

HENRY PETROSKI

# El éxito a través del fracaso

LA PARADOJA  
DEL DISEÑO



POPULAR

El éxito  
a través del fracaso  
*La paradoja del diseño*

*Henry Petroski*

---

Traducción de *Liliana Andrade Llanas*



Primera edición, 2006

Primera edición en español, 2011

Primera edición electrónica, 2011

Título original: *Success through Failure. The Paradox of Design*

Copyright © 2006 by Princeton University Press

Fragmentos del original en inglés aparecieron publicados por primera vez en *American Scientist*, *Harvard Business Review* y el *Washington Post Book World*

D. R. © 2011, Fondo de Cultura Económica

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

Empresa certificada ISO 9001:2008



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

Comentarios:

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

Tel. (55) 5227-4672

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra, sea cual fuere el medio. Todos los contenidos que se incluyen tales como características tipográficas y de diagramación, textos, gráficos, logotipos, iconos, imágenes, etc. son propiedad exclusiva del Fondo de Cultura Económica y están protegidos por las leyes mexicana e internacionales del copyright o derecho de autor.

ISBN 978-607-16-0802-4

Hecho en México - *Made in Mexico*

*Para Karen*



## Prefacio

Este libro lo escribí al tiempo que me preparaba para una secuencia de tres conferencias públicas sobre ingeniería y diseño que di en la Universidad de Princeton. El texto aborda el tema de las Conferencias Louis Clark Vanuxem, dictadas en Princeton los días 7, 8 y 9 de diciembre de 2004, pero de ninguna manera es una transcripción de ellas, cuyos títulos fueron:

1. “De la caverna de Platón a Powerpoint: Una conferencia ilustrada sobre la conferencia ilustrada”
2. “Bien, mejor, mejor: la evolución de lo imperfecto”
3. “El futuro histórico: la persistencia del fracaso”

La presentación de las conferencias por escrito me ha permitido ampliar la variedad de tópicos y sistemas tratados e incluir más ejemplos y detalles de lo que pude hacer de manera oral. Infortunadamente, en un libro el espacio me imposibilita desplegar todas las ilustraciones que hubiera deseado, como lo hice en mis presentaciones de PowerPoint en Princeton.

Los ingenieros preparan sus conferencias en una forma muy diferente de la de los humanistas. En mi experiencia, es costumbre que éstos lean de forma literal un texto y que utilicen pocas gráficas o ilustraciones, si es que llegan a hacerlo. En contraposición, para ilustrar sus pláticas los ingenieros tienden a echar mano de un buen número de diapositivas y material visual —dibujos, diagramas, tablas, gráficas, ecuaciones y demostraciones—, que comúnmente entregan al último momento. Eso no significa que no estén preparados, sino que revisan una y otra vez los materiales visuales y la esencia de los comentarios que los acompañarán. El número y el orden de las diapositivas lo editarán y lo volverán a editar en las semanas que preceden a la plática, por lo que las ilustraciones cumplen el mismo propósito que las notas en fichas. A través de los años, dispositivos mecánicos, visuales y digitales que van desde las linternas mágicas hasta el *software* para computadoras como PowerPoint han facilitado enormemente el proceso para preparar y proyectar diapositivas. Aun así, esto se puede mejorar todavía, como se describe en el primer capítulo de este libro.

Por supuesto, la escritura también se beneficia mucho del uso de las computadoras, aunque un autor nunca debería atribuir al mal funcionamiento de los electrones la deficiencia de sus neuronas. Si he cometido algún error en este libro sólo es culpa mía y no de las personas que me han ayudado de muchos modos. Como siempre, agradezco profundamente a bibliotecas y bibliotecarios, sobre todo a los de la Universidad de Duke, y en particular a Eric Smith y Linda Martínez. En especial, reconozco su auxilio para investigar y obtener oscuras fuentes de referencias incompletas, y por mostrarme bases de datos electrónicas cada vez más amplias. Y estoy una vez más agradecidísimo con la casi anónima pero muy generosa institución de Interlibrary Loan.

También estoy agradecido con Jack Judson, director del Magic Lantern Castle Museum de San Antonio, Texas, quien me guió por su extraordinaria colección de linternas y objetos similares; con Tom Hope, porque me proporcionó datos históricos sobre la invención del proyector de diapositivas; con Robin Young, quien nos invitó a mí y a mi esposa a visitar Stonecrop Gardens y se aseguró de que tuviéramos una buena vista de su puente de piedra; y con Pete Lewis, porque me documentó acerca de los puentes de hierro fundido. Charles Siple, avezado corresponsal y dibujante, fue muy amable al trazar los diagramas de cuñas separadas y un arco basado en mis bocetos de aficionado. Como de costumbre, mi familia tuvo una actitud amabilísima: Stephen Petroski me ayudó a encontrar documentación para apoyar mis afirmaciones sobre el diseño en los deportes, y Karen Petroski mejoró mi conocimiento del internet. Una vez más, Catherine Petroski fue mi primera lectora, y también participó como fotógrafa y proveedora de imágenes y gráficas digitales.

Sam Elworthy, de Princeton University Press, me pidió que escribiera este libro. Estoy agradecido con él por su persistencia para convencerme de presentar la serie de conferencias y preparar un libro sobre diseño. El Comité de Conferencias de la Universidad de Princeton y su presidente, Sergio Verdú, me invitaron para hablar en la serie de conferencias Vanuxem, que datan de 1912. Es un honor para mí unirme a la distinguida lista de conferencistas Vanuxem.

Por último, reconozco la planeación de mi visita, así como la cálida recepción y hospitalidad que los miembros de la comunidad de Princeton nos dieron a Catherine y a mí durante los tres días de las conferencias. Susan Jennings y un excelente equipo audiovisual vigilaron que los detalles electrónicos y mecánicos estuvieran en orden en la sala de conferencias en McCosh Hall. David Billington, quien fue muy generoso con su tiempo, me dejó usar su Archivo Maillart y me permitió entrar a algunas de sus conferencias y conocer a sus alumnos. David y Phyllis Billington, anfitriones gentiles, nos ayudaron a Catherine y a mí a conocer Princeton en el tiempo libre y en situaciones de apremio.

# Introducción

El deseo, y no la necesidad, es la madre de la invención. Las cosas y las ideas nuevas provienen de nuestra insatisfacción con lo existente y de querer algo que cumpla con nuestras aspiraciones. Con más precisión, la creación de nuevos artefactos y nuevas tecnologías surge del fracaso de los existentes, que no hacen lo que se esperaría de ellos o no lo hacen lo bien que uno desearía. La frustración y la decepción con el uso de una herramienta o el funcionamiento de un sistema plantean un reto: mejorarlo. Algunas veces, como cuando una pieza se rompe en dos, el centro de atención para la mejora es obvio. Otras veces, como cuando un sistema complejo corre decepcionantemente despacio, la forma de acelerarlo quizá sea poco clara. En cualquier caso, sin embargo, el principio de una solución reside en aislar la causa del fracaso y concentrarse en cómo evitarla, eludirla, eliminarla o sortearla. Los inventores, ingenieros, diseñadores y usuarios comunes tienen problemas de este tipo todo el tiempo.

Los primeros objetos útiles fueron, por supuesto, los que se encontraban en la naturaleza. No es de extrañarse que estos mismos objetos se convirtieran en las primeras herramientas. De esta manera, las piedras llegaron a usarse como martillos. Que de una piedra en particular se hiciera un buen martillo, dependía de su tamaño y su forma así como de su dureza y resistencia respecto de lo que iba a golpear. Los tipos de piedras con que no se lograron los fines deseados fueron malos martillos y tuvieron que ser superados. Al eliminar los fracasos, resultaron mejores martillos. Sin embargo, incluso las mejores piedras tienen limitaciones como martillos, y en este sentido, la aceptación de su fracaso define el problema de diseño: crear un mejor martillo. Que sea incómodo o poco práctico quizá estén entre los problemas de una piedra-martillo. Se puede buscar una mejora en la forma de la piedra o poniéndole un mango o remplazando la piedra con algo más adecuado. Con el tiempo, una variedad cada vez mayor de cotillos de metal y mangos de madera apropiados para una variedad de tareas reflejaría una creciente especialización y diversificación. Entre esta diversidad, uno esperaría encontrar un mejor martillo para cada tarea en particular. Todos los demás no servirían para esa tarea. Si ninguno de los martillos existentes funcionara de manera adecuada para una tarea novedosa, tendría que inventarse un martillo también

novedoso. A finales del siglo XIX, solamente en Birmingham, Inglaterra, se producían alrededor de 500 tipos de martillos.

Los sistemas tecnológicos también tienen sus raíces en el mundo. Los ritmos circadianos y estacionales de la naturaleza impulsaron el desarrollo de patrones de descanso y migración. Sin embargo, incluso el simple acto de dormir cuando oscurece puede ser muy peligroso, como debe haberse aprendido de modo trágico. Si todos los miembros de un grupo durmieran de manera simultánea, algunos no podrían sobrevivir la noche. Reconocer este fracaso del sistema llevaría naturalmente a ideas como hacer guardias escalonadas o recurrir a otros medios de protección. Así, el grupo podría empezar a dormir en una cueva cuya única entrada pudiera estar protegida con una roca. En última instancia los inconvenientes de la migración llevaron a la creación de los sistemas de agricultura y defensa. Sin embargo, no importa lo desarrollado de un objeto o sistema, éste siempre tendrá limitaciones. No existen utopías mecánicas. Por lo tanto, siempre habrá posibilidad de mejorar. Las mejoras más exitosas son finalmente las que se concentran en las limitaciones, en los fracasos.

