción subjetiva de que la posibilidad de ocurrencia de los eventos es tal o cual. Aunque hay procedimientos racionales para hacer tal asignación, el lino de ella finalmente depende sobre todo del juicio profesional de quien la hace. Esto implica que las probabilidades de los eventos o variables básicas con

que se trabaja en actividades prácticas como la ingeniería siempre tienen cierto carácter subjetivo. Podría preguntarse entonces ¿por qué aplicar el juicio profesional a la asignación subjetiva de probabilidad a los eventos básicos y no en forma más directa al evento que finalmente nos atañe? La respuesta es muy obvia: la confiabilidad del juicio profesional, según vimos en el capítulo iv, depende de la experiencia e información del ingeniero acerca de por qué y cómo ocurre el fenómeno de que se trata y cuán aproximada o burdamente suelen predecirlo las teorías o reglas empíricas aplicables. Es claro que en general se tendrá información y experiencia mayores y más confiables sobre fenómenos sencillos que sobre otros más complejos. Por esta razón, el tino de la decomposición se mide por el grado de comodidad que el ingeniero siente al asignar probabilidades a los eventos básicos, y esa comodidad siempre es mayor que si tuviera que asignar de modo directo una probabilidad al evento complejo. Finalmente, esto ilustra con toda nitidez la diferencia que hay entre enfrentar la incertidumbre apoyándose en la teoría de la probabilidad o encararla mediante el juicio profesional a secas.

En un contexto de incertidumbre, además de su potencial para plantear y resolver racionalmente problemas, la teoría de la probabilidad también es muy útil para facilitar la comunicación entre el profesional de la ingeniería y sus interlocutores legos en la materia (clientes, autoridades, representantes sociales, etc.) y, por tanto, propicia la necesaria colaboración de uno y otros. Supongamos que hay indicios de que un edificio en operación tiene deficiencias o daños estructurales que pueden poner en riesgo su integridad y la vida de los ocupantes. El ingeniero a quien el dueño encomienda el asunto procede a diagnosticar el problema y a diseñar posibles soluciones, y llega finalmente a dos opciones que debe someter al cliente para su decisión. La primera (solución A) tiene costo de inversión alto, no requiere suspender la operación del edificio y el ingeniero tiene gran confianza en que es viable y sería exitosa; la segunda (solución B) tiene costo de inversión mucho menor, y el ingeniero estima que la posibilidad de llevarla a cabo podría ensayarse pero no está asegurada, además de que exigiría suspender la ocupación del edificio durante su ejecución; también considera que esta segunda opción puede probarse tentativa- mente y, si no resulta exitosa, se podrá volver a la solución A. Planteado el problema en estos términos, conceptualmente muy claros pero vagos en lo cuantitativo, quizá el ingeniero podría decidir, mediante su juicio profesional, cuál de las dos opciones es preferible, pero sería muy difícil que en tales condiciones el cliente participara efectivamente en la decisión como sería deseable. En cambio, esta participación sería viable si el ingeniero hiciera un esfuerzo, muy a su alcance, para precisar el planteamiento anterior asignándole las medidas cuantitativas necesarias. Supongamos que lo hace y resulta lo siguiente:

- Solución A
- Costo de ejecución = C
- Costo económico de suspenderla ocupación del edificio O
- Probabilidad de buen éxito = 1
- Solución B
- Costo de ejecución = 0.33 C
- Costo económico de suspender la ocupación del edificio = 0.25C
- Probabilidad de buen éxito 0.6 (por tanto, probabilidad de tener que acudir a la solución A = 0.4).



Podría entonces compararse el costo esperado de ambas soluciones y escoger la menos onerosa. Así, ambas partes quedarían más satisfechas: el cliente comprendería más cabalmente por qué se adopta esa solución y no tendría que confiar a ciegas en lo que el ingeniero sugiera; por su parte, el ingeniero tendría un argumento más convincente que el simple recurso de su juicio profesional para justificar la solución. En efecto, de los datos anteriores se desprende que:

- Costo de A = C
- Costo de B = {[costo de ejecución] + [costo económico de suspender la operación] + [probabilidad de tener que acudir a la solución A] x [costo de la solución A]} = 0.33 C + 0.25 C + 0.4 C = 0.98 C.

Es claro que la opción B tiene menor costo, pero la diferencia con respecto a la A es de sólo 2%. Esto puede despertar en el cliente cierta inquietud sobre la confiabilidad del resultado y motivarlo a entrar más a fondo en la cuestión, lo que siempre es deseable dado que la función de la ingeniería es resolver no los problemas del ingeniero, sino los de los demás. Puede inquirir entonces sobre el grado de incertidumbre de los costos relativos de cada opción, pues se percata de que bastaría con que los costos de A bajaran 2% o los de B subieran aproximadamente en la misma proporción para que esta última solución ya no fuera la más barata, etc. Más aún, se le podría ocurrir que en el costo de B no está incluido algo que para él es muy importante: el costo subjetivo derivado de la pérdida de imagen, de prestigio o simplemente de tranquilidad personal a causa de poner su inmueble fuera de servicio mientras se intenta la solución B. Si esa fuera su inquietud, el ingeniero podría proponer tomarla en cuenta y sugeriría que el propio cliente valorara ese costo comparándolo, por ejemplo, con cualquiera de los otros incluidos en el planteamiento, o bien que le asignara directamente un precio a su pérdida de imagen, prestigio o tranquilidad personales. Es evidente que si tal precio fuese mayor que 0.02 C y todo lo demás permaneciera igual, A pasaría a ser la solución preferible. Estas y otras posibilidades de evaluación conjunta del problema entre el ingeniero y su cliente se abren por el sólo hecho de hacer el planteamiento en términos probabilistas formales y cuantitativos, y no existirían si todo se limita a manejar la incertidumbre con el puro juicio profesional.

Nótese que para abordar los dos ejemplos cuantitativos anteriores fue suficiente conocer tres sencillos axiomas, los dos primeros de ellos ya explicados: a) que la probabilidad es un número entre cero y uno; b) que la probabilidad de un evento cierto es uno, y c) que la probabilidad de que ocurra uno cualquiera de dos eventos mutuamente excluyentes es igual a la suma de sus respectivas probabilidades, cosa que es de sentido común.

No cabe entrar aquí con más detalle en la teoría de la probabilidad, pues los fines de este texto no son operativos sino conceptuales. Valgan los dos ejemplos anteriores, aunque muy elementales, como ilustración del valor de tal teoría como medio para clarificar y luego resolver y comunicar los problemas prácticos derivados de la incertidumbre. Por lo demás, los mismos ejemplos dan un atisbo de lo que Pascal (gran artífice de la formulación de la teoría de la probabilidad) quería decir cuando, según se expuso en el capítulo vii, abogaba por que al resolver problemas se usara no solamente el juicio o la intuición, sino las matemáticas, cuyos “principios son Pocos, muy sencillos [...], y tan claros que es imposible que se nos escapen. . .” A este respecto puede afirmarse que para resolver la mayor parte de los problemas probabilistas relativos a eventos discretos basta con conocer los siguientes pocos principios de la teoría de la probabilidad: a) los tres sencillos axiomas indicados en el párrafo anterior; b) una definición (la de probabilidad condicional), y c) tres teoremas (el de probabilidad total, el

de Bayes y el binomial). Lo indicado en b) y c) puede encontrarse en cualquier libro elemental de probabilidades.

No obstante, también debe decirse que, si bien son pocos y sencillos los que Pascal llamaba “principios básicos” de la teoría de probabilidades, la capacidad de aplicarlos atinadamente no se logra sino después de cierto entrenamiento. Pero aun dando el peso debido a este requisito, la teoría de la probabilidad es preferible a cualquier otro procedimiento cualitativo o heurístico para resolver problemas cuando la incertidumbre es insoslayable. Hay libros excelentes en los que se pueden estudiar tanto los principios básicos como las aplicaciones de la teoría de probabilidades a la ingeniería. Además, hay métodos aproximados que permiten simplificar el tratamiento de algunos de los problemas más engorrosos de dicha teoría.<sup>111</sup>

## ***XV. Las fallas en ingeniería***

### **1. LOS LÍMITES DE LA SEGURIDAD**

Toda actividad práctica se basa en el conocimiento disponible y éste es siempre incierto por dos causas: a) porque los medios y métodos mediante los cuales adquirimos conocimiento no dan seguridad absoluta sobre la validez de éste, y b) porque el mundo en que vivimos es en sí mismo incierto. Se trata de dos causas insuperables, y de hecho excesivas, pues cualquiera de ellas basta por sí misma para impedir que lo que hacemos tenga éxito asegurado de antemano. Si estamos dispuestos a pagar un costo creciente, podremos ir reduciendo a niveles cada vez más pequeños la probabilidad de falla de lo que diseñamos, pero nunca podremos hacerla rigurosamente nula.

La actitud humana ante la incertidumbre es normalmente de incomodidad o de rechazo, que en ingeniería, en algunas circunstancias, pueden ser intensos. Suele aceptarse que un médico proponga a su paciente, en vez de una prescripción categórica, dos o más opciones de tratamiento con el pro y el contra respectivo; a veces el paciente e incluso el propio médico buscan una segunda opinión de otro profesional de la medicina con experiencia y conocimiento distintos. Esto denota a las claras que en ese campo se acepta tanto la imperfección del conocimiento como el papel del juicio profesional para lidiar con ella. En cambio, hay quienes creen que la ingeniería ha de resolver sus problemas con absoluta objetividad y con conocimiento perfectamente cierto, como su carecer de certeza en esta profesión equivaliera a incumplir una obligación. Mostrar por que esta imagen popular de la ingeniería es ilusoria ha sido uno de los propósitos de este libro.