El éxito y el fracaso en el diseño están entrelazados. Aunque concentrarse en el fracaso puede conducir al éxito, confiar demasiado en los precedentes exitosos puede conducir al fracaso. El éxito no es simplemente la ausencia de fracaso; también oculta modos potenciales de fracaso. Emular el éxito puede resultar eficaz a corto plazo, pero esta conducta conduce invariable y sorprendentemente al fracaso. De esta manera, podría decirse que *la* piedra-martillo era de un tipo particular de piedra que funcionaba razonablemente bien como martillo para cualquier tarea entonces conocida. Cuando alguien quisiera un martillo multiuso, buscaría ese tipo de piedra, si todavía no se había acostumbrado a llevar una consigo. Sin embargo, con el tiempo surgiría una tarea para la cual la piedra-martillo no funcionaría. Esto pasaría, por ejemplo, cuando el implemento se usara para golpear una piedra recién descubierta pero más dura y resistente, con el propósito de hacerla pedazos. Para sorpresa de todos, la piedra-martillo quedaría destrozada. Los éxitos pasados, sin importar cuán numerosos y universales sean, no constituyen garantía de que ocurran en una nueva circunstancia.

Este libro analiza la acción recíproca entre éxito y fracaso en el diseño y, en particular, describe el importante papel que desempeñaron la reacción y la anticipación del fracaso para lograr el éxito. En vista de que el libro surgió de una serie de conferencias, generalmente la naturaleza de éstas —y específicamente la tecnología de la conferencia ilustrada como un sistema evolutivo— sugiere que ellas mismas constituyan el tema con que se comience. Desde sus precursores hasta la linterna mágica, desde el retroproyector y el proyector de diapositivas de 35 mm hasta las presentaciones de PowerPoint hechas en computadora y proyectadas mediante dispositivos digitales, muestran que las mejoras sucesivas han sido

motivadas y han surgido como reacción a los fracasos reales y percibidos de los primeros medios —y los sistemas en los cuales funcionaban— para realizar lo que se podría imaginar en el contexto de tecnologías en desarrollo permanente y la consecuente introducción de nuevas expectativas.

La gran mayoría de los usuarios de una tecnología se adaptan a sus limitaciones. En efecto, usar cualquier objeto es aceptar implícitamente sus limitaciones. Pero es parte de la naturaleza humana querer usar los objetos más allá de sus límites. Aunque un puntero de madera sólo se puede hacer tan largo hasta el grado en que se vuelva demasiado pesado y difícil de manejar en un escenario, invariablemente queremos extender su alcance. Como resultado, un conferencista tendría que entrar al campo de una imagen proyectada para señalar un detalle, cubriendo así una parte de ella. Por supuesto, las limitaciones del puntero de madera se volvieron discutibles con la creación del puntero láser, que tiene sus propias limitaciones. Su mayor “alcance” significa que el movimiento de su “punto” se amplifica en una mano temblorosa. Además, la luz del puntero láser no permite que se toque la pantalla de proyección para señalar. También, algunas veces es difícil distinguir el punto rojo del puntero entre los puntos rojos de datos dispersos. El avance tecnológico no es una mejora tecnológica ilimitada.

La mayoría de los objetos tienen más de un propósito, que obviamente complica cómo deben estar diseñados y cómo, por lo tanto, pueden fallar. Mientras más complicado es el problema de diseño, la solución es naturalmente más difícil y por consiguiente es más probable que algunos detalles y características se puedan pasar por alto, sólo para que su ausencia ocupe un lugar preponderante una vez que el objeto se ha fabricado o construido y puesto a prueba. Y el fracaso se puede manifestar en formas extrafuncionales, entre ellas la incapacidad de un producto para mantener sus acciones en el mercado, decepcionando de este modo a los gerentes, directores y accionistas de la compañía. El mal desempeño, ya sea en el laboratorio o en el libro de contabilidad, señala un fracaso que se deberá encarar. Estos asuntos se analizan con muchos ejemplos en el segundo capítulo y en los capítulos subsiguientes.

No sólo son los objetos concretos como proyectores y punteros los que plantean problemas en el diseño y sus limitaciones. Entre los objetos intangibles que se consideran en el tercer capítulo se encuentran algunos intelectuales y simbólicos como las constituciones y las banderas nacionales, donde el fracaso en prever que tengan una carga política que no agrade a los electores potenciales puede ser desastroso. Las estrategias para jugar deportes como el básquetbol, aunque tal vez con menores consecuencias que en las contiendas políticas, también son cuestiones de diseño, y el fracaso de un entrenador para defenderse de una ofensiva o enfrentar a un tirador hábil con un defensa tenaz puede terminar en un

partido decepcionante tanto para los jugadores como para los espectadores. El diseño exitoso, ya sea en objetos sólidos o intangibles, reside en anticipar cómo puede o podría ocurrir el fracaso.

El fracaso es por lo tanto un principio unificador en el diseño de objetos grandes y pequeños, duros y suaves, reales e imaginarios. El cuarto capítulo hace hincapié en la identidad del problema de diseño en todo tipo de objetos. Sin importar qué se está diseñando, el éxito se alcanza anticipando y evitando el fracaso de manera adecuada. Ya que los capítulos anteriores se centran principalmente en objetos y circunstancias más pequeños y bien definidos, este capítulo también presenta ejemplos de objetos y sistemas más grandes, como la máquina de vapor y el ferrocarril. Con la identidad subyacente del proceso de diseño establecido, el análisis se centra en las diferencias de comportamiento de objetos pequeños y grandes. En particular, el proceso de pruebas, durante el cual con frecuencia se descubre primero un modo no anticipado de fracaso, necesariamente debe variar. Los objetos pequeños, que típicamente se producen en números sorprendentemente grandes, se pueden poner a prueba con muestras. Sin embargo, las cosas muy grandes, que esencialmente se construyen por encargo o de manera única, no presentan esa misma oportunidad. Y, debido a su escala, el fracaso de las grandes estructuras o máquinas puede ser devastador en todos los sentidos, en especial el económico.

Los capítulos restantes se concentran exclusivamente en objetos grandes. El quinto capítulo considera edificios, en especial edificios altos y superaltos. Aunque el deseo de construir alto no se originó con el rascacielos, es en ese género de la arquitectura y la ingeniería estructural donde el fracaso puede tener las consecuencias de mayor alcance. La decisión de construir alto es a menudo una decisión de ego e hibris, cualidades que no con poca frecuencia se originan y degeneran en defectos de carácter humanos que pueden conducir a defectos estructurales. En el siglo XXI, las limitaciones a la altura de los edificios no son tan estructurales como mecánicas, económicas y psicológicas. Los ingenieros estructurales saben cómo construir edificios mucho más altos que los que existen hasta ahora, pero también comprenden que la altura escasea sólo debido a espacio y dinero. Mientras más altos sean los edificios, más personas deben ser transportadas de manera vertical en elevadores. Mientras más elevadores se necesiten, se deben proporcionar más huecos para éstos, que ocuparán un volumen cada vez mayor. Esto reduce el espacio de oficina disponible por piso, lo que a su vez amenaza la viabilidad económica de la empresa. No obstante, por razones de orgullo y esfuerzo, se continuarán construyendo edificios más altos. Aun así, no importa cuántos edificios superaltos se levanten alrededor del mundo, su éxito no garantiza el de sus imitadores. El colapso de las Torres Gemelas del World Trade Center de Nueva York demostró que agentes externos no anticipados (y debilidades internas

no percibidas) pueden crear escenarios que provoquen nuevos modos de fracaso.

En el sexto capítulo, la atención del libro se centra en los puentes, que ofrecen un estudio paradigmático de la naturaleza paradójica del éxito y el fracaso en el diseño. Construir con demasiada seguridad puentes más largos inspirados en diseños exitosos anteriores es una fórmula para el fracaso, como se ha demostrado y documentado en repetidas ocasiones en el último siglo y medio. Los diseñadores del primer puente de Quebec, por ejemplo, estaban animados por el éxito del puente de Forth y decidieron mejorarlo con una estructura del mismo tipo pero más ligera y más larga. Desafortunadamente, el puente de Quebec se derrumbó mientras estaba en construcción, suceso que trajo la forma en ménsula (cantilever), en la que se basó una reputación de la cual todavía tiene que recuperarse en el mundo de la construcción de grandes puentes. Aunque el puente de Quebec se rediseñó y reconstruyó exitosamente y hoy se levanta como símbolo de la determinación de Canadá, desde entonces no se ha intentado construir ningún puente en ménsula de mayor arco. El puente de Tacoma Narrows, el tercero colgante más largo cuando se terminó en 1940, demostró que tenía una cubierta demasiado estrecha y ligera, lo que explicó su derrumbe sólo unos meses después de que se abrió a la circulación. Un ingeniero relativamente desconocido que no estaba investido de ego por el diseño había advertido sobre la excesiva estrechez de la cubierta, pero sus objeciones fueron rechazadas por la hibris y la influencia del consultor de diseño, cuya confianza en su teoría estaba respaldada por numerosos éxitos anteriores. Estos ejemplos proporcionan advertencias contra la extrapolación basada en el éxito en el diseño. El éxito pasado no es garantía de que no habrá un futuro fracaso.

El capítulo final considera el registro histórico de fracasos colosales, especialmente en el contexto del programa de transbordadores espaciales y de puentes de gran arco. En cuanto a éstos, hay un asombroso patrón temporal de un fracaso de mayor importancia que sucede aproximadamente cada 30 años desde mediados del siglo XIX y continúa a través del milenio. Todos los sonados fracasos que ocurrieron en este lapso fueron resultado de diseños basados en precedentes exitosos más que de una esencialmente cauta anticipación y elusión del fracaso. Esta evidencia convincente aboga por una mayor conciencia entre los diseñadores de la historia de la tecnología con que trabajan, pero mirar hacia atrás generalmente no está en la naturaleza de los ingenieros progresistas que se hallan a la vanguardia. Aun así, el patrón histórico ha sido persistente, y debería ser convincente. Incluso sugiere que se puede esperar que ocurra el derrumbe serio de un puente alrededor del año 2030. Esta predicción gana credibilidad por el hecho de que la construcción de puentes en el siglo XXI continúa de una manera poco diferente a la que precedió a los fracasos de los puentes de Quebec, Tacoma Narrows y otros demasiado osados. Pero los fracasos no son inevitables, por supuesto, ya que si lo fueran no habría avance tecnológico.

De hecho, los fracasos futuros pueden anticiparse y de ese modo evitarse si se valoran los hechos del pasado, que en general revelan caso tras caso una relación incontrovertible si bien paradójica entre el éxito y el fracaso en el proceso de diseño.

Puede ser que el fracaso y las reacciones a éste no expliquen todos los aspectos de cada diseño, pero desde la perspectiva ingenieril de este libro se presenta como un tema unificador para describir la evolución funcional de las cosas. En particular, aquí la acción recíproca entre el fracaso y el éxito en la creación de artefactos y sistemas tecnológicos se presenta como una importante fuerza impulsora en el proceso inventivo. La mayoría de los ejemplos se han tomado de los campos de la ingeniería mecánica y civil, en los cuales el autor tiene la experiencia más directa. Existen, por supuesto, incontables ejemplos además de dispositivos mecánicos y estructuras civiles que se le pueden venir a la mente al lector para comprobar las hipótesis paradójicamente opuestas de que el fracaso impulsa el diseño exitoso y que en última instancia ese éxito puede amenazarlo. Pero la génesis de este libro estableció que no ocuparía más de un estrecho espacio en el estante de una biblioteca, y por lo tanto no pudo ser demasiado abarcante. De ahí su enfoque en lo funcional. Existen numerosos factores que afectan al diseño —incluidos los estéticos, culturales, económicos, egoístas, éticos, históricos, políticos y psicológicos— pero ningún libro puede esperar decir todo sobre todo.

# I. De la caverna de Platón a PowerPoint

*Should we not illustrate our lectures, and cease to lecture about our illustrations?*

[¿No deberíamos más bien ilustrar nuestras conferencias en vez de conferenciar nuestras ilustraciones?]

C. H. Townsend[1]

Imagina cualquier lugar en cualquier momento. Ahí, en una noche totalmente despejada, las sombras que proyecta la luna llena iluminan el paisaje como si fuera un escenario. Un observador silencioso y paciente podría observar las imágenes iluminadas de la flora y la fauna tomar forma, acechar y hacer mutis, interpretando un drama nocturno bajo las estrellas. Mientras la luna avanza en el cielo, las sombras merodean lenta pero inexorablemente, acortándose y alargándose bajo la luz lunar. Al amanecer, el sol indica un nuevo acto.

Desde el principio del sistema solar, el escenario ha estado preparado para estos dramas de luz y sombra. Por ello son algo común. Sin embargo, con frecuencia lo común sirve de base para lo extraordinario. Cualquier luz, por supuesto, proyectará sombras. El fuego, llama parpadeante, puede agregar misterio y nerviosismo al teatro, los sombríos actores retrocediendo ante el calor. Por milenios, las noches de nuestros antepasados transcurrieron a la luz de las llamas manteniendo alejado a un público salvaje.

La luz del día produce una inversión del escenario —e imágenes que todos hemos observado de vez en cuando surgen “completamente independientes de la invención y el control del hombre”—. En una habitación oscurecida con persianas contra un sol brillante, la pared contraria puede mostrar una repentina imagen invertida de una escena exterior. Una vaca pastando a lo lejos, tal vez, o una nube flotando, pueden ser llevadas por la luz a través de un agujero en la madera como agua a través de la pequeña abertura de un tanque. Asimismo, en el suelo ensombrecido por un árbol, puede ser lanzado un rayo de sol a través de “aberturas entre las hojas”. Éstos son fenómenos perfectamente naturales que no necesitan de un lente ni de arte de magia para producirse.[2]

Sin embargo, con frecuencia lo que vemos proyectado es producto del diseño. La alegoría de la caverna de Platón implica un drama controlado de iluminación e imágenes. En el diálogo con su joven discípulo Glaucón, Sócrates describe a prisioneros que han vivido desde

su infancia en una guarida, donde se sientan de espaldas a la entrada y están sometidos de tal forma que sólo pueden mirar el muro que se halla directamente enfrente de ellos. Detrás arde el fuego y proporciona una fuente de luz. Entre los prisioneros y las llamas hay un pasillo elevado, y cualquier cosa que se mueva en él proyecta una sombra en la pared. Para los prisioneros, estas sombras son la extensión de su experiencia y por lo tanto se convierten en su realidad.[3]

Después de describir la situación de la cueva, Sócrates propone que se libere a uno de los prisioneros y se le permita ir hacia la entrada de la caverna y ver el fuego y también a los actores y sus cargas que han estado proyectando las sombras. ¿Qué será más real para el cautivo liberado, pregunta Sócrates, lo que ahora ve en persona o lo que ha visto como sombras toda su vida? Y si el prisionero es forzado a ver directamente la fuente de la luz, pregunta Sócrates más adelante, ¿acaso no quedará ciego y deseará regresar al muro de la cueva, donde las imágenes son definidas y más familiares?

Después Sócrates imagina que el cautivo es liberado de la cueva y expuesto a la experiencia directa del sol y todo lo que éste ilumina. Primero el prisionero quedaría cegado por el brillo, pero con el tiempo se acercaría a ver el mundo fuera de la caverna tal como es. Si entonces regresara a la cueva y se sentara entre los prisioneros que han permanecido allí, sus descripciones de las fuentes de las sombras y de la realidad exterior se recibirían con escepticismo. Mejor permanecer en la cueva, dirían los reclusos, que salir y regresar sin una visión clara.

Grandes avances filosóficos y técnicos se han hecho desde la Antigüedad, contribuyendo de diferentes maneras al entendimiento de la realidad y a capturarla en medios más tangibles que las sombras. La cámara oscura permitió a los artistas capturar vistas fugaces de una realidad no distorsionada y en una perspectiva apropiada, aunque al revés. David Hockney ha afirmado que los pintores del Renacimiento empleaban esta tecnología para producir sus obras maestras casi “fotográficas”. [4]

El uso de fijadores químicos para congelar imágenes en la cámara óptica —a la cual el precursor de la fotografía, William Henry Fox Talbot, se refirió como “el lápiz de la naturaleza”— hizo posible retener las alas de las aves en vuelo, las colas de los gatos en caída libre y las pezuñas de los caballos a todo galope. Este desarrollo tecnológico y su consecuente realismo mecánico allanaron el camino para el arte moderno no figurativo. Ahora, la imagen digital ha hecho posible injertar la cabeza de un león en el cuerpo de un águila, probando con ello la existencia de los grifos, si podemos confiar en nuestros ojos.

El progreso en la óptica, la química, la electricidad y las computadoras al mismo tiempo nos ha liberado de la caverna de Platón y nos ha encadenado a otra. Actualizada, la alegoría de la caverna podría plantearse de la siguiente manera. Un grupo de personas están sentadas

en una habitación cavernosa, dominadas por un paradigma preponderante. Las sillas en que están sentadas se encuentran sujetas fuertemente al piso y entre sí, y las imágenes en una pantalla frente a las personas hace que todas estén absortas. Observan lo que se proyecta desde una cabina en la parte posterior de la habitación, en la que a veces olvidan que están. Ocasionalmente, una cabeza proyecta una sombra en la pantalla y los miembros del grupo se mueven ligeramente para cerciorarse de si es la suya. A las imágenes en la pantalla las acompañan comentarios que hace una voz incorpórea proveniente de bocinas distribuidas en la habitación. De cuando en cuando un punto rojo se mueve entre las imágenes como una mosca sobre un caballo, e ilumina un sitio. La voz continúa describiendo las imágenes y lee las palabras que se proyectan en la pantalla. Las imágenes y las palabras son definidas y brillantes y son la realidad del momento. Aparecen y desaparecen como sombras en una noche de nubes irregulares.

Esta caverna moderna de Platón obviamente podría ser un auditorio en el que se está haciendo una presentación de PowerPoint. PowerPoint es, por supuesto, el programa informático producido y comercializado por Microsoft, pero también es un objeto, en el sentido de que fue inventado y se ha diseñado y rediseñado —tanto por el fabricante como por el usuario—. Continúa evolucionando con más parafernalia de accesorios y nuevos usos más ingeniosos. Sin embargo, a diferencia de la tapa de un frasco o un paraguas, este objeto no es algo que podamos tocar con los dedos o sostener en la mano. Es intangible. No es *hardware*. Es un *software* diseñado para usarse dentro de un sistema de computadoras y proyectores y pantallas, orador y público. PowerPoint es un objeto que permite al usuario conseguir un propósito, concretamente, el diseño de una “proyección de diapositivas”, que también implica toda una gama de posibilidades. De este modo, el lenguaje de PowerPoint, como el lenguaje de todo lo fabricado, tiene un origen antiguo, ya que mucho antes de que hubiera computadoras digitales había necesidad de mostrar imágenes frente a un público de forma que todos pudieran verlas de manera simultánea.