En los capítulos vii y xiv se han expuesto con amplitud las causas responsables de la incertidumbre. Por un lado, se explicó que el conocimiento, sea científico o empírico, además de estar sujeto a errores aleatorios de observación, siempre proviene (le un proceso lógico llamado inducción, incapaz de asegurar que sus conclusiones son absolutamente veraces; por inducción sólo se puede inferir que una relación causa-efecto probablemente es cierta dado que se ha verificado repetidamente en una serie de casos particulares; la probabilidad de que efectivamente lo sea será mayor cuanto más grande sea el número de casos en que se ha verificado, pero siempre queda abierta la posibilidad de que, si se sigue repitiendo el

---

<sup>111</sup> J. R. Benjamin y C. A. Corneil, *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*, McGraw-Hill, Nueva York, 1970, 684 pp.; A. Ang y W. Tang, *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, vols. 1 y 11, j. Wiley, Nueva York, 1984.  
4E. Rosenblueth, “Estimaciones bipuntuales en probabilidades” *Series del Instituto de Ingeniería*, núm. 464, México, 1983, 26 pp.

experimento, alguna vez la relación no se cumpla. Por otra parte, se explicó también que hay fenómenos inherentemente aleatorios; algunos de ellos se deben al carácter probabilista de la materia, cuyo comportamiento a la escala de sus partículas elementales nunca puede conocerse con certeza y, por tanto, las propiedades de una porción macroscópica de ella constituyen sólo una estimación estadística; otros, como los fenómenos meteorológicos, deben su carácter aleatorio a su complejidad dinámica. Finalmente hay fenómenos que, pese a ser en principio deterministas, dependen de tan numerosas variables incontroladas que es más sencillo tratarlos como aleatorios para fines prácticos. Cada una de estas causas impide confiar de modo absoluto en nuestra capacidad de predecir el comportamiento del mundo físico.

En consecuencia, es inevitable que cualquier obra de ingeniería tenga una probabilidad finita de falla, incluso si ningún error se comete al diseñarla, construirla, fabricarla y operarla. Para muchos, este hecho es tan inquietante y difícil de comprender que resulta inaceptable; se comprende que así sea en virtud de que el ser humano busca la certidumbre a toda costa, según el postulado de Locke citado en el capítulo iv. Por ejemplo, si alguien se entera de que la probabilidad de morir por derrumbe de su habitación es de uno en 10 millones, en vez de asumir esta información tal cual es, preferirá suponer que esa pequeña probabilidad indica que no hay riesgo alguno, o bien se inquietará por el peligro que corre, pese a que morir por causas a las de ordinario estamos expuestos es como mil veces más probable.

La incertidumbre es como una gradación continua de grises que los humanos siempre preferimos transformar caso a caso en blanco o negro. Por eso es difícil aceptar que algo cuidadosamente diseñado y construido por profesionales de la ingeniería con muchos años de capacitación y experiencia pueda fallar; en vez de aceptarlo se supone que, si falla, no es porque la seguridad absoluta sea imposible, sino por error de quien lo diseñó o construyó. Quienes así piensan suelen exigir diseños absolutamente seguros y no aceptan que esto es imposible. Desde siempre los ingenieros se han enfrentado a este problema y han ideado formas diversas tanto de resolverlo como de comunicarlo; su éxito ha sido mixto, pues la incertidumbre es intrínsecamente insuperable y su comunicación topa con la necesidad subconsciente de certeza de los seres humanos. A pesar de que los afanes del ingeniero durante el diseño tienen por objetivo central evitar que su proyecto falle, esto puede ocurrir. La causa puede ser la incertidumbre del conocimiento, de la que no hay un culpable, o, por supuesto, un error humano. La primera es inevitable; la segunda, evitable en principio, pero en la práctica siempre posible.

Es obvio que el ingeniero no desea que haya fallas y se esfuerza en evitarlas; que un diseño suyo falle le resulta catastrófico, pues él mismo es la primera víctima, aun si no ha cometido error alguno. Para la sociedad las fallas también tienen muy altos costos; pero podría resultarle más costoso que nunca ocurrieran, pues esto sería indicio de que los diseños son tan seguros que hay en ellos alguna forma de dilapidación. El ingeniero siempre tiene más motivos para diseñar sus proyectos con seguridad excesiva que a la inversa, y es la sociedad la que le fija límites. El alto costo de un proyecto es la contrapartida de la seguridad excesiva; por eso el ingeniero está obligado a buscar cierto balance entre costo y seguridad: idealmente el

diseño debe inclinarse por la seguridad hasta el punto en que el costo es tan alto que deja de justificarse... ¿ajuicio de quién? Por supuesto, a juicio de la sociedad, algunos de cuyos individuos o todos en conjunto pagan las consecuencias tanto de que la seguridad de un diseño sea excesiva como de que sea insuficiente; pagan dicho costo de sus bolsillos o con su integridad o su vida y, por tanto, presionan para que se busque dicho balance. Además del conflicto costo versus seguridad, entre los requerimientos de diseño siempre hay otras necesidades de compromiso: costo versus durabilidad versus sencillez versus velocidad versus confort versus belleza versus facilidad de mantenimiento, etc. No hay diseño alguno que sea el resultado lógico de tales requerimientos contradictorios, y todo compromiso entre éstos aumenta o disminuye la probabilidad de falla. Dado que los requerimientos del diseño se contraponen entre sí, una conciliación lógica de ellos es imposible; el diseño es más bien resultado de un compromiso teleológico o de la voluntad: la voluntad conjunta del diseñador y de la sociedad. Es un tipo de compromiso que los humanos hacemos a diario no sólo para fines de diseño, sino en todas nuestras decisiones.

En efecto, pese a que la actitud de cada individuo ante una falla puede ser distinta, la sociedad como un todo siempre ha dado indicios claros de entender que es irracional esperar diseños absolutamente seguros y, por tanto, que no se puede achacar causa culposa a cualquier falla de las que de vez en cuando ocurren en los diseños de la ingeniería. Es un valor entendido entre el diseñador y la sociedad, muchas veces tácito y otras muy explícito, que los diseños no deben ser tan seguros que encarezcan los objetos diseñados hasta volverlos inaccesibles, y que no todos los tipos de falla deben castigarse, pues los diseñadores serían entonces tan escasos y sus servicios se tornarían a tal grado onerosos que encarecerían más de lo razonable los productos de la ingeniería.

La aversión natural ante lo que causa daño nos hace inquietarnos por las fallas que de vez en cuando ocurren en las cosas diseñadas, y no sorprendernos de que sucedan tan raramente que casi no afectan las estadísticas de mortalidad. En las sociedades urbanas la tasa anual de muertes atribuibles conjuntamente a Fallas de todos los productos manufacturados, incluso plantas nucleares, aviones, automóviles, edificaciones y demás son entre 100 y 1000 veces más bajas que la tasa de mortalidad general a cualquier edad.<sup>112</sup> Es un hecho que de todos los productos de la ingeniería sólo los automóviles contribuyen en grado significativo a incrementar la tasa normal de mortalidad; pero aunque a cierto costo estos vehículos podrían diseñarse para ser más seguros, la mortalidad no se reduciría mucho, pues la mayoría de los accidentes en ellos no son atribuibles a fallas del artefacto en sí, sino a errores de los conductores y los peatones; además, el riesgo de viajar en automóvil es tan bajo en comparación con el de recorrer la misma distancia a pie o a caballo que el automóvil resulta una tecnología que más bien ha contribuido a salvar vidas. En grado aún mayor esto mismo es cierto de los aviones. De esta elemental información estadística se puede concluir que, sobre bases racionales, es impensable que la sociedad esté dispuesta a pagar mucho más por incrementar la seguridad de obras y artefactos creados por la ingeniería, dado que hacerlo no abatiría en grado significativo el riesgo de muerte o daño que por causas naturales continuamente nos acecha. El que se haya llegado a niveles de seguridad tan altos en los productos de la ingeniería (automóviles, aviones, ferrocarriles, plantas nucleares, presas, etc.) debe atribuirse a que una falla de cualquiera de ellos impresiona mucho, tanto por sus consecuencias como por su rareza.

En conclusión, saber que cualquier obra o artefacto tiene una probabilidad finita de fallar, aun si es diseñado por el mejor equipo de ingenieros, inquieta a las personas en lo individual y suele ser causa de alarma en los medios de comunicación, pero parece ser socialmente aceptable. Evidentemente tranquiliza a la sociedad el hecho estadístico de que morir como consecuencia de tales fallas sea mucho menos probable que por los riesgos naturales de la vida.

## **2. EL FACTOR DE SEGURIDAD**

Para lograr que los objetos diseñados tengan un grado de seguridad apropiado a pesar de la incertidumbre inevitable del conocimiento, la ingeniería ha inventado diversos artificios; uno de ellos es el factor de seguridad (FS), que algunos también llaman realistamente factor de

---

<sup>112</sup> D. I. Blockley, *The Nature of Structural Design and Safety*, Ellis Horwood Ltd., Chichester, Gran Bretaña, 1980, p. 26.

ignorancia. El artificio consiste en lo siguiente: si la máxima carga que puede llegar a actuar sobre cierto elemento de un proyecto es de 100 unidades, el ingeniero acostumbra diseñar tal elemento para que pueda soportar no esa carga sino una de 120, o 200, o 450, etc., según sea el grado de incertidumbre que se tenga sobre la verdadera magnitud de la carga en cuestión.<sup>113</sup> Se dice entonces que se está usando un factor de seguridad de 1.2, 2.0 o 4.5, respectivamente. El factor de seguridad es, pues, un número mayor que la unidad por el que se multiplica la carga máxima ( $C_{max}$ ) que, según los cálculos, soportará un elemento, a fin de fijar la carga  $C_d$  para la que se debe diseñar dicho elemento; es decir  $FS = C_d / C_{max}$  o,  $dis\ max, C_d = FS \cdot C_{max}$ . Si la incertidumbre es pequeña y, por tanto, creemos que  $C_{max}$  no puede exceder en más de 20% nuestro cálculo, usamos un  $FS = 1.2$ ; si creemos que  $C_{max}$  puede ser hasta 450% mayor que lo que calculamos, usamos un  $FS = 4.5$ , etcétera.

Los factores de seguridad a usar en cada caso son los que la experiencia acumulada por la profesión ha consagrado; pero en casos particulares el juicio profesional del ingeniero puede aconsejar un factor mayor (lo contrario también puede ocurrir, pero a riesgo del propio ingeniero). En la Antigüedad, los factores de seguridad eran definidos por el juicio profesional de cada ingeniero; luego fueron resultado de cierto grado de consenso informal entre los ingenieros más experimentados en cada tipo de proyecto, y finalmente han llegado a ser, para proyectos de tipos muy frecuentes o muy importantes, como las edificaciones urbanas, los puentes carreteros o ferroviarios, los aviones y las plantas nucleares, valores especificados en normas que son obligatorias en cierto territorio.

Dado que la incertidumbre existe no solamente en la magnitud de las cargas que pueden actuar sobre un elemento, sino también en la capacidad de resistencia de éste, el ejercicio del juicio profesional es más fácil si se desglosa el  $FS$  en dos factores independientes, uno que indica la incertidumbre de la carga, denominado factor de carga,  $F$ , que es mayor que la unidad y que multiplica la carga máxima calculada para convertirla en carga de diseño, y otro que indica la incertidumbre de la resistencia, denominado factor de reducción de la resistencia,  $FR$ , que es menor que la unidad y que multiplica la resistencia estimada para convertirla en resistencia de diseño. La relación entre estos nuevos factores y el antiguo  $FS$  es, obviamente,  $FS = F / FR$ .

En cualquier caso, los factores de seguridad para cada tipo de diseño están en perpetuo estado de revisión en función del grado de seguridad que exhibe el conjunto de proyectos a los que se han aplicado. Así debe ser, pues si la sociedad y el gremio de ingenieros consideran que están ocurriendo fallas con frecuencia mayor que la deseada, se justifica que los factores de seguridad respectivos se incrementen, a pesar de que esto implique un mayor costo de los proyectos hasta el límite que la propia sociedad considere aceptable. A la inversa, si en cierto tipo de proyectos jamás ha ocurrido una falla, puede inferirse que los diseños están siendo demasiado conservadores, y que sería racional reducir los factores de seguridad, y en consecuencia los costos, hasta cierto punto que no implicara riesgos inaceptables. Tal proceso continuo de revisión de los factores de seguridad puede producir oscilaciones en la seguridad cuando a

---

<sup>113</sup> El término carga puede denotar magnitudes de diversa naturaleza: toneladas si trata de carga mecánica, voltios si es intensidad de campo eléctrico, metros cúbicos por segundo si es flujo volumétrico, vehículos por hora si es flujo vehicular, etcétera.



la vez están cambiando otros aspectos del diseño. se fue el caso a fines del siglo xix, cuando ante la rápida evolución de los puentes ferroviarios, la ingeniería estructural estaba a la vez ensayando nuevos materiales y sustituyendo las reglas empíricas por métodos de análisis basados en la ciencia. Esto dio lugar a una sucesión de conservadurismo, ausencia de fallas, reducción de factores de seguridad, nuevas fallas, etc. Finalmente, conforme se pasó del diseño elástico al basado en la teoría de la plasticidad, se optó por desglosar el FS en F y FR según se indicó en el párrafo anterior.<sup>114</sup>

---

<sup>114</sup> D. I. Blockley, op. cit., pp. 98-114.

Mucho se ha hecho y puede seguirse haciendo por mejorar los criterios de diseño para fines de seguridad, por ejemplo mediante evaluaciones más refinadas del riesgo con base en la teoría de probabilidades, según se discutió en el capítulo xiv. Sin embargo, tales refinamientos seguirán siendo sólo auxiliares del juicio profesional, no sustitutos de él. Además de métodos de análisis basados cada vez más en la ciencia, en el curso del siglo xx comenzaron a incidir en los criterios de seguridad los códigos de diseño y construcción, con sus disposiciones obligatorias orientadas a homogenizar y asegurar ciertos niveles de riesgo socialmente aceptables mediante la reducción de la iniciativa y el juicio individual de los diseñadores. Aunque deseable en principio, esto se vuelve un arma de doble filo si profesionales poco experimentados siguen al pie de la letra normas que no siempre pueden interpretar.

Si bien el factor de seguridad protege de los riesgos derivados de la incertidumbre, no necesariamente un factor más alto sirve mejor a la sociedad, pues el conservadurismo tiene costos y, de hecho, empeora el diseño como un todo, aunque incrementa la seguridad de una porción del producto diseñado. Por ejemplo, en el diseño estructural de un puente o de las alas de un avión, factores de seguridad mayores que los validados por la práctica redundan en mayor peso, lo que a su vez reduce la carga útil que en ambos casos se puede soportar; por eso la optimización del diseño exige un enfoque integral y no parte por parte.

Por otro lado, debe distinguirse entre la etapa de diseño y la de revisión del comportamiento de éste. El diseño debe hacerse introduciendo factores de seguridad para acotar la probabilidad de fallas debidas a la incertidumbre. En cambio, una vez que se tiene un diseño razonablemente conservador, el análisis de su comportamiento debe ser lo más realista posible; es decir, no debe agregar supuestos conservadores. Sólo así, con hipótesis de diseño conservadoras y supuestos de análisis realistas se cumple el objetivo de cada una de esas dos facetas del trabajo del ingeniero, y puede ser que el análisis realista concluya que un diseño supuestamente conservador en realidad no lo sea y deba modificarse.

Cuán conservadores deben ser los supuestos de diseño es una cuestión que puede responderse de dos maneras. Si el tipo de proyecto de que se trata es uno del que hay abundante experiencia, lo mejor es adoptar los factores de seguridad sancionados por la práctica; es decir, aquellos que han dado lugar a diseños cuyo grado de seguridad ha sido socialmente aceptado. En cambio, si se trata de un proyecto singular o infrecuente, deben definirse expresamente las condiciones extremas que el proyecto ha de soportar. Desde luego, éstas no pueden ser las del "peor escenario", pues tal definición, aunque usual, carece de sentido: dado cualquier escenario siempre es posible hallar uno peor. Para salir de tal atasco es indispensable plantear la cuestión en términos de riesgo, definido como la probabilidad de falla multiplicada por la magnitud de las consecuencias potenciales de ella. El escenario de diseño será entonces aquel cuyo riesgo sea aceptable para la sociedad. Volveremos a la cuestión en este mismo capítulo.

Finalmente, cabe señalar que la seguridad de un proyecto depende no sólo de cómo se diseña, sino de cómo se construye o fabrica y cómo es

operado. Si en estas etapas no se cumplen todos los supuestos del diseño, puede sobrevenir una falla. Por tanto, las obligaciones del diseñador incluyen la transmisión de información e instrucciones suficientes a constructores, fabricantes, operadores o usuarios de sus productos, de modo que todos ellos procedan de acuerdo con los supuestos del diseño, y así el objeto diseñado no se salga de los márgenes de seguridad previstos.

### 3. TRASCENDENCIA DE LAS FALLAS

Hemos visto que en ingeniería, como en cualquier actividad práctica, la ocurrencia eventual de fallas es inevitable. Pero la falla de un producto diseñado costoso es siempre una catástrofe, sea por la magnitud de sus consecuencias o por la concentración de éstas en un instante; como la frecuencia de falla de los productos de la ingeniería es muy baja, la magnitud del daño podría resultar aceptable si se distribuyera a lo largo de su periodo típico de recurrencia; pero concentrada en un instante suele ser psicológicamente impresionante y a veces financieramente muy grave. Las fallas de tales productos de la ingeniería siempre tienen, pues, efectos objetivos o subjetivos muy grandes y, por tanto, el propósito central del diseño es evitarlas.

Nadie que haya cometido un error causante de una falla volverá a cometer otro igual; con alta probabilidad tampoco lo cometerá quien haya estudiado y entendido esa falla, sus causas y sus consecuencias, aunque no haya sido una experiencia propia. Por los costos futuros que evita, esta función educativa de las fallas constituye una parte del valor social que ellas tienen; pero lo más trascendente de una falla son las nuevas perspectivas que abre al conocimiento de lo antes desconocido. Por eso el interés de la sociedad y la profesión en estudiar a fondo cada falla y divulgar sus lecciones. En algunos casos, por concurrir Por otro lado, debe distinguirse entre la etapa de diseño y la de revisión del comportamiento de éste. El diseño debe hacerse introduciendo factores de seguridad para acotar la probabilidad de fallas debidas a la incertidumbre. En cambio, una vez que se tiene un diseño razonablemente conservador, el análisis de su comportamiento debe ser lo más realista posible; es decir, no debe agregar supuestos conservadores. Sólo así, con hipótesis de diseño conservadoras y supuestos de análisis realistas se cumple el objetivo de cada una de esas dos facetas del trabajo del ingeniero, y puede ser que el análisis realista concluya que un diseño supuestamente conservador en realidad no lo sea y deba modificarse.

Cuán conservadores deben ser los supuestos de diseño es una cuestión que puede responderse de dos maneras. Si el tipo de proyecto de que se trata es uno del que hay abundante experiencia, lo mejor es adoptar los factores de seguridad sancionados por la práctica; es decir, aquellos que han dado lugar a diseños cuyo grado de seguridad ha sido socialmente aceptado. En cambio, si se trata de un proyecto singular o infrecuente, deben definirse expresamente las condiciones extremas que el proyecto ha de soportar. Desde luego, éstas no pueden ser las del "peor escenario", pues tal definición, aunque usual, carece de sentido: dado cualquier escenario siempre es posible hallar uno peor. Para salir de tal atasco es indispensable plantear la cuestión en términos de riesgo, definido como la probabilidad de falla multiplicada por la magnitud de las consecuencias potenciales de ella. El escenario de diseño será entonces aquel cuyo riesgo sea aceptable para la sociedad. Volveremos a la cuestión en este mismo capítulo.

Finalmente, cabe señalar que la seguridad de un proyecto depende no sólo de cómo se diseña, sino de cómo se construye o fabrica y cómo es operado. Si en estas etapas no se cumplen todos los supuestos del diseño, puede sobrevenir una falla. Por tanto, las obligaciones del diseñador

incluyen la transmisión de información e instrucciones suficientes a constructores, fabricantes, operadores o usuarios de sus productos, de modo que todos ellos procedan de acuerdo con los supuestos del diseño, y así el objeto diseñado no se salga de los márgenes de seguridad previstos.

### 3. TRASCENDENCIA DE LAS FALLAS

Hemos visto que en ingeniería, como en cualquier actividad práctica, la ocurrencia eventual de fallas es inevitable. Pero la falla de un producto diseñado costoso es siempre una catástrofe, sea por la magnitud de sus consecuencias o por la concentración de éstas en un instante; como la frecuencia de falla de los productos de la ingeniería es muy baja, la magnitud del daño podría resultar aceptable si se distribuyera a lo largo de su periodo típico de recurrencia; pero concentrada en un instante suele ser psicológicamente impresionante y a veces financieramente muy grave. Las fallas de tales productos de la ingeniería siempre tienen, pues, efectos objetivos o subjetivos muy grandes y, por tanto, el propósito central del diseño es evitarlas.