Entre las obras de arte permanentes más antiguas que aún subsisten se encuentran los dibujos en las paredes de cuevas de Francia, India y otros lugares del mundo. Estas pinturas rupestres tal vez no se hicieron estrictamente por razones estéticas sino como ilustraciones y diagramas esquemáticos ante los cuales se reunían neófitos para ser instruidos por los ancianos en el arte de la guerra, o ante las cuales los grupos de caza recibirían instrucciones sobre la estrategia previa a la retirada. Se ha especulado que los petroglifos antiguos que fueron encontrados en California se dibujaron para registrar la actividad sísmica en el área.<sup>[5]</sup> Quizá estas pinturas rupestres también servían para ayudar a comunicar la naturaleza de los terremotos y las reacciones ante éstos.

Las esculturas e inscripciones en piedra son tan antiguas como las civilizaciones. Entre los

jeroglíficos que se conservan hay representaciones de cómo mover estatuas pesadas, diagramas de un valor obviamente educativo para un equipo de transportistas reunido frente a ellas. Los obeliscos tienen grabados diagramas que muestran cómo fueron erigidos. Asimismo, piedras y maderos encontrados en sótanos, desvanes y otros lugares menos accesibles de estructuras góticas y medievales han revelado bosquejos y cálculos de los canteros y carpinteros —tal vez trazados solamente para aclarar su propio pensamiento o dibujados para enseñar a algún aprendiz—. Hasta el día de hoy no es poco común encontrar estos *graffiti* de ensayo o enseñanza en muebles o en sitios en construcción.

En los lugares para la educación formal e informal se ha utilizado material visual desde hace mucho tiempo. Hace apenas medio siglo, los pizarrones eran mobiliario estándar en los salones y salas de conferencias, y muchos profesores y catedráticos se enorgullecían de su trabajo en el pizarrón. Pero los pizarrones, como todos los objetos fabricados, tenían sus limitaciones, entre las cuales se encontraba su propensión a empolvarse después de borrar varias veces y la dificultad para ser leídos si no había la luz ideal. Los llamados pizarrones blancos, que con frecuencia se promovieron como los sucesores de los pizarrones negros, se volvieron comunes en la última parte del siglo XX. Los plumones multicolores que se usaban en los pizarrones blancos eran aparentemente una gran mejora sobre el gis que, como se sabe, es muy quebradizo. Desafortunadamente, los plumones para pizarrón blanco despiden gases que distraen si no es que intoxican, y tienden a secarse, dejando una marca demasiado tenue como para verla con facilidad.

No todos los conferencistas podían adquirir la facilidad de escribir y dibujar en un pizarrón negro o blanco. Aunque algunos se sentían orgullosos de su habilidad (por lo general muy practicada) de producir una caligrafía de calidad Palmer en la superficie vertical de un pizarrón, la mayoría ni siquiera podía mantener las líneas al mismo nivel o las pendientes paralelas. Dibujar era especialmente difícil para quienes no eran artistas, pero era una tendencia para un naturalista o un arquitecto que intentara construir una imagen fiel de flora, fauna o fachadas. De ahí que cualquier dispositivo que se pudiera emplear para proyectar dibujos realizados detenidamente durante el tiempo libre, o imágenes copiadas de la naturaleza o de fuentes con acceso a mejores dibujantes o, en los últimos tiempos, fotógrafos, habría sido recibido con entusiasmo. Sin embargo, de acuerdo con una encuesta histórica de proyección óptica,

nadie sabe quién fue el primero en arreglar una habitación oscura con una pared o una pantalla blanca de un lado, y al otro una pequeña abertura frente a algún objeto o escena que se pudiera iluminar intensamente. Todo lo que sabemos es que las primeras noticias de imágenes en un lugar oscuro están relacionadas con algunos otros fenómenos, y no tenían el propósito de mostrar que esas imágenes eran posibles. También se reconoció en las más antiguas proposiciones, como en las obras de Aristóteles y de Euclides, que [así] como los rayos luminosos se extienden en línea recta [...] los de un objeto deben cruzarse al pasar a través de un pequeño agujero, y de ahí las imágenes más allá del agujero en el lugar oscuro se invierten, con lo que la parte superior es la inferior y el lado derecho el izquierdo.[6]

Así que el problema de la proyección no era nuevo ni siquiera en la Antigüedad, y tampoco las soluciones en la Edad Media. La cámara oscura, o “cámara negra”, aunque no necesariamente con ese nombre, se describió en el siglo XI<sup>[7]</sup> y fue mencionada por Leonardo a finales del siglo XV.<sup>[8]</sup> Se basaba en el principio de un pequeño agujero en un muro que era la fuente de una imagen invertida proyectada en el muro opuesto. Utilizar una fuente de luz artificial en lugar del sol habría permitido que las imágenes se proyectaran en un muro incluso en la noche. Ya en el siglo XV o XVI, se decía que los sacerdotes sicilianos estaban “usando linternas de construcción no descrita con diapositivas pintadas a mano” para producir visiones.<sup>[9]</sup> Como las visiones de cualquier forma tienden a ser etéreas, la calidad de la imagen proyectada no necesitaba ser muy nítida para ser efectiva. Giambattista della Porta, cuyo *Magiae naturalis* apareció a mediados del siglo XVI, fue el primero en describir el uso de “un lente convexo para perfeccionar las imágenes y de colocar dibujos transparentes en el lado opuesto a la abertura”. Además, “a estas imágenes les agregaron partes móviles, y de este modo produjo efectos asombrosos, que los incultos atribuían a la magia, un término asociado a la linterna desde entonces”<sup>[10]</sup> (a mediados del siglo XIX, después de que las diapositivas fotográficas comenzaron a utilizarse en la “linterna mágica”, un conferencista deseaba “un nombre algo más científico, no tan común, para nuestro instrumento”).<sup>[11]</sup>

En el siglo XVII se hicieron versiones mejoradas de la *linterna mágica* y las usaron médicos, matemáticos y filósofos naturales, entre ellos Johannes Kepler y Christiaan Huygens, a quien con frecuencia se le da incorrectamente crédito de la invención de la linterna mágica en la década de 1650.<sup>[12]</sup> Naturalmente, la fuente de luz fue un componente crítico del proyector, y en 1671 Athanasius Kircher hizo “una versión elegante” que incorporaba “un cilindro de estaño pulido que sostenía un espejo cóncavo y una vela”. Durante el siglo XVIII, la linterna mágica —que también se conocería como esciopticón o estereopticón— se utilizó para entretener a los niños. Después, los empresarios “utilizaron el dispositivo para producir ilusiones ópticas que engañaran a grupos espiritualistas”. Estas ilusiones eran más que nada fantasmagoría,<sup>[13]</sup> un término que vino a significar un despliegue elaborado de ilusiones y efectos ópticos gracias a los cuales “se producen figuras aterradoras, que parecían acercarse al público desde una distancia asombrosa y después alejarse de nuevo; o aparentemente elevarse hasta el techo, y después descender al piso”.<sup>[14]</sup> Estos usos de una versión de mano oculta puede haberle ganado a la linterna mágica la etiqueta de “la linterna del miedo”.<sup>[15]</sup>

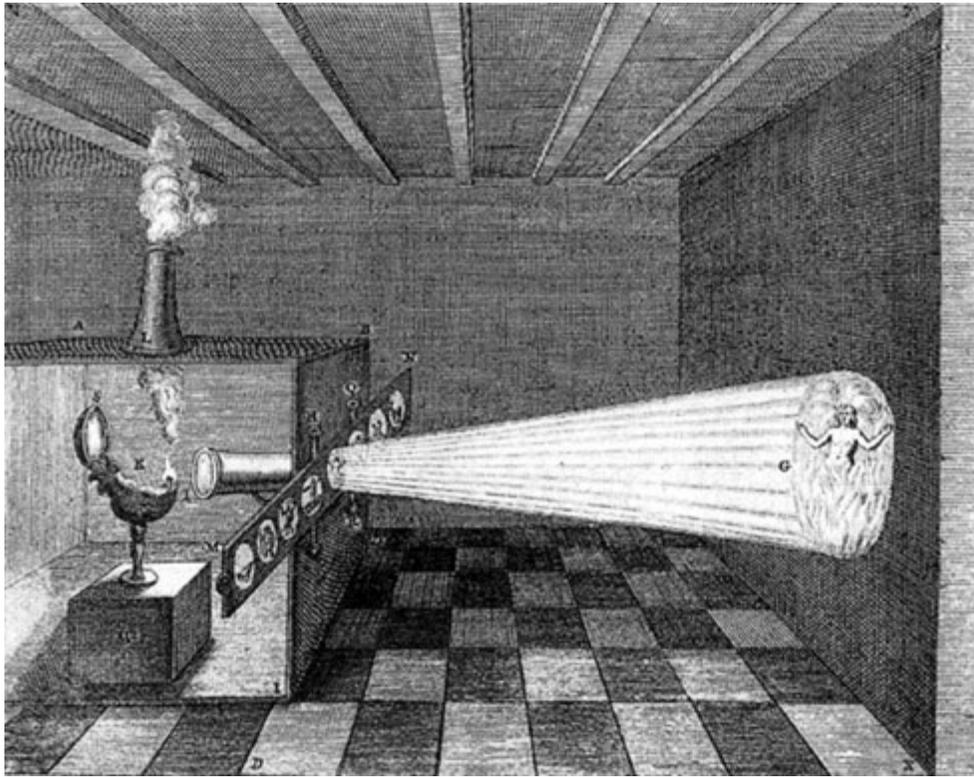


Figura 1. Una de las primeras linternas mágicas fue ilustrada en la segunda edición del tratado de Athanasius Kircher *Ars magna lucis et umbrae*, 1671.