Nadie que haya cometido un error causante de una falla volverá a cometer otro igual; con alta probabilidad tampoco lo cometerá quien haya estudiado y entendido esa falla, sus causas y sus consecuencias, aunque no haya sido una experiencia propia. Por los costos futuros que evita, esta función educativa de las fallas constituye una parte del valor social que ellas tienen; pero lo más trascendente de una falla son las nuevas perspectivas que abre al conocimiento de lo antes desconocido. Por eso el interés de la sociedad y la profesión en estudiar a fondo cada falla y divulgar sus lecciones. En algunos casos, por concurrir factores múltiples difíciles de clarificar de una vez, las fallas no sólo se siguen estudiando durante muchos años, sino que desencadenan procesos sociales muy complejos que involucran a ingenieros, científicos, gobierno y sociedad; tal es el caso de las catástrofes sísmicas, que suelen dar lugar a amplios programas de investigación, capacitación, prevención y cambios en las normas de diseño, construcción, supervisión, etcétera.<sup>115</sup>

Una sola falla enseña mucho más que muchos casos de éxito, pues éstos contribuyen poco a mejorar el diseño, en tanto que aquellas obligan a hacerlo. Ni el impecable alunizaje del primer viaje tripulado a nuestro satélite en 1969, ni los más de cien vuelos igualmente exitosos de los transbordadores espaciales han enseñado tanto como la explosión durante el ascenso del Challenger en el año 1986 o la desintegración del Columbia durante su reingreso a la atmósfera en 2003. Un hecho paradójico de la ingeniería es que las lecciones de las fallas son la base de grandes éxitos ulteriores, mientras los grandes éxitos conducen a graves fallas por cuanto aumentan más allá del límite prudente la confianza en las prácticas vigentes. En ningún campo de la ingeniería y en ninguna época ha sido esto más evidente que en el diseño y construcción de puentes durante la segunda mitad del siglo XIX y la primera del xx, que desencadenó la expansión de los ferrocarriles y el acelerado desarrollo económico de los Estados Unidos. Librar claros cada vez mayores y soportar cargas más grandes revolucionó la ingeniería civil al requerir estructuras de diseños conceptuales novedosos, métodos apropiados para el análisis de ellas, y dominio de la fabricación de materiales como el hierro y el acero. La sucesión de nuevos problemas que se plantearon entonces a los ingenieros obligó con frecuencia a extrapolar soluciones exitosas, lo que de vez en cuando terminaba en una falla, cuyo estudio descubría fenómenos

---

<sup>115</sup> D. Reséndiz, "El sismo de 1985: De lo aprendido a su puesta en práctica", conferencia inaugural, Coloquio Conmemorativo La Geotecnia a 20 Años del Sismo, Memorias, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, 2005, pp. 3-8.

desconocidos y dejaba lecciones que significaban un salto en el estado previo del saber; esto daba base a nuevos éxitos, y así sucesivamente.<sup>116</sup> Un ejemplo muy ilustrativo fue la falla en 1940 del recién inaugurado puente de Tacoma en el estado de Washington, que produjo cambios conceptuales y metodológicos trascendentales. Ninguno de los muchos y audaces puentes hasta entonces construidos había exhibido problemas aerodinámicos, aunque algunos apenas anteriores al de Tacoma tienen tal flexibilidad que sufren desplazamientos horizontales de más de un metro bajo vientos moderados, como el Golden Gate de San Francisco.<sup>117</sup> Por tanto, durante el diseño del puente de Tacoma se soslayó del todo el mecanismo que lo llevó a la falla, consistente en espectaculares oscilaciones longitudinales y torsionales, crecientes bajo la excitación de un viento transversal de apenas 60 kilómetros por hora. Como muchas otras fallas catastróficas, ésta ha sido objeto de numerosos estudios para explicarla y extraer de ella enseñanzas útiles.<sup>118</sup>

A partir de ella, el comportamiento dinámico de los puentes suspendidos (y otros cuya flexibilidad puede propiciar deformaciones significativas y amplificación bajo viento o sismo) se estudia tan concienzudamente como si se tratara de aviones, y para verificar ese comportamiento se han desarrollado métodos confiables, primero experimentales y después numéricos.

Vista a posteriori, la falla del puente de Tacoma es fácilmente entendible, pero sería aventurado decir que en 1940 era posible anticiparla y evitarla. Las teorías y prácticas de la ingeniería de puentes de esa época estaban probadas por cierto número de resultados exitosos; se había verificado que con ellas se podían identificar y prevenir todos los mecanismos de falla hasta entonces conocidos, pero no se sabía cuál era el límite preciso de su validez. Hoy se sabe que el diseño del puente de Tacoma llevaba dos de sus parámetros más allá de lo hasta entonces realizado: los cocientes claro/ancho y claro/peralte de la plataforma del puente eran más de vez y media superiores a los de los puentes más flexibles hasta entonces construidos, el Golden Gate en California (1937) y el Bronx-Whitestone en Nueva York (1939).<sup>119</sup> Se excedió, pues, el límite de validez de una tecnología que hasta entonces había sido exitosa. Revelado ese límite, entendido el fenómeno detrás de él y asimilado el aprendizaje, se siguieron haciendo puentes cada vez más esbeltos, hermosos y seguros. Así pues, las fallas marcan los límites del saber y a la vez permiten ensancharlos mediante la información que proporcionan si se les investiga y divulga. De aquí la importancia de estudiarlas con detalle cuando ocurren, pese a la aversión natural de los diseñadores, temerosos de que otros busquen ver en ellas sólo culpas. Empero, siguen siendo más numerosos los informes de éxitos que los de fallas, aunque de éstas se aprende mucho y de aquéllos poco.

#### **4. ¿HAY FALLAS SOCIALMENTE ACEPTABLES Y ACEPTADAS?**

---

<sup>116</sup> D. P. Billington, "History and esthetics in suspension bridges", Journal of the Structural Division, ASCE, agosto de 1977, pp. 1655-1672.

<sup>117</sup> H. Petroski, *To Engineer is Human*, Vintage Books, Nueva York, 1992, p. 230.

<sup>118</sup> R. Scott, *In the Wake of Tacoma*, ASCE Press, Reston, Virginia, 2001, 392 pp.

<sup>119</sup> D. I. Blockley, op. cit., pp. 275-276.

Hemos visto que tanto la naturaleza no determinista del mundo como el método inductivo con que adquirimos conocimiento hacen que nada pueda saberse con absoluta certeza. Esto impone a cualquier diseño una probabilidad de falla no nula. En este apartado buscaremos dilucidar cuál es la magnitud del riesgo que tal hecho implica. Para ello conviene distinguir entre mecanismo de falta y causa de falla. Llamaremos mecanismo de falla a cualesquiera de los modos en que materialmente puede fallar un producto diseñado, y causa de falta a la razón por la que, en su caso, no se logró evitar que el mecanismo de falla se produjera, pese a que evitarlo es precisamente el objetivo del diseño.



En la práctica de la ingeniería se considera que el diseño óptimo se alcanza cuando el costo que se paga por lograr un mayor nivel de seguridad llega al límite de lo que la sociedad está dispuesta a pagar por ello. Si a los ojos de la sociedad cierto incremento de seguridad valiera más que el aumento de costo necesario para lograrlo, se justificaría el gasto; si valiera menos, no se justificaría. Con mayor o menor formalidad, tal es el criterio con que se procede para fijar, tácita o explícitamente, la probabilidad de falla de cualquier producto de la ingeniería; por tanto, cada producto diseñado implica cierto riesgo, que se define como la expectativa del costo (o de las consecuencias) de que falle y se mide en términos monetarios y/o en pérdida de vidas humanas.

Debido a la incertidumbre, cada posible mecanismo de falla implica un riesgo cuya magnitud es igual a la probabilidad de falla multiplicada por el costo de que ésta en efecto se materialice. Entonces, cuanto peores sean las posibles consecuencias de una falla, más baja debe mantenerse su probabilidad, a fin de que el riesgo esté acotado. Por eso en una planta nuclear la probabilidad de falla debe ser muchísimo menor que en un edificio; en éste, muy inferior a la de un automóvil, en el que a su vez la probabilidad de que falle ha de ser más pequeña que en un artefacto inofensivo, poco costoso y desechable. En este último caso, y en todos aquellos cuya falla no constituye un grave problema social, el diseñador o fabricante fija por sí mismo la probabilidad de falla, pero el usuario puede por su parte escoger entre muchas alternativas de tales productos disponibles en el mercado; esta elección finalmente revela el grado de seguridad que la sociedad desea en dichos productos. Si la posibilidad de elección se reduce o las repercusiones sociales de las fallas son mayores, conviene que su probabilidad de ocurrencia sea regulada por un ente público expresamente autorizado para el caso, como se hace en automóviles, aviones, edificios, plantas nucleares y otros productos de la ingeniería.

La probabilidad de falla queda entonces definida implícitamente por los códigos, métodos, criterios, procedimientos y normas de diseño de los respectivos productos. Como se dijo, la tasa de mortalidad debida a falla de productos de la ingeniería es muy inferior a la de causas naturales, pues así de bajos son los niveles de riesgo que la sociedad está dispuesta a aceptar de la ingeniería. La sociedad controla el nivel de seguridad de cualquier producto aceptando que éste falle más frecuentemente a cambio de bajar de precio o, al contrario, exigiendo diseños más conservadores y pagando por ello. La ingeniería no puede sino cambiar los criterios de diseño y alcanzar el nivel de seguridad deseado. Así pues, la manera como la sociedad fija la probabilidad de falla óptima para cada producto diseñado es casi siempre tácita, como ocurre con todas las convenciones sociales.<sup>120</sup>

Entonces los productos de la ingeniería están diseñados de modo que su riesgo casi no modifique la tasa de mortalidad natural; es decir, que su contribución a dicha tasa sea de órdenes de magnitud inferior a ella. Debido a esta cota uniformemente baja impuesta al riesgo, la probabilidad de falla varía mucho de un producto diseñado a otro, como se explicó en un párrafo

---

<sup>120</sup>Se puede discutir el significado de esa aceptación, en virtud de que se trata de un acto tácito; sin embargo, que ella existe es un hecho empírico incuestionable, de naturaleza idéntica a la aceptación del contrato social y todo lo que de él se deriva (J. J. Rousseau, *El contrato social*, 1, 6, 1762).

precedente. La probabilidad de falla socialmente aceptada de un proyecto de ingeniería está, pues, implícita en el estado del arte de la profesión, incluyendo los códigos de diseño vigentes. La incertidumbre del conocimiento, y sólo ella, determina que dicha probabilidad no sea nula.

Cabe ahora preguntar si hay o no otras causas posibles de falla, adicionales a las debidas a la incertidumbre del conocimiento. La respuesta es obvia y afirmativa: existen otras dos causas posibles de falla, que son el error humano y la existencia de mecanismos de falla desconocidos en el momento del diseño (esto es, la ignorancia general). Si el diseñador ha aplicado sin error los métodos, conocimientos y normas de diseño que constituyen el estado del arte, y a pesar de eso el proyecto falla, la sociedad está dispuesta a considerar aceptable esa falla, aunque no pertenezca a la categoría que antes llamamos socialmente aceptada, porque nadie puede ser responsable de la ignorancia general; por lo contrario, sería socialmente inaceptable una falla originada por cualquier violación del estado del arte y sus códigos o normas. Esto significa que las únicas fallas socialmente inaceptables son las debidas a error humano.<sup>121</sup>

Las fallas debidas a la incertidumbre del conocimiento (socialmente aceptadas), más las causadas por ignorancia general de la humanidad (socialmente aceptables si se comprueba que su causa es tal desconocimiento universal y no un error humano), más las debidas a error humano (socialmente inaceptables) son mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivas; es decir, si una falla se debe a una de tales causas no se puede achacar a ninguna de las otras, y el conjunto de las tres abarca todas las causas posibles. Sin embargo, las relaciones causa-efecto no son deterministas, por lo que puede ocurrir la causa y no la falla.

Hemos visto que la probabilidad de falla socialmente aceptada es tan baja que casi no modifica la tasa de mortalidad por causas naturales. Por su parte, la probabilidad de las fallas del segundo tipo (las debidas a ignorancia general) es de igual orden de magnitud que la del primero, y aunque debería disminuir conforme crece el conocimiento de la humanidad, no sucede así porque, simultáneamente, el hombre emprende sin cesar proyectos innovadores, lo que mantiene a la ingeniería siempre al borde de lo desconocido. Finalmente, la probabilidad de falla por error humano es muy variable, pues depende de múltiples factores personales del diseñador y del ambiente profesional, como veremos en seguida.

## **5. EL ERROR HUMANO EN DISEÑO**

Dado que las fallas son socialmente aceptables sólo si no se deben a error humano, el diseñador está obligado a verificar exhaustivamente que, hasta el límite impuesto al conocimiento por la incertidumbre y lo desconocido, en su proyecto no ocurrirá ninguno de los modos de falla previsible bajo cualesquiera de las diversas solicitudes y circunstancias que enfrentará durante su vida útil.

En efecto, eso es lo que en el capítulo iii se dijo que constituye el objetivo de la etapa de revisión y especificación del diseño. Pero para cada

---

<sup>121</sup> Hay quien atribuye cualquier falla a un error humano; esto es insostenible, a menos que se considere que son errores tanto la ignorancia de ciertos fenómenos compartida por todo el género humano como la incertidumbre intrínseca del universo. Una y otra pretensión serían absurdas.

mecanismo de falla ésta puede ocurrir no sólo porque se haya omitido o sea incorrecta la revisión del diseño, sino porque algún supuesto de éste no se cumpla al fabricar, construir u operar el proyecto. Por tanto, el diseñador está obligado no sólo a diseñar correctamente, sino a elaborar especificaciones para los fabricantes, constructores y operadores, y asegurar la comprensión por todos ellos de lo que se especifica. En otras palabras, el diseñador debe cerrar cualquier posibilidad de que se cometa un error, sea de diseño, fabricación, construcción u operación, so pena de faltar a su responsabilidad social. El propósito es abrumador, y resulta admirable que generalmente se cumpla, a juzgar por las estadísticas de falla de la mayor parte de los productos de la ingeniería sujetos a regulaciones de seguridad. Para que en efecto se cumpla, en la etapa de revisión y especificación del diseño el ingeniero ya no hace transacción alguna que comprometa la seguridad frente a ningún otro requisito de diseño, sea estético, económico o de diversa naturaleza. Que las obras de ingeniería sean reconocidas por sus atributos estéticos es por cierto importante para el ingeniero, quien busca expresamente que así sea, pero no en esta etapa sino en la de diseño conceptual, que quedó atrás. Por su parte, el balance entre costo y seguridad es asunto no sólo importante, sino central, pero los correspondientes compromisos también se hacen antes de esta etapa, y en general quedan implícitos en los factores de seguridad adoptados.

El ingenio y las horas de labor que el diseñador invierte en la seguridad durante la revisión del diseño superan por mucho las asignadas a cualquier otra etapa. Aun así, no hay garantía de que la revisión sea perfecta, como no puede haberla en ninguna actividad humana. El proceso de verificación no es infalible ni puede continuar indefinidamente: en algún momento el ingeniero decide que ya identificó y revisó a satisfacción todos los mecanismos y circunstancias en que el proyecto podría fallar, y en ese momento da por concluido el proceso. Que al tomar esta decisión el proyecto haya sido depurado de cualquier error depende, pues, del juicio profesional del ingeniero, de su acuciosidad y orden, del ambiente profesional que impera en la localidad donde se hace el proyecto y, aunque en pequeña medida, del azar.

Identificar los mecanismos de falla específicos a los que el proyecto es susceptible, y definir las correspondientes medidas preventivas, es posible mediante el conocimiento especializado de las diversas ramas de la ingeniería. Con esa base es posible hacer una lista de verificación para evitar omisiones, y el equipo de trabajo responsable del proyecto debe tener conocimiento y experiencia en todo ello.<sup>122</sup> Por especializados, tales asuntos quedan fuera del alcance de este libro. En cambio cabe considerar aquí lo que es independiente de ese saber especializado; esto es, la tipología de los errores humanos que pueden producir fallas adicionales a las socialmente aceptables; reflexionar sobre estos errores es útil tanto para el diseñador que se esfuerza en evitarlos como para otros actores que puede contribuir al mismo propósito.

Según mi experiencia, son tres las causas principales de error humano en el diseño: incompetencia, negligencia y presiones injustificadas por reducir plazos o costos. La clasificación es útil pese a que en cada tipo

---

<sup>122</sup> “D. I. Blockley, op. cit., pp. 241-242, por ejemplo, da una lista de este tipo para fines de diseño estructural.

de error puede haber tanto casos obvios como otros extremadamente sutiles.

## **6. INCOMPETENCIA Y NEGLIGENCIA**

Se dijo en el capítulo xi que aceptar encargos para los que no se tiene competencia es una falta a la ética. Y si se es competente, igual de condenable desde el punto de vista moral es realizar de manera negligente una función que se podría desempeñar bien. Una y otra falta conducen a errores; además, cuando ambas concurren en una misma persona, se refuerzan mutuamente: la incompetencia no permite comprender la importancia relativa de los muchos aspectos que deben cuidarse en el diseño, por lo que impide dar a cada uno la atención que amerita; a su vez, la negligencia hace obviar el estudio concienzudo del proyecto y sus precedentes y, por tanto, impide aprovechar la experiencia acumulada de la profesión. Discutiremos ambas causas de error juntas en vista de que están correlacionadas.

Empero, no son las modalidades obvias del párrafo anterior las que normalmente se presentan en la ingeniería, sino otras más bien circunstanciales. Por ejemplo, tanto la organización del trabajo ingenieril como las herramientas de cálculo que se usan han venido cambiando con el tiempo, la primera gradualmente y las segundas de modo muy acelerado por el advenimiento de las computadoras. Cada uno de estos aspectos puede convertirse en fuente de errores graves si no se reflexiona en sus implicaciones y se les pone remedio. En este apartado analizaremos ambos aspectos sucesivamente.

La organización de la ingeniería en equipos de trabajo capaces de llevar a cabo un proyecto desde el diagnóstico hasta la puesta en servicio se consolidó durante el siglo xviii como modo consagrado de atender las responsabilidades de la profesión, cuando la ingeniería civil abarcaba casi todo lo que no fuera ingeniería militar. El trabajo en equipo y la integración de éste por ingenieros de experiencia variada sigue siendo una característica de la ingeniería, pero ciertas circunstancias han cambiado. El ingeniero en jefe de entonces podía con relativa facilidad mantenerse al tanto de todas las decisiones porque los métodos de la ingeniería se basaban sobre todo en reglas empíricas, y los materiales cuyo uso predominaba en las edificaciones eran sólo dos (la mampostería y la madera, ambos trabajando a compresión y con esfuerzos pequeños). Cada ingeniero dominaba el saber completo de la profesión y podía realizar funciones diversas dentro del equipo de trabajo con una supervisión moderada.

Al irse incorporando formas estructurales novedosas propiciadas por el uso de nuevos materiales más resistentes y con capacidad de soportar tanto esfuerzos de compresión como de tracción (hierro y acero), se introdujeron también nuevos métodos de análisis que exigieron cierta especialización. Se diferenciaron luego las distintas ramas de la ingeniería, como la mecánica, la eléctrica y la química, y ya en el siglo xx se multiplicaron las disciplinas o ciencias de la ingeniería auxiliares de ésta, como la elasticidad, la mecánica de suelos y rocas, la metalurgia, la termodinámica, etc.; la ingeniería fue dependiendo entonces más de la ciencia que de las reglas empíricas y su acervo de conocimientos se expandió muchísimo; por tanto, ya no todos los ingenieros dominaban el saber completo de la profesión, y la supervisión se volvió más difícil, aunque siguió siendo crucial para el buen éxito de los proyectos. Cuanto más especializado se volvía cada ingeniero, más desarrollaba una visión parcial de los problemas, y la eficacia de la comunicación del ingeniero en jefe con los especialistas y de éstos entre sí se volvía un factor cada vez más crítico. Tales cambios aumentan la dificultad para mantener bajo control los errores y, por tanto, incrementan la probabilidad de que éstos ocurran. En esas circunstancias crecen los errores debidos a incompetencia, sobre todo si algunos de los integrantes menos experimentados del equipo de trabajo tienen responsabilidades que les resultan novedosas y carecen de supervisión calificada y cercana; otro tanto ocurre con los errores causados por negligencia si la supervisión se debilita en general.

Tanto el aumento de conocimientos científicos como la multiplicación de códigos y regulaciones diversas puede tener efectos semejantes, pues ambos hacen crecer a la vez los tipos de saber especializado, los tramos de control en el equipo de trabajo y las dificultades de comunicación dentro de

él. Además, los códigos y regulaciones tienden a volverse más y más complejos y, por tanto, crean la posibilidad de errores de interpretación, tanto más si, por el motivo ya indicado, algunos integrantes del equipo de trabajo caen circunstancialmente en situación de incompetencia o negligencia.

No sólo en el proceso de diseño ha crecido la diversidad de participantes y la consecuente proclividad al error, sino también en la construcción, la fabricación y la operación de las creaciones de la ingeniería. Aparte de la complejidad propia de los proyectos, la práctica de subcontratar múltiples tareas ha contribuido a la participación en cada proyecto de numerosos especialistas con "visión de túnel" que no perciben el entorno sino exclusivamente lo que, por el alcance de su contrato, consideran que les compete. Es inevitable que esto también incremente la probabilidad de error por la incapacidad que muchos integrantes del grupo de trabajo tendrán de apreciar las repercusiones que un detalle en un campo específico puede tener en la seguridad integral del proyecto.