En el siglo XIX, la linterna mágica básica solía estar hecha de estaño, tenía en su interior una lámpara de aceite y una chimenea a través de la cual salía el humo. Un lente o un conjunto de lentes, conocidos como “ojos de toro”, se colocaban frente a la fuente de luz para difuminarla de manera uniforme así como para proyectar cualquier objeto o imagen interpuesta.[16] Aunque las lámparas de aceite eran fuentes de iluminación adecuadas para sesiones de espiritismo o pequeños espectáculos, se aconsejaba la utilización de mejores instrumentos para las conferencias científicas y grandes espectáculos. A principios del siglo XIX, el químico estadounidense Robert Hare “descubrió que si se aplicaba una llama de oxígeno e hidrógeno al calcio lo volvía incandescente, lo que daba una luz deslumbrante”, a la que se le llamaría *luz de calcio*. Los inventores ingleses adaptaron y perfeccionaron el hallazgo al punto en que Henry Langdon Childe “proyectó sus imágenes en pantallas enormes en las salas más grandes de Londres”. Su uso de “imágenes desvanecidas” en conjunción con la luz de calcio, que utilizaría en su “Grand Phantasmagoria” durante la inauguración del Instituto Politécnico de Londres en 1838, “se volvió una parte esencial de la linterna de proyección” desde mediados de la década de 1820 hasta finales de siglo.[17] A principios del siglo XX unas linternas mágicas más pequeñas estuvieron “muy de moda para regalos de Navidad”. [18]

Aunque se emplearon popularmente como un medio de entretenimiento, en el cual los asistentes podían ver un espectáculo de imágenes por una cuota, en última instancia las

linternas mágicas y sus diapositivas “tuvieron el impacto más grande en las conferencias educativas, especialmente en las disciplinas visuales. Desempeñaron un papel vital en el avance de disciplinas como el arte y la historia de la arquitectura, haciendo posible el estudio detallado de objetos y lugares de todo el mundo”.<sup>[19]</sup> A finales del siglo XIX “se aplicaron las diapositivas para linterna a propósitos educativos, representando el primer formato audiovisual utilizado en una era de creciente interés en la educación visual”.<sup>[20]</sup> Sin importar su aplicación, durante este periodo se emplearon diversas fuentes de iluminación nuevas y mejoradas para diapositivas para linterna, incluidas las lámparas de queroseno que usaban mechas planas, lámparas que quemaban magnesio y lámparas de arco, que resultaron más convenientes ya que las centrales eléctricas eliminaban la necesidad de numerosas pilas. Con el tiempo, se crearon bombillas incandescentes suficientemente poderosas y se utilizaban cuando estaba disponible una fuente de electricidad.<sup>[21]</sup> En la ciudad de Nueva York a principios del siglo XX había conferencistas de arte “que mostraban fotografías en color de las grandes pinturas de Europa, cuyos originales nunca se habían visto”.<sup>[22]</sup> Las presentaciones con linterna “fueron un sustituto de los viajes costosos y físicamente difíciles” y no “tenían nada que envidiar a las noveluchas como fuente de aventura”.<sup>[23]</sup> Un crítico escribió en 1912: “Dar una conferencia con ilustraciones de linterna casi ha remplazado al discurso serio bien preparado, tanto que éste se ha convertido en una rareza”.<sup>[24]</sup> A finales del siglo XIX y principios del XX, el término “conferencias ilustradas” era sinónimo de “conferencias públicas ilustradas con diapositivas para linterna mágica”.<sup>[25]</sup>

Por más brillante que fuera la fuente de iluminación, una conferencia ilustrada solamente era tan buena como sus imágenes. Las antiguas diapositivas naturalmente se dibujaban a mano. En la década de 1840, poco tiempo después de la introducción de la fotografía, los daguerrotipistas vieron en la linterna un medio para proyectar imágenes fotográficas. Sin embargo, ya que los daguerrotipos eran opacos, se tendría que usar otro medio. Los hermanos William y Frederick Langenheim, de Filadelfia, adaptaron un proceso francés para producir negativos de cristal, de los cuales imprimían imágenes positivas en diapositivas de cristal apropiadas para la proyección. Sus primeras diapositivas fotográficas para linterna fueron producidas y exhibidas en 1849, y “para el verano de 1851 habían publicado 126 diapositivas, entre ellas vistas de Filadelfia, Washington y Nueva York, así como retratos de personajes destacados de la época”. Los Langenheim han sido reconocidos como los inventores de la “fotografía diapositiva”, una opción económica ante las diapositivas dibujadas a mano. Patentaron sus “hialotipos”,<sup>[26]</sup> que usaban cristal tanto para las impresiones positivas como para las negativas,<sup>[27]</sup> y las expusieron en la Gran Exposición de Londres. La compañía Langenheim llegó a ser “bien conocida como el mejor fabricante de diapositivas de cristal para linterna mágica”, y al promover las diapositivas usaban “ocho

linternas mágicas o estereopticones dirigidos simultáneamente a una pantalla”, sin duda usando una variedad de efectos.[28]

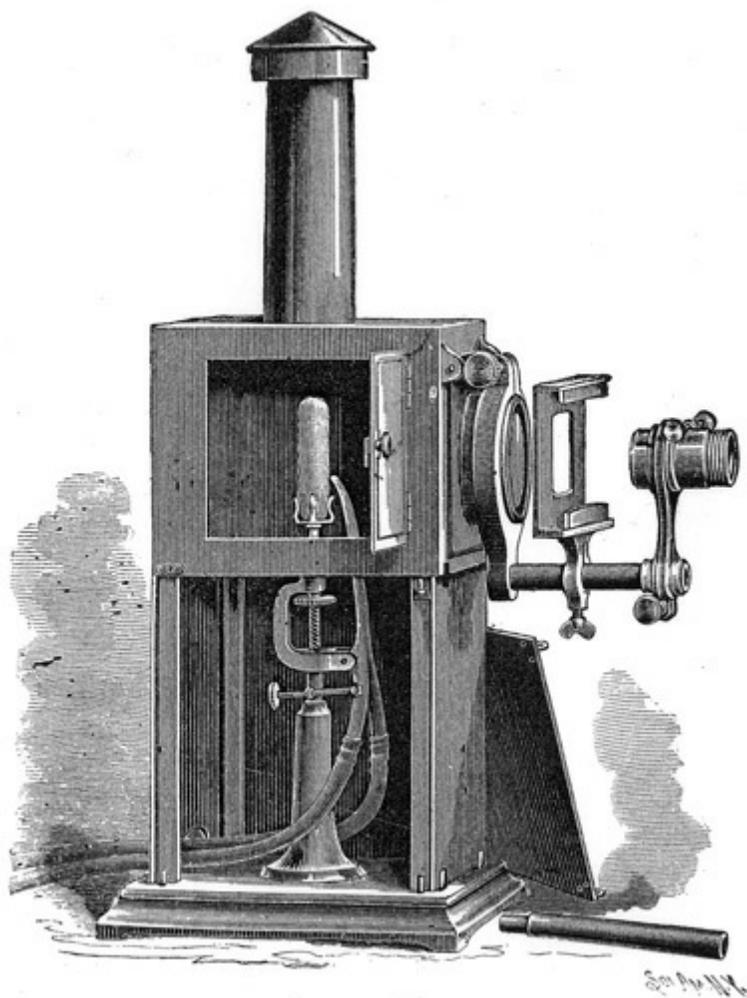


Figura 2. La luz de calcio aún se utilizaba como fuente de iluminación en algunas de las primeras “linternas científicas” de principios del siglo XX. (De Scientific American Supplement, 1905.)

Naturalmente, el éxito de los Langenheim atrajo a muchos competidores. En 1874 la compañía Benerman & Wilson de Filadelfia ofrecía una amplia selección de imágenes, que contenía un “gran stock exclusivo de las célebres producciones de Messrs. J. Levy & Co., de París”. De acuerdo con un anuncio que apareció en *The Magic Lantern*, las diapositivas incluían imágenes de toda la Europa continental, el Lejano Oriente y los Estados Unidos. “Diapositivas sencillas en color y diapositivas cómicas para linternas de todo tipo” se conseguían en Benerman & Wilson “a precios bajos”. Se podía adquirir un “equipo de linterna” por 100 dólares.[29] La compañía también proporcionaba esciopticones, linternas mágicas “superiores y populares” inventadas y fabricadas en Filadelfia por Lorenzo Marcy. El esciopticón era capaz de proporcionar “una luz muy poderosa, dando un brillante disco de tres metros de diámetro” y tenía lentes condensadores “más grandes de lo común”. [30]

En una de las primeras crónicas sobre el uso de las diapositivas para linterna la proyección de las “extraordinarias dimensiones de seis metros de diámetro” ante “un gran número de espectadores al mismo tiempo”, fue aclamada por ser “tan interesante y tan hermosa como pocas cosas ligadas a la fotografía”. Las “fotografías perfectas” estaban “colocadas detrás de los lentes condensadores de la linterna de oxihidrógeno”, y la proyección de diapositivas se describió como “la exhibición de lo que se conoce técnicamente como ‘fotografías iluminadas’”. Se consideró “mejor usar dos linternas y mostrar las fotografías como ‘imágenes desvanecidas’”. Pero cuando se mostraron las diapositivas de esculturas se pensó que “un resultado mucho más efectivo” se “obtendría lanzando primero a la pantalla, con la linterna de repuesto, un disco de luz azul”.<sup>[31]</sup> Las diapositivas de acción montadas en fotogramas colocados con palancas, manivelas u otros medios para alternar las escenas se utilizaban para producir imágenes en movimiento. Al voltear dos o más imágenes relacionadas se podían producir dibujos animados (como un hombre ladeando su sombrero).<sup>[32]</sup> El pintor de diapositivas inglés C. Constant “se hizo inmortal al pintar el original de la diapositiva de fama mundial del hombre durmiendo y tragando ratas”.<sup>[33]</sup> Con frecuencia la acción estaba acompañada de “resoplidos y ruidos, con todos los efectos de sonido esenciales e indecorosos proporcionados por el conferencista o linternista”.<sup>[34]</sup> El “caballero en la cama tragando ratas” podía ser el “punto culminante de todo el entretenimiento”. Como asistente a una “presentación para niños pobres e indigentes”, recordaba un caballero años después, “ése era nuestro momento estelar, nuestro vivo retrato, nuestro cine. Él era todo. Él completaba todas las largas y a veces aburridas conferencias que teníamos que escuchar, aunque estuviera ‘acompañado por Imágenes Desvanecidas’. Queríamos vida y movimiento, y cuando el caballero aparecía en la pantalla se había alcanzado el clímax de toda la función, y el placer se terminaba”.<sup>[35]</sup>

Mientras el público disfrutaba las conferencias ilustradas o parte de ellas, se presentaban —como siempre— problemas con la tecnología. Las primeras diapositivas fotográficas en cristal se montaban en marcos de madera de tamaño desigual, o los de un fabricante no ajustaban bien con la linterna de otro. Un crítico británico escribió que “debemos adoptar un calibre estándar para nuestros cristales, por decir nueve centímetros cuadrados para imágenes de uso general de la linterna”.<sup>[36]</sup> Cuando más o menos se estandarizaron, una típica diapositiva para linterna europea medía  $8.25 \times 10.15$  cm, y su forma alargada hacía que fuera más fácil orientarla.<sup>[37]</sup> Sin importar su tamaño, la diapositiva estaba formada típicamente por dos piezas de cristal. En una estaba impresa la imagen fotográfica, que se protegía colocando la segunda pieza de cristal (claro) sobre ésta. La cinta alrededor de las orillas no sólo mantenía juntas las partes de la diapositiva sino que evitaba que la basura se metiera entre los cristales. Por lo general, a la imagen sándwich se incorporaba una máscara

opaca, mate, o marco que “servía para excluir detalles externos en la orilla de la imagen, y los marcos de figuras circulares y ovalados, entre otras cosas, se consideraban una mejora estética”, en que también podía grabarse el nombre de la compañía fabricante. El encarte “también servía para ocultar los defectos de los lentes baratos, que tendían a hacer difusas las orillas de la imagen”.<sup>[38]</sup>

Aunque las diapositivas para linterna en color pintadas a mano fueron comunes por mucho tiempo, la diapositiva fotográfica en color no apareció hasta el siglo XX, “utilizando algunos de los primeros procesos fotográficos en color”.<sup>[39]</sup> En 1929 la Biblioteca Pública de Chicago mantuvo en circulación una colección de 50 000 diapositivas para linterna —en blanco y negro y en color—.<sup>[40]</sup> Con frecuencia se almacenaban selecciones más pequeñas y se transportaban en estuches del tamaño de una caja de zapatos con asa para cargarlos. En vista de que guardar las diapositivas en el orden y la orientación apropiados siempre era una preocupación, algunas cajas estaban diseñadas para abrirse en dos mitades iguales. Mientras se mostraban las diapositivas, que tenían que cargarse una a la vez, se podían poner en orden (pero al revés) en la mitad vacía de la caja. Cuando terminaba la presentación y la caja se cerraba, todas las diapositivas estaban de nuevo en orden.<sup>[41]</sup> La película *La sonrisa de Mona Lisa*, en que la protagonista es una maestra de historia del arte de la universidad de Wellesley durante el año académico 1953-1954, cuando las diapositivas para linterna aún estaban en uso en su disciplina, prueba la perdurable importancia de los estuches de diapositivas.

Fuera del ámbito académico y de la sociedad ilustrada, la popularidad de las presentaciones de diapositivas para linterna había comenzado a disminuir mucho antes. A principios de la década de 1890, Thomas Edison había creado un sistema para llevar las películas al celuloide, y los hermanos Louise y Auguste Lumière hicieron la primera presentación pública de su cinematografía en 1895.<sup>[42]</sup> Con frecuencia, el primer aparato cinematográfico estaba “combinado con un dispositivo de proyección de diapositivas”, para exhibir anuncios y diapositivas de funciones futuras mientras se cambiaban los rollos de la película.<sup>[43]</sup> De acuerdo con un inventor, “la máquina de película es simplemente un estereopticon o linterna modificada, es decir, una linterna equipada con un cambiador mecánico de diapositivas”.<sup>[44]</sup> Cualesquiera que sean sus raíces, el rápido ascenso de la tecnología para películas acaparó la atención. La diapositiva para linterna nunca recuperó su lugar independiente en el entretenimiento masivo, pero continuó siendo popular hasta principios de la década de 1960 y siguió utilizándose en presentaciones en reuniones grandes, donde se podía usar para proyectar imágenes de 18 metros de ancho.<sup>[45]</sup> A mediados de la década de los setenta, las diapositivas para linterna todavía se usaban en escuelas de medicina y hospitales, que tenían grandes bibliotecas especializadas de

diapositivas.[46]

A mediados de la década de 1930, la Compañía Eastman Kodak introdujo la película Kodachrome, lo que hizo posible la “transparencia en color”, relativamente económica, que “se podía producir con las cámaras de 35 mm de reciente popularidad”. Este medio proporcionó una alternativa a la diapositiva para linterna, más ligera, más compacta (5 × 5 cm) y relativamente irrompible para uso casero y para conferencistas aficionados, pero la calidad de las primeras imágenes de 35 mm era inferior a la que se habían acostumbrado los profesionales con diapositivas de cristal. Sin embargo, en la década de 1950 “las emulsiones en color habían sido mejoradas al punto en que una imagen de 35 mm se podía proyectar en un ancho de 18 m”, haciendo de la diapositiva de 5 × 5 cm un evidente competidor.[47] Kodak introdujo la bandeja de diapositivas en 1950 y ofreció en 1958 el proyector Cavalcade totalmente automático.[48] (A finales de 1880, las linternas mágicas equipadas con mecanismos de relojería habían sido utilizadas para adelantar automáticamente diapositivas de anuncios, y en la década de 1920 se utilizaron unidades de motor.)[49]

Cuando se empezaron a ofrecer, las transparencias en color eran “muy caras, pero su resistencia y construcción ligera hicieron que los días de la utilidad de la diapositiva de cristal estuvieran contados”. [50] Aun así, historiadores de arte insistían en que las diapositivas más pequeñas simplemente no proporcionaban una imagen tan definida como las diapositivas de cristal para linternas, y algunos, como la profesora de Wellesley, siguieron usando la vieja tecnología. Sin embargo, con la introducción de la película Kodachrome II y el proyector Kodak Carousel en 1961, la diapositiva de cristal para linterna se volvió claramente obsoleta. (Pero no hay tecnología que perdure. Aunque en 1979, el año de mayor producción, 34 compañías ofrecieron proyectores de diapositivas, sólo siete lo hicieron en 2000.[51] En 2003, con el extendido uso de diapositivas generadas y proyectadas por computadora, Kodak anunció en 2004 sus planes de discontinuar los proyectores de diapositivas y dejar de darles servicio y mantenimiento después de 2011.)[52]

No todas las conferencias o presentaciones requerían diapositivas fotográficas de alta calidad. Especialmente en temas que no se basaban tanto en fotografías como en dibujos y diagramas, el desarrollo del retroproyector proporcionó una alternativa rápida y sencilla a las diapositivas de cualquier tipo. El modelo de una voluminosa linterna mágica que empleaba un principio parecido al del periscopio fue ilustrado en 1900 por el “experimentador óptico” y periodista inglés Theodore Brown como un medio para “crear dibujos animados en la pantalla”. [53] Los retroproyectores más compactos datan de mediados de la década de 1940, [54] cuando se crearon como auxiliares en el trabajo policial. Pronto encontraron su camino hacia las boleras y escuelas, donde proyectaban marcadores y lecciones que se escribían en tiempo real. Algunos retroproyectores estaban equipados con un rollo de película plástica

limpia que se extendía sobre la mesa de luz y avanzaba por la rotación de una manivela unida al rollo del otro lado de la base del proyector. Cuando una sección de la película había cumplido su propósito, la película se adelantaba para colocar una sección limpia en la mesa de luz. Pronto, incluso los científicos y los ingenieros más apegados a la tradición, que se resistían al uso de diapositivas por considerarlas un medio muy rígido para sus presentaciones improvisadas, comenzaron a aceptar el uso del retroproyector, utilizando transparencias de  $22 \times 28$  cm. Después de todo, no era tan radicalmente diferente de la escritura en el pizarrón y permitía escribir en una superficie horizontal más natural, así como usar plumones de colores para aclarar puntos.

Por lo general, las notas manuscritas y las gráficas dibujadas a mano se consideraban demasiado informales para proyectarse en reuniones de negocios serias, donde los asistentes vestían traje y corbata. Así que el uso extendido del retroproyector en presentaciones de negocios serias no se dio sino hasta mediados de la década de 1970, cuando las transparencias con un buen terminado (también conocidas como “acetatos”)[55] se podían hacer fotocopiando material escrito a máquina y dibujado de manera profesional.[56] Ahora, todo lo que se pudiera fotocopiar se podía proyectar en una pantalla, incluso fotografías, páginas de libros, impresiones de computadora, cuadros y gráficas. Las transparencias de estas últimas eran especialmente populares entre los científicos y los ingenieros, que podían colocar una sobre la otra para comparar diferentes conjuntos de datos. Algunas presentaciones técnicas se preparaban escribiendo a máquina múltiples transparencias superpuestas para formar rotafolios transparentes perfectamente alineados.