A todo lo anterior se han sumado los efectos de las computadoras. Éstas permiten aumentar tanto la rapidez como la precisión de los análisis cuantitativos y, por tanto, la productividad de los ingenieros y la calidad de su trabajo. Bien usadas, las computadoras reducen enormemente el tiempo que un ingeniero dedica al análisis, y en la misma medida permiten aumentar el que se aplica a tareas creativas que exigen reflexión y ensayo; pero mal usadas conducen simplemente a un mayor volumen de trabajo rutinario, con menos actividad creativa y menos autocrítica. Estos formidables instrumentos en la mayoría de los casos están contribuyendo a una modalidad de error en el diseño que puede volverse la dominante, pues un programa de cómputo comercial basta para que alguien con muy pocos conocimientos, capacidades y juicio ingenieril pueda producir algo muy parecido al diseño de un proyecto. Los programas disponibles en el comercio para las computadoras personales (nc) son de tan bajo costo que constituyen una invitación para que alguien sin experiencia haga con ellos tareas para las que no tiene sensibilidad y, por lo mismo, no percibe cuándo la respuesta de la computadora es errónea o aun absurda.

Aunque es el mal uso de los programas comerciales lo que representa el mayor riesgo de la era de las computadoras, los programas en sí también pueden tener problemas. Hace años, en una de mis responsabilidades consideré necesario encomendar una evaluación muy sencilla para seleccionar, entre varios disponibles, un programa de cómputo que permitiera realizar análisis tridimensionales de torres de transmisión eléctrica; las discrepancias entre un programa y otro resultaron hasta tres veces la magnitud de los esfuerzos calculados, por lo que se descartó el uso de programas comerciales y se desarrolló un programa de cómputo ad hoc. Hoy hay multitud de programas confiables para casi cualquier necesidad de análisis que no sea muy peculiar; pero incluso si los programas de cómputo son correctos, sus resultados pueden no serlo debido a un error en cualesquiera de los datos críticos del sistema por analizar, más aún si éste es complejo. Es necesario el buen juicio de un ingeniero experimentado para aceptar o rechazar los resultados de la computadora, incluso si el modelo numérico del sistema es sencillo. Desafortunadamente, los proyectos con soluciones intrínsecamente complejas (por ejemplo, una estructura tridimensional o una planta nuclear) no pueden diseñarse sin el apoyo de modelos computacionales; reducir la probabilidad de error a los bajísimos niveles aceptables exige en esos casos, además de buen juicio, usar modelos auxiliares menos refinados pero más sencillos (y, por tanto, menos susceptibles a errores humanos) para verificar el orden de magnitud de los resultados del modelo refinado. Además, en cualquier caso es

indispensable revisar los datos de entrada y salida de modo altamente redundante.



Cabe recordar que las computadoras no pueden hacer otra cosa que procesar números. Especificar el proceso que debe realizarse, los datos básicos, y demás condiciones pertinentes no puede hacerlo sino el ingeniero, cuyo juicio no es sustituible por computadora alguna. De aquí que sean riesgosos los programas de cómputo comercial, generalmente formulados por especialistas que, por serlo, no tienen experiencia integral en el tipo de problema de que se trata, ni juicio propiamente profesional. El uso de tales programas conduce casi necesariamente a fallas si no está supervisado de cerca por un ingeniero con juicio bien desarrollado, que sea capaz de especificar o aprobar cómo modelar el problema, qué programa de cómputo usar, los datos de entrada, y la idoneidad de los resultados que la computadora arroje. Para que esto sea posible debe cuidarse la integración y el funcionamiento de los equipos de trabajo de cada proyecto a la luz de lo dicho en el capítulo iv.

## **7. PRESIONES INJUSTIFICADAS**

En todo proyecto de ingeniería existen presiones para reducir plazos y costos, la mayoría de ellas legítimas; pero aquí me referiré a las que no lo son y, por tanto, deben evitarse. Los servicios de ingeniería en general, y dentro de ellos el diseño, son actividades que usualmente se realizan en condiciones de libre mercado. Aunque la competencia se da siempre en dos dimensiones (economía y calidad), son mucho más numerosas y fuertes las motivaciones para que el compromiso entre ambas se sesgue a favor de la economía y en contra de la calidad, a menos que expresamente se adopten reglas para acotar tal sesgo. De esto surgen las presiones injustificadas, que pueden ser tanto externas al diseñador como autoimpuestas.

El método por el que suelen procurarse los servicios de ingeniería para grandes proyectos es la licitación pública, a fin de conseguir la mejor oferta económica. Hay quien sostiene que esta práctica es apropiada para fines de construcción y fabricación pero no para diagnóstico y diseño. Es cierto que el método de licitación funciona bien para aquellas actividades más frecuentemente que para las segundas, pero no por causas insalvables. En efecto, suelen funcionar bien las licitaciones para construcción y fabricación porque el diseñador especifica su diseño, y esto fija o acota los objetivos y las reglas del juego. Además de la descripción completa del proyecto, las especificaciones para este fin incluyen normalmente las relativas a materiales y procedimientos de fabricación o construcción de los elementos del mismo, o bien las propiedades deseadas de cada uno de ellos, los métodos para medirlas y las condiciones de su verificación. Es obvio que para licitar el diseño de un proyecto también es posible escribir previamente especificaciones equivalentes, que corresponde elaborar a quien ha hecho la labor previa al diseño; es decir, la identificación del problema, el diagnóstico del mismo y, si es el caso, el diseño conceptual. No hacerlo así equivale a organizar una competencia sin reglas, en la cual habrá poderosos motivos para que el diseñador se sienta inclinado a reducir la calidad de su trabajo arriesgando la seguridad. En esas circunstancias el propio diseñador, al integrar su equipo de trabajo, podría inclinarse por maximizar el volumen de su producción relajando la supervisión interna, lo que podría causar errores por incompetencia o negligencia como los discutidos en el apartado anterior. En cualquier caso, contra las presiones de este tipo, externas o autoimpuestas, el antídoto es la elaboración cuidadosa de las reglas del juego; éstas incluirían, en licitaciones para

diseño, el perfil profesional y la experiencia deseable del diseñador, la manera de acreditar tales requisitos, los métodos, criterios y normas de diseño pertinentes, los procedimientos para determinar lo no especificado o no especificable en la convocatoria, y las formas de supervisión que se usarán, etc. Lo mismo es aplicable para prevenir errores al subcontratar porciones del diseño o la construcción.

El conflicto de intereses es otro origen de presiones contra la seguridad. Se puede presentar, por ejemplo, cuando una misma organización es responsable de diseño, construcción y/o fabricación, y por lo mismo se relaja la especificación o la supervisión de una o ambas tareas.

El afán de economía y otros motivos pueden dar lugar a presiones sobre el diseñador tendientes a acortar más de lo prudente los plazos necesarios para las diversas actividades previas al diseño (reunión de información básica para confirmar el diagnóstico, caracterizar las solicitudes, clarificar las circunstancias futuras del proyecto, etc.) y para el diseño mismo (identificar y analizar posibles mecanismos de falla ante la gama completa de solicitudes y circunstancias ambientales, etc.). Cuando el diseñador cede ante tales presiones se incrementa la posibilidad de errores por omisión y la consecuente probabilidad de falla. Éste es uno de los tipos de presión más irracional que pueden ocurrir en ingeniería, pues los costos de diseño son una fracción minúscula no sólo de los que implica la materialización del proyecto, sino de los ahorros derivados de un diseño hecho con parsimonia y cuidado.

Finalmente deben mencionarse las presiones que ocurren cuando el proyecto está concluido. Aunque el diseñador habrá previsto y especificado las condiciones de operación de modo que no se violen durante ésta los supuestos del diseño, no todo es previsible; por cambios en sus circunstancias, algunos proyectos tienen que enfrentar durante su vida útil condiciones de operación no previstas durante el diseño (cargas mayores en un puente o un edificio, lapsos más largos de operación continua de una turbina, contaminación atmosférica de agresividad no prevista en ciertos componentes de cualquier sistema físico, etc.). Habrá entonces presiones para improvisar, con graves riesgos para la seguridad del proyecto. La reacción racional ante casos así es reanalizar el problema integral para escoger fundadamente entre tres cursos de acción: a) cambiar las condiciones de operación especificadas sin modificación sustancial del diseño, a costa de ciertos riesgos; b) si estos son inaceptables, hacer modificaciones al proyecto para satisfacer las nuevas necesidades operativas, o bien c) mantener el proyecto con sus características de diseño originales y las respectivas especificaciones de operación, y atender las nuevas necesidades mediante un nuevo proyecto. Para cada una de las dos primeras opciones se requeriría formular nuevas políticas y especificaciones de operación y mantenimiento.

## **8. FALLAS POR MECANISMOS DESCONOCIDOS: EL PRECIO DE LA INNOVACIÓN**

Habíamos llegado a las siguientes conclusiones:

1. En cada proyecto de ingeniería hay cierta probabilidad de falla por mecanismos conocidos; tal probabilidad se debe a la incertidumbre inevitable en el conocimiento de la naturaleza, y en general es bajísima, tanto más cuanto mayor es el efecto psicológico, económico o de otro tipo que la falla puede producir en la sociedad; por lo mismo, este tipo de falla es socialmente aceptado como un mal inevitable.

2. En cambio, la sociedad considera inaceptable una falla debida a error humano; por tanto, la ingeniería concentra tiempo y esfuerzo enormes

en la revisión de sus diseños buscando evitarlas, aunque no siempre con buen éxito.

3. Finalmente, también puede haber un tipo de falla debida a que en el momento del diseño el mecanismo responsable de ella era desconocido por la profesión e improbable de inferir a partir de otro tipo de conocimiento disponible; tácitamente la sociedad también considera aceptable este tipo de falla, aunque no a priori sino previa investigación por profesionales calificados.

Habiendo discutido las fallas de los primeros dos tipos, en seguida analizaremos las del tercero.