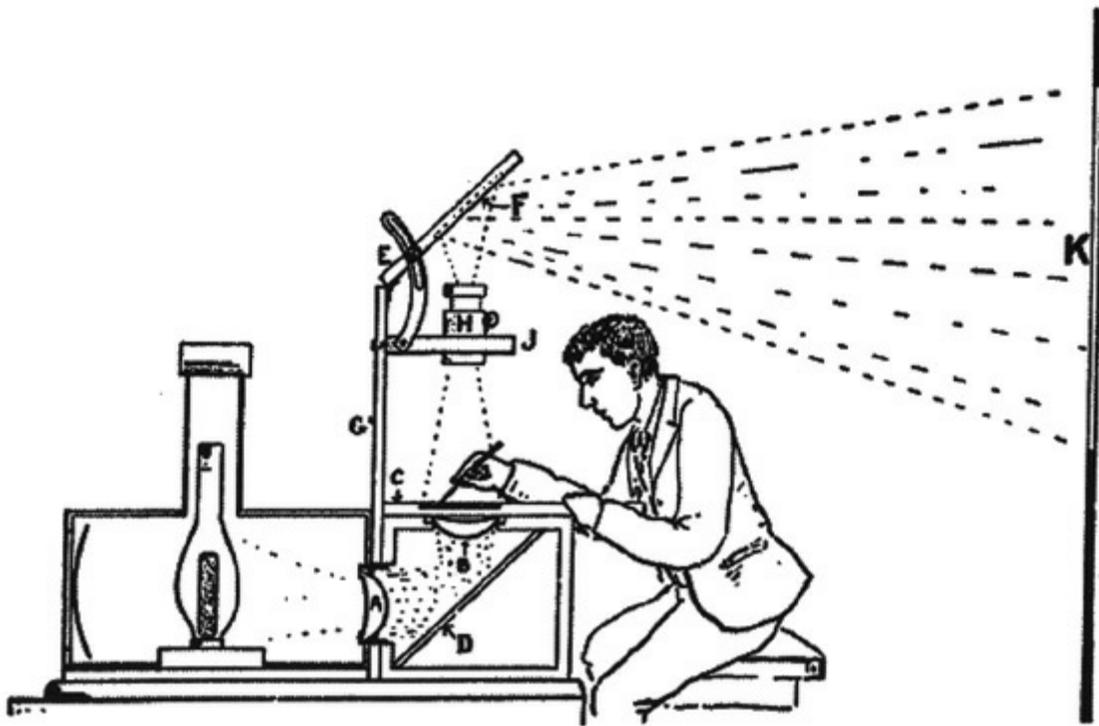


Figura 3. Una linterna mágica podía estar configurada para funcionar como un retroproyector. (De Boy's Own Paper, 1900.)

El retroproyector también tenía sus limitaciones, por supuesto. Era grande y por lo general se colocaba directamente frente a la pantalla en una mesa o carro todavía más grande. El presentador tenía que estar de pie junto a él para tener acceso a la pila de transparencias que constituían la presentación. Por lo general, estaban colocadas en la mesa a un lado del retroproyector, con un espacio del otro lado de éste reservado para apilar las transparencias usadas. El mismo proyector y el presentador de pie junto a él obstruían la vista de los que podían considerarse los mejores asientos de la sala. (Los presentadores se habían caracterizado por hablar estando sentados junto al proyector, lo cual mejoraba la visibilidad de la pantalla para el público, pero por lo general esta práctica era mal vista y se consideraba una falta de urbanidad en circunstancias donde las presentaciones se hacían habitualmente de pie.)<sup>[57]</sup> Para paliar este problema, a menudo la imagen se proyectaba en lo alto de la pantalla, lo que a su vez ocasionaba el problema de distorsión conocido como “efecto Keystone”, en que la parte superior de la imagen es perceptiblemente más ancha que la inferior.<sup>[58]</sup>

Al igual que la mayoría de los proyectores modernos, el retroproyector era ruidoso y por lo tanto hacía necesario que el presentador hablara más alto. Era característico que el ventilador del aparato que hacía ese ruido produjera aire del lado del proyector donde se había colocado la pila de transparencias antes de que se encendiera el ventilador —o donde las habían colocado después de mostrarlas—. Esto podía ocasionar, y con frecuencia ocurría,

que los acetatos salieran volando de la mesa y se revolvieran. (El presentador listo numeraba el conjunto de transparencias y las guardaba en orden en una caja o en fundas de plástico en una carpeta engargolada.) Como la atención del presentador estaba puesta naturalmente en centrar y dar la orientación correcta a la siguiente transparencia en el retroproyector, las usadas se retiraban descuidadamente. Si después de la plática se hacía una pregunta, digamos, sobre la segunda gráfica mostrada, se originaba una gran confusión por la revoltura de los acetatos. En términos generales, el retroproyector tenía un número considerable de fallas, pero como era posible crear un conjunto de transparencias en la fotocopidora minutos antes de una reunión o conferencia, continuó siendo una buena opción.

La alternativa seguía siendo, por supuesto, el uso de diapositivas de 35 mm, que se podían hacer introduciendo simplemente fotografías de 35 mm en cartón o marcos de plástico de 5 × 5 cm. Sin embargo, para crear esos artefactos y por lo tanto hacer una presentación, primero tenían que recopilarse las imágenes para las diapositivas o prepararlas y luego fotografiarlas bajo la iluminación adecuada, y finalmente la película tenía que revelarse antes de cortarla en fotografías para hacer diapositivas. Por lo general, un departamento gráfico profesional hacía la mayor parte del trabajo, que requería un largo plazo de entrega. Esto empezó a cambiar con la introducción de la computadora, y a mediados de 1970 el *software* de gráficas por computadora hizo posible componer diapositivas en una terminal.<sup>[59]</sup> Sin embargo, como muchas de las impresiones de computadora de ese entonces, las diapositivas todavía tenían que recogerse en un centro de cómputo, donde se encontraba el *hardware* para elaborarlas.

Había otros problemas con las diapositivas y los proyectores de éstas. Al igual que el retroproyector, el proyector de diapositivas se colocaba por lo general directamente frente a la pantalla. Sin embargo, ya que no era tan grande y se podía ajustar con un control remoto, el presentador no tenía que estar parado a un lado de él, así que los buenos asientos no estaban ocupados de antemano —siempre y cuando los que se sentaran allí pudieran escuchar al conferencista más que al motor del ventilador—. Dependiendo de las limitaciones de los lentes disponibles, el proyector de diapositivas tenía que estar más cerca o más lejos de la pantalla para obtener el tamaño de la imagen deseado. De esta manera, muchas presentaciones se retrasaban mientras se encontraba una extensión, o se disponía de un libro u otro objeto de la altura necesaria para sostener y elevar el proyector en un ángulo apropiado. Esto requería equilibrio entre la altura máxima de la imagen y el mínimo efecto Keystone.

En los Estados Unidos en la última parte del siglo XX, el proyector de diapositivas más popular era el Kodak Carousel. Como de cualquier producto de consumo, había una variedad de modelos (diseños), y evolucionó a través de los años eliminando las pequeñas (y

grandes) molestias del funcionamiento que frustraban a los primeros usuarios, y que incluían bombillas quemadas, diapositivas derretidas y mecanismos que se atascaban. Alrededor de 1980 la máquina finalmente se había convertido en un dispositivo sumamente confiable muy fácil de usar y libre de problemas. Puede decirse que fue “perfeccionada”.

Eso no quiere decir que hacer una presentación de diapositivas de 35 mm no presentara riesgos. La manera más segura de garantizar que todas las diapositivas estuvieran en el orden correcto y en la orientación debida era meterlas en un carrusel antes de la conferencia, guardarlas en su lugar y revisarlas una última vez. Esto podía significar que uno tuviera que viajar con un carrusel relativamente grande y que por lo general no permitía revisar o practicar la presentación sin un proyector. El presentador que olvidara el orden de las diapositivas tenía que hacer ajustes a la conferencia al momento.

La alternativa era transportar las diapositivas en una pila asegurada con una liga, en un sobre o una caja o acomodadas en fundas de plástico transparentes. Esto permitía al presentador revisar y mezclar las diapositivas en el último minuto, cuando llegaba el momento de meterlas en el carrusel en medio de las múltiples voces antes de una reunión — una operación peligrosa—. Las diapositivas sueltas obviamente podían desordenarse, e incluso las diapositivas ordenadas se podían haber insertado de forma incorrecta en el carrusel. Por la óptica del proyector, las diapositivas tenían que insertarse al revés para una proyección adecuada. (Para la pantalla de proyección trasera, debía hacerse tanto al revés como hacia atrás.) Era una proeza mirar a simple vista una diapositiva de 35 mm en un auditorio iluminado por una luz tenue y lleno de gente diciendo qué está arriba, abajo, enfrente, atrás. (Los presentadores sensatos aprendieron a poner una marca distintiva al frente en la parte inferior izquierda de la imagen vertical, para que cuando las diapositivas estuvieran metidas de la manera adecuada las marcas se vieran arriba de las ranuras del carrusel. Las diapositivas para linterna se marcaban de una manera muy parecida.)

A pesar de todas las dificultades, una presentación de diapositivas bien preparada y bien llevada a cabo en un auditorio bien equipado todavía puede ser algo lleno de belleza. De preferencia, el proyector de diapositivas ha de estar dentro de una cabina en la parte posterior del salón, más o menos a la misma altura de la gran pantalla que está al frente, con lo que se eliminan los problemas de ruido, el efecto Keystone y las sombras de cabezas. El orador estará de pie ante un atril debajo o al lado de la gran pantalla y tendrá un control remoto que puede estar integrado o tener contacto infrarrojo o inalámbrico con el proyector. El orador portará un micrófono de solapa, para que su voz no se pierda cuando voltee a ver la pantalla. Si no fuera porque las diapositivas de 35 mm son poco prácticas de crear, guardar, transportar y acomodar —aunque no tanto como las diapositivas para linterna— podrían haber seguido siendo el medio idóneo para todo tipo de presentaciones.