Cada problema de ingeniería es nuevo y, por tanto, no se puede resolver mediante la aplicación rutinaria de decisiones y técnicas que en casos previos fueron exitosos. La novedad del problema unas veces es obvia y otras tan sutil que no se manifiesta sino en la forma de un comportamiento imprevisto del proyecto y eventualmente su falla. Ejemplo de esto son las muchas fallas que desde la Antigüedad hasta principios del siglo xx ocurrieron en presas cuya cimentación ocultaba “detalles geológicos menores” que no pudieron identificarse sino con el desarrollo de la mecánica de suelos.<sup>123</sup> En otras ocasiones lo novedoso del problema radica en que para resolverlo se requiere un tipo de solución no probado hasta entonces; es el caso de las fallas en los primeros puentes de acero construidos durante el siglo xix, explicables por el desconocimiento del mecanismo de falla por fatiga<sup>124</sup>. En otros casos lo nuevo consiste en ensayar métodos y tecnologías que a priori parecen ventajosas pero que no han sido sometidas a una prueba práctica. Casos así fueron abundantes cuando, en esa misma época, la elasticidad, la plasticidad, la dinámica, etc. comenzaron a usarse en el diseño estructural; para evitar fallas catastróficas, cada decisión se sometía más al buen juicio del ingeniero responsable que a los resultados de los nuevos métodos, hasta que, ya probados por el comportamiento de los propios proyectos y pese a ciertas fallas menores, tales métodos produjeron la más alta tasa de innovación jamás observada en la ingeniería civil y dieron cauce a todo un siglo de desarrollo económico y mejora de la calidad de vida en los Estados Unidos. Finalmente, en otros casos la innovación no está motivada sino porque el ser humano gusta del cambio y la sociedad empuja en ese sentido sin más justificación.

Por uno u otro motivo, el hecho es que existe una presión social continua para innovar en mayor o menor medida, tanto en la ingeniería como en otros campos. Esto implica abordar problemas sin disponer de evidencias fehacientes de que el conocimiento disponible es aplicable o suficiente para resolver cada nuevo caso. Es imposible saber a priori si el próximo puente con mayor claro, o el construido con un nuevo material o con un procedimiento aún no probado en un número suficiente de casos va a poner en evidencia un mecanismo de falla desconocido. Lo más que un ingeniero apto puede hacer es poner todo su empeño en prever los probables resultados de su diseño a partir de lo que sabe, incluyendo precedentes similares e inferencias basadas en conocimiento aportado por

---

<sup>123</sup> K. Terzaghi, “Effect of minor geologic details on the safety of dams”, American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Technical Publication 215, 1929, pp. 3 1-44.

<sup>124</sup> 13 H. Petroski, “On 19th century perceptions of iron bridge failures”, Technology and Culture, núm. 24, 1983, pp. 655-659.

la ciencia. Pero su solución no será en rigor sino una hipótesis plausible que sólo el proyecto una vez construido y puesto en operación probará si es correcta o no. Si resulta que el proyecto falla a pesar de cumplir todos los requisitos dictados por la práctica, las teorías y las normas del momento, ¿es válido concluir a posteriori que no debió hacerse? O quizá la pregunta pertinente podría ser ésta: ¿quién es competente para hacer lo que nunca se ha hecho? Si la respuesta es que nadie, se cancela toda posibilidad de innovación y de mejora; si se responde que alguien debe ser capaz, se abre cauce al futuro; pero aun aplicando todo lo que se sabe y emprendiendo previamente las investigaciones y ensayos adicionales que la prudencia aconseje, de algún modo se estará incursionando en lo inexplorado. Y si el pretendido proyecto falla por un mecanismo hasta entonces desconocido, se habrá demostrado categóricamente que la solución intentada, precisamente ésa, no es viable, pero no se podrá acusar de incompetencia a quien intentó la solución, pues el futuro nunca se puede prever completamente con base en el pasado.

Viene al caso transcribir el siguiente párrafo de una carta escrita a propósito de la primera falla ocurrida en una presa de arco, la presa Malpasset (Francia) en 1959. La carta es de Karl Terzaghi, creador de la geotecnia y uno de los más notables ingenieros e innovadores del siglo xx, y está dirigida a André Come, responsable del diseño de la presa: “Fallas de este tipo son, desafortunadamente, eslabones esenciales e inevitables en la cadena de avances de la ingeniería, pues no hay otros medios para conocer los límites de validez de nuestros conceptos y procedimientos [...] Los tormentos que usted sufre deben ser al menos atemperados por saber que las simpatías de sus colegas de profesión van acompañadas de gratitud por las enseñanzas que se derivan de su valiente labor pionera.”<sup>125</sup>

Vista en retrospectiva, cualquier falla puede explicarse, pero mirar hacia el futuro y anticipar que un mecanismo desconocido puede producir una falla en cierto proyecto es imposible. Puede haber en cambio casos dudosos si, por ejemplo, el mecanismo nunca se ha presentado en la práctica pero, con base en conocimiento de la propia profesión, puede inferirse que es probable. Apoyándose en el conocimiento disponible, el ingeniero se afana en inferir e impedir que los mecanismos de falla imaginables de su proyecto se materialicen, pero la imaginación no es ilimitada ni infalible. En cuestiones prácticas, sólo se tiene culpa si se soslaya o tergiversa el conocimiento establecido.

Como todo proyecto plantea un nuevo problema, cada uno implica el riesgo de incursionar en lo desconocido. Si ingenieros y sociedad no quisieran aceptarlo, nada nuevo podría hacerse. Por supuesto, tal opción no existe, pues sería contraria a la naturaleza humana y a la vida misma, ya que todo lo vivo evoluciona en función del éxito o fracaso de ciertos cambios, según el fascinante hallazgo de Darwin. Si no fuera porque aceptamos el riesgo de innovar, tendríamos que seguir cruzando los ríos a nado, no sobre puentes, y el océano en balsas, no en navíos ni en aviones. Por otra parte, estos mismos ejemplos hacen evidente que absteniéndose de innovar no se eliminan los riesgos, sino se les mantiene en niveles mucho más altos.

El ingeniero que participa en tales decisiones siempre sabe con más firmeza lo que no debe hacer que lo que sí puede hacer, pues la enseñanza de las fallas ocurridas en su profesión es categórica, en tanto que la de los éxitos es provisional e incierta. Sin embargo, la conclusión no es que toda acción innovadora está condenada al fracaso, ni siquiera cuando ésta es tan audaz como el primer viaje tripulado a la luna.

El hecho comprobable de que los éxitos sean siete órdenes de magnitud más numerosos que las fallas demuestra fuera de toda duda que la profesión sabe muy bien cómo lidiar con esa problemática: ha aprendido a hacer inferencias generalmente atinadas con base en su larga historia de éxitos y fracasos.

---

<sup>125</sup> ‘ R. Goodman, Karl Terzaghi. 71e Engineer as Artist, AsCE Press, Reston, Va., 1999, p. 245.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Alger, J. R. M., y C.V. Hays, *Creative Synthesis in Design*, PrenticeHall/Englewood Cliffs, Nueva Jersey, 1964.
- American Society of Civil Engineers, *Standards of Professional Conduct for Civil Engineers*, apéndice, Washington, 2000.
- Ang, A., y W. Tang, *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, vols. 1 y II, J. Wiley, Nueva York, 1970.
- Bassols Batalla, N., *Galileo ingeniero y la libre investigación*, Fondo de Cultura Económica (Colección Popular), México, 1995.
- Benjamin J. R., y C. A. Corneli, *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*, McGraw-Hill, Nueva York, 1970.
- Bentham, J. "De los límites que separan la moral y la legislación" *Tratados de Legislación Civil y Penal*, ed. facs. del Tribunal Superior de Justicia del Distrito Federal, México, 2004.
- Billington, D. P., "History and esthetics in suspension bridges", *Journal of the Structural Division, ASCE*, pp. 1655-1672, agosto de 1977.
- Blockley, D. I., *The Nature of Structural Design and Safety*, Ellis Horwood Ltd., Chichester, 1980.
- Brooks, H., "The concept of sustainable development and environmentally sound technology", *Environmentally Sound Technology for Sustainable Development*, Boletín ATAS, núm. 7, pp. 19-24, United Nations, Nueva York, 1992.
- Businessweek, "Mexico: Pumping Out Engineers" en <<http://www.businessweek.com/magazine>>.
- Butterfield, H., *Los orígenes de la ciencia moderna*, Conacyt, México, 1981.
- Casagrande, A., "Karl Terzaghi: his life and achievements", *From Theory to Practice in Soil Mechanics*, pp. 3-21, J. Wiley and Sons, Nueva York, 1960.
- \_\_\_\_\_, "Role of 'calculated risk' in earthwork and foundation engineering" *Proceedings, American Society of Civil Engineers*, vol. 91, núm. SM 4, pp. 1-40, julio de 1965.
- Chowdury, A. M., "Arsenic crisis in Bangladesh" *Scientific American*, vol. 291, núm. 2, agosto 2004, Nueva York, pp. 70-75.
- Código de Hammurabi, normas 228-233.
- Coulomb, C. A., "Ensayo sobre una aplicación de las reglas de máximos y mínimos a algunos problemas de estática relativos a la arquitectura" *Memoria presentada ante la Real Academia de Ciencias*, vol. 7, París, 1776.
- Cortes-Comer, N., "The extraordinary genius of Arthur E. Morgan", *Civil Engineering*, número especial sobre la historia de la ingeniería civil, American Society of Civil Engineers, pp. 80-83, Nueva York, 1976-1977.
- Cross, H., *Engineers and Ivory Towers*, McGraw-Hill, Nueva York, 1970.
- Dawes, R. M., *Rational Choice in an Uncertain World*, Harcourt Brace Jovanovich Publishers, Orlando, Florida, 1988.
- Díaz y de Ovando, C., *Los Veneros de la Ciencia Mexicana. Crónica del Real Seminario de Minería*, vol. 1, Facultad de Ingeniería, UNAM, México, 1988.
- Ericsson, K. A., y J. Smith (eds.), *Toward a General Theory of Expertise*, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.

\_\_\_\_\_. "Prospects and limits of the empirical study of expertise. An introduction", *Toward a General Theory of Expertise*, pp. 1-38, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.

Florman, S. C., *The Existential Pleasures of Engineering*, St. Martin Press, Nueva York, 1976.

Forrester, J. W., "Industrial dynamics. A major break through for decision makers", *Harvard Business Review*, vol. 36, núm.4, pp. 37-66, Cambridge.

Freud, S., *El malestar en la cultura*, Alianza Editorial, Madrid, 1973.

Gale Cutler, W., "What future engineers and scientists learn about ethics", *Research Technology Management*, noviembre- diciembre, pp. 39-48, 1992.

Galilei, Galileo, *Diálogo sobre las dos Nuevas Ciencias*, Elzevir, Holanda, 1638.

Goodman, R., *Karl Terzaghi: The Engineer as Artist*, ASCE Press, Reston, 1999.

Gray, J., "Una ilusión con futuro", *Letras Libres*, núm. 71, año VI, pp. 12-17, México, 2004.

Grun, B., *The Timetables of History*, Simon & Schuster, Nueva York, 1979.

Hansen, J., *Teoría del Conocimiento*, Editores Mexicanos Unidos, México, 2003.

Hart, D. D., "Dam removal: challenges and opportunities for ecological research and river restoration" *BioScience*, vol. 52, núm. 8, pp. 669-681, agosto 2002.

Hatch, S. E., *Changing our World: True Stories of Women Engineers*, ASCE Press, Reston, 2006.

Hegel, G. W. E., *Filosofía de la Historia*, *Great Books of the Western World*, vol. 46, *Encyclopaedia Britannica*, Chicago, 1952.

Hesíodo, *Teogonía*, UNAM, (Biblioteca Scriptorum Graecorum et Romanorum Mexicana), México, 1995.

\_\_\_\_\_. *Los Trabajos y los Días*, UNAM, (Biblioteca Scriptorum Graecorum et Romanorum Mexicana), México, 1979.

Homero, *Odisea*, l. párr. 32 y ss.

Institute of Electrical and Electronics Engineers, *The IEEE Code of Ethics*, [en línea] <<http://www.iee.org/portal/pages/about/whatis/code.html>>

Jackson, D. C., "Railroads, truss bridges, and the rise of the civil engineer" *Civil Engineering*, número especial sobre la historia de la ingeniería civil, pp. 36-41, American Society of Civil Engineers, Nueva York, 1976-1977.

Jaeger, W., *Paideia: Los ideales de la cultura griega*, libro primero, Fondo de Cultura Mexicana, México, 1995.

Jovellanos, M. G. de, "Memoria sobre educación pública", quinta cuestión, sección primera: *CCETdi de las ciencias metódicas*", en *Obras Escogidas*, vol. II, Espasa-Calpe, Madrid, 1935.

Kant, E., *Crítica de la razón práctica*, *Great Books of the Western World*, vol. 42, *Encyclopaedia Britannica*, Chicago, 1952.

Laidler, K. J., *Energy and the Unexpected*, Oxford University Press, Oxford, 2002.

Lewis, H. W., *Technological Risk*, W. W. Norton & Co., Nueva York, 1990.

Locke, J., *Ensayo sobre el entendimiento humano*, 1689.



- Meehan, R. L., *The Atom and the Fault*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1984.
- Mill, J. S., *Utilitarianism*, Great Books of the Western World, vol. 43, Encyclopaedia Britannica, Chicago, 1952.
- Nietzsche, E., *Humano, Demasiado Humano*, 1886.
- \_\_\_\_\_, *El Origen de la Tragedia*, Porrúa (Colección Sepan Cuantos...), México, 1999.
- Novak, M. A., R. M. May, y K. Sigmund, "The arithmetics of social help" en *The Mysteries of Mathematics*, pp. 10-15, Scientific American, Nueva York, 2006.
- Oakeshott, M., "Learning and teaching" en R. S. Peters (ed.), *The Concept of Education*, p. 167, Routledge and Keegan Paul, Londres, 1967.
- Pagiola, S., J. Bishop, y N. Landell-Mills (eds.), *Selling Forest Environmental Services*, Earthscan Publications, Londres, 2002.
- Pappenheim, F., *La enajenación del hombre moderno*, Era, México, 1965.
- Pascal, B., *Pensées*, 1670.
- Patel y L., y G. J. Groen, "The general and specific nature of medical expertise: a critical look", en *Toward a General Theory of Expertise*, K. A. Ericsson y J. Smith (eds.), pp. 93-125, Cambridge University Press, Cambridge, 1991.
- Peck, R. B., "Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics", *Geotechnique*, vol. 19, núm. 2, pp. 171-187, Londres, 1969.
- Peng, Y., y J. A. Reggia, *Abductive Inference Models for Diagnostic Problem-solving*, Springer Verlag, Nueva York, 1990.
- Petroski, H., "On 19th century perceptions of iron bridge failures", *Technology and Culture*, núm. 24, pp. 665-659, 1983.
- \_\_\_\_\_, *The Evolution of Useful Things*, Alfred A. Knopf Inc., Nueva York, 1992.
- \_\_\_\_\_, *To Engineer is Human*, Vintage Books, Nueva York, 1992.
- Pico Della Mirandola, Giovanni, *De la dignidad del hombre*, trad. de la versión antigua de Basilea, Ramón Llaca y Cía., México, 1996.
- Platón, "Lysis o de la amistad" en *Diálogos*. \_\_\_\_\_ "Teetetes", en *Diálogos*.
- Reséndiz Nuñez, D., "Sobre la racionalidad de la tecnología", *Complementos*, Nueva Época, núm. 2, Seminario de Problemas Científicos y Filosóficos, UNAM, 1987.
- "Principios y criterios de los nuevos planes de estudio de la Facultad de Ingeniería", *Ingeniería*, vol. LX, núm. 4, pp. 5-10, México, 1990.
- "Sustainability and the nature of development", *Boletín ATAS*, núm. 7, pp. 13-18, United Nations, Nueva York, 1992.
- \_\_\_\_\_, "Los ingenieros que el país necesita", *Conferencias Fernando Espinosa Gutiérrez* (comp.), pp. 115-129, Colegio de Ingenieros Civiles de México, México, 1993.
- \_\_\_\_\_, "Ética para decisiones tecnológicas (o ética explícita versus ética intuitiva)", *Ingeniería Civil*, núm. 308, México, 1994, pp. 9-19.
- \_\_\_\_\_, "La tecnología y los valores sociales" en Ruy Pérez Tamayo y Enrique Florescano (coords.), *Sociedad, ciencia y cultura*, pp. 175-195, Cal y Arena, México, 1995.
- \_\_\_\_\_, *Los métodos de la geotecnia*, ed. inglés-español, Décimotercera Conferencia Nabor Carrillo, Sociedad Mexicana de Suelos, México, 1996.

\_\_\_\_\_ “Los procesos intelectuales de la ingeniería, parte 1: El quehacer y los métodos”, Ingeniería Civil, núm. 421, pp. 20- 26, México, 2004.

\_\_\_\_\_ “Los procesos intelectuales de la ingeniería, parte II: El juicio profesional y otros atributos”, Ingeniería Civil, núm. 422, pp. 28-37, México, 2004.

\_\_\_\_\_ “El sismo de 1985: De lo aprendido a su puesta en práctica”, Cloquio conmemorativo la geotecnia a 20 años del Sismo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, pp. 3-8, México, 2005.

\_\_\_\_\_ “La importancia de otros en mi contribución a la ingeniería de cimentaciones”, Descubrimientos y aportaciones científicas y humanísticas mexicanas en el siglo XX, Fondo de Cultura Económica, México, 2007.

Reséndiz Nuñez, D., “La evolución de la ingeniería mexicana: lecciones de la historia”, El siglo de la mecánica de suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, México, 2008

Rosenblueth, E., “Decisiones éticas en ingeniería”, Ingeniería, vol. 40, núm. 4, pp. 383-398, México, 1970.

\_\_\_\_\_ “Estimaciones bipuntuales en probabilidades”, Series del Instituto de Ingeniería, núm. 464, México, 1983.

\_\_\_\_\_ La Futura Educación Ingenieril, Cuadernos FICA, núm. 4, Fundación ICA, México, 1995.

\_\_\_\_\_ Sobre Ciencia e Ideología, conferencias de 1979 en El Colegio Nacional, Fundación Javier Barros Sierra, A. C., México, 1980.

Rosenblueth, E., y J. Elizondo, “Una reflexión sobre los logros y alcances de las ciencias de ingeniería en México”, en México:

ciencia e ingeniería en el umbral del siglo XXI, pp. 347-357, Conacyt, México, 1994.

Ross, P. E., “The expert mind”, Scientific American, vol. 295, núm. 2, pp. 46-53, Nueva York, 2006.

Rousseau, Jean Jacques, El Contrato Social, 1762.

Safo, Poemas, de Carlos Montemayor (intr. y notas), Trillas (Colección Linterna Mágica), México, 1968.

Schón, D. A., La Formación de Profesionales Reflexivos, Paidós, Barcelona, 1992.

Scott, R. In the Wake of Tacoma, ASCE Press, Reston, 2001.

Sen, Amartya, Identity and Violence, W W Norton & Co., Nueva York, 2006.

Smith, N. G. (ed.), Appraisal, Risk, and Uncertainty, Thomas Telford Ltd., (Construction Management Series), Londres, 2003.

Terzaghi, K., “Effect of minor geologic details on the safety dams”,

American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, Technical Publication 215, pp. 31-44, 1929.

“The Initiative on Science and Technology for Sustainability”, Science and Technology for Development, icsu Series on Science for Sustainable Development, núm. 9, International Council for Science, París, 2002.

Thomas, E., “Large dams: global rethink”, International Power Generation, Surrey, octubre de 2001.

UNESCO, Las ciencias sociales y las humanidades en la educación de ingenieros, Seminario Internacional de la UNESCO, Bucarest, 1972.

Vick, S. G., Degrees of Belief ASCE Press, Reston, 2002. Vinci, Leonardo da, “Pensamientos”, en Escritos literarios, Guillermo Fernández (trad.), Instituto Mexiquense de Cultura, México, 2003.

Vitruvio, Marcus, *De Architectura Libri Decem* (The Ten Books On Architecture), M. H. Morgan (trad.), Dover Publications, Nueva York, 1960.

Wilson, E. O., *On Human Nature*, Harvard University Press, Cambridge, 1978.

World Commission on Dams, *Dams and Development: a New Framework for Decision Making*, Earthscan Publications Ltd., Londres, 2000.

World Commission on the Environment and Development, *Our Common Future*, Oxford University Press, Oxford, 1987.

Zaid, Gabriel, "La fe en el progreso" *Letras Libres*, núm. 71, año VI, pp. 20-21, México, 2004.

**El rompecabezas de la ingeniería.**  
**Por qué y cómo se transforma el mundo,**  
**de Daniel Resndiz Núñez,**  
**se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de enero de**  
**2008 en Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V.**  
**(JEPSA),**  
**Caiz. San Lorenzo, 244; 09830 México, D. E**  
**En sn composición, elaborada en el**  
**Departamento de Integración Digital del PCE, se usaron tipos**  
**Minion de 12:14, 11:14 y 9:10 puntos.**  
**La edición, al cuidado de Rubén Hurtado López, consta de**  
**3000 ejemplares.**