Sin embargo, con la introducción de la computadora personal a principios de la década de 1980, el trabajo técnico preliminar se dejó a un lado por una nueva alternativa que subsanaba las deficiencias hasta entonces aceptadas de la diapositiva de 35 mm y su pesada infraestructura. Es difícil conceder a alguien el crédito absoluto por la creación de una aplicación informática o de cualquier invento, ya que las ideas están en el aire y se alimentan entre sí. Alguien puede sugerir el germen de un concepto, pero otra persona lo puede concretar. El problema no es exclusivo de las computadoras. Samuel F. B. Morse entabló un largo y enconado debate y una disputa legal con Charles Jackson, médico geólogo de Boston que afirmaba que la idea del telégrafo era un “descubrimiento *mutuo*” hecho en 1832 cuando ambos cruzaban el Atlántico a bordo del barco *Sully*.<sup>[60]</sup>

En 1981 Whitfield Diffie, matemático y experto en criptografía, se encargaba de los problemas relacionados con la seguridad del sistema telefónico en el Laboratorio de Investigación de Bell-Northern. Por su propia cuenta, mientras preparaba una presentación de diapositivas de 35 mm, escribió un programa informático que permitía dibujar un marco en una hoja de papel. Posteriormente lo mejoró para que hiciera posible dibujar cierto número de estos marcos en la misma hoja e incluir texto dentro de ellos. El resultado fue el diseño de una “proyección de diapositivas” que se podía entregar a un departamento gráfico, que a su vez devolvería a Diffie un conjunto de diapositivas de 35 mm listo para su presentación. Podría decirse que éste fue el germen de la idea de crear un *software* informático que produjera una proyección de diapositivas que corriera en la computadora, con lo que se eliminaba la necesidad de las diapositivas físicas. De acuerdo con Diffie, fue un colega, Bob Gaskins, quien apreció el valor de esta aplicación y “quien tuvo la visión de entender lo importante que era para el mundo”.<sup>[61]</sup>

Según Ian Parker, quien entrevistó a Diffie y a Gaskins para un artículo del *New Yorker* sobre las presentaciones de PowerPoint, Gaskins observó a otros en el laboratorio utilizando un equipo de cómputo poco indicado para hacer transparencias para el retroproyector y le surgió la idea de diseñar un programa de gráficas que creara y editara diapositivas virtuales. En 1984 dejó Bell-Northern para unirse a Forethought, compañía de *software* de Silicon Valley. Gaskins y Dennis Austin, programador de *software*, comenzaron a trabajar en un programa que llamaron Presenter, al que antes de lanzarlo a la venta en 1987 y para evitar problemas de marca se le daría el nuevo nombre de Power Point. PowerPoint 1.0 era una aplicación en blanco y negro de Macintosh que permitía a los usuarios imprimir páginas que podían fotocoparse en acetatos transparentes.

Pronto, Microsoft adquirió Forethought y con ella PowerPoint. La primera versión de PowerPoint para Windows salió en 1990, y el tan difamado AutoContent Wizard, que ayuda al usuario a crear una presentación, se agregó a mediados de la década de 1990. Mientras

tanto, cada vez se disponía de más proyectores de imágenes digitales en los salones de clase, salas de juntas y auditorios, permitiendo de este modo que se presentara el contenido de la pantalla de la computadora ante un público numeroso. Como si pronosticaran el inminente triunfo de la nueva tecnología sobre la pasada, a estos dispositivos se les llamó simplemente “proyectores”.

En poco tiempo, la producción de diapositivas en película de 35 mm comenzó a estabilizarse y decaer. A finales de la década de 1990, PowerPoint estaba disponible en 35 idiomas, contaba con un creciente número de diapositivas de todo tipo y había realizado alrededor de 70% de casi 2 000 millones de “diapositivas electrónicas profesionales” en todo el mundo. El crecimiento continuó, aunque las primeras diapositivas electrónicas eran “inferiores a las diapositivas en película en cuanto a color y resolución”. Entre las ventajas más grandes se contaba que la “diapositiva está lista tan pronto como es diseñada”.<sup>[62]</sup> Ahora, por supuesto, PowerPoint es un nombre tan genérico como Kleenex y Xerox.

Cuando PowerPoint era todavía una relativa novedad, el público fue sorprendentemente paciente con la “nueva tecnología”, y este término no explicado con mayor detalle se pronunció a menudo entre dientes antes, durante y después de una introducción que no podría extenderse más. Si el orador había sido presentado pero la proyección de diapositivas no estaba lista aún, los asistentes simplemente se ponían de pie o se sentaban y observaban en silencio mientras la vergonzosa nueva tecnología salía de su caja negra. Apenas a finales de la década de 1990 las juntas se podían detener 20 minutos mientras técnicos, oradores y personas bien intencionadas se apiñaban sobre una *laptop* tratando de proyectar una presentación de PowerPoint en la pantalla de un auditorio. Estos incidentes hicieron que muchas presentaciones de PowerPoint fueran respaldadas con transparencias para retroproyector o con diapositivas de 35 mm (o con ambas), que seguían siendo llevadas a las juntas por muchos presentadores.<sup>[63]</sup> Ahora, *laptops* de todas marcas y modelos se conectan fácilmente a los proyectores, o insertando un CD en una *laptop* ajena se ve su contenido y por lo común todo funciona como un mecanismo de relojería. No obstante, algunos conferencistas siguen dependiendo de múltiples y a veces inútiles medios para sentirse tranquilos.

Lo mejor de las presentaciones de PowerPoint es su formato, que es ordenado y uniforme. Pero el *software* que “se creó para otorgar control a los oradores sobre las decisiones de diseño”<sup>[64]</sup> en cuanto a la apariencia de sus diapositivas no sustituye el sentido de proporción y restricción que los departamentos gráficos profesionales le proveyeron y que no tienen todos los oradores. Lo menos que se puede decir de muchos de los “diseños de presentación” que ofrece PowerPoint para dar unidad a una presentación es que son “lindos”, por decir lo menos. Deberían estar fuera de lugar en un escenario profesional, pero

sorprendentemente no ocurre así. Muchos de los “autodiseños” para texto, texto con viñetas, tablas, gráficas y *clip art* son fáciles y casi infantiles. Mientras PowerPoint permita ajustar y cambiar los diseños establecidos, corre el riesgo de perturbar todavía más el equilibrio visual. Sin importar sus pros y sus contras, familiarizarse con todo el complejo *software* que es PowerPoint puede ser desalentador. Por lo tanto, no debería sorprender que se hayan establecido talleres para ofrecer al neófito “¡la única capacitación que necesitará para crear presentaciones poderosas y persuasivas!” De acuerdo con el folleto que anuncia uno de estos talleres: “El público de alta tecnología de la actualidad está acostumbrado a grandes espectáculos multimedia dinámicos. No sólo quieren escuchar tu mensaje, también esperan entretenerse”. Asistiendo a un taller de un día, puedes “aprender cómo cautivar a cualquier público ¡solamente con la mezcla perfecta de magia multimedia!”<sup>[65]</sup> El lenguaje recuerda asombrosamente las reseñas de las primeras presentaciones con linterna mágica y los efectos animados que evocaban una fantasmagoría.

La mayor parte de la crítica a PowerPoint no se ha dirigido a sus cualidades superficiales sino a la idea superficial que parece promover. PowerPoint “te ayuda a explicarte, pero también se explica: sobre cómo organizar la información, qué tanta información organizar, cómo mirar al mundo”.<sup>[66]</sup> Tal vez el detractor más distinguido ha sido Edward Tufte, el “diseñador analítico” cuyos libros sobre cómo prever y presentar información cuantitativa se han convertido en biblias en este campo.<sup>[67]</sup> Ha clasificado el *software* de presentación como *slideware* y en un ensayo titulado “PowerPoint Is Evil” afirma que: “La presentación estándar de PowerPoint eleva el formato sobre el contenido, revelando una actitud de comercialismo que convierte todo en un punto de venta”. Al “darle forma a las presentaciones en un formato estándar”, de acuerdo con algunos observadores, y al “rechazar material que no corresponda a ese formato, el programa controla el contenido, incidiendo de manera negativa en la comunicación de ideas complejas con la proyección de viñetas en la pantalla”.<sup>[68]</sup> Además, según Tufte, “el estilo prepotente de PowerPoint busca establecer la preponderancia del orador sobre el público. El orador, después de todo, está haciendo presentaciones con viñetas para los discípulos”.<sup>[69]</sup> La portada del folleto de Tufte, *The Cognitive Style of PowerPoint*, está ilustrada con una fotografía de un desfile militar en la Plaza Stalin de Budapest, con la imponente estatua de Stalin diciendo: “La siguiente diapositiva, por favor”.<sup>[70]</sup>

Las diapositivas con viñetas de PowerPoint son quizá la caracterización más visual de las presentaciones epónimas, pero la forma en que los oradores interactúan con las diapositivas es sin duda lo más detestable. Una actitud familiar de un orador usando PowerPoint es estar observando las diapositivas no como lo hace el público, es decir, proyectadas en una gran pantalla, sino en la pantalla de la computadora en el atril. El orador no sólo le habla a la

pantalla de la computadora sino que también señala las viñetas e imágenes en ella. El público es excluido del diálogo entre el creador y la creación. Muchos oradores también leen los textos de sus diapositivas de PowerPoint, cometiendo así el “pecado de la triple entrega, donde precisamente el mismo texto se ve en la pantalla, se escucha en voz alta y se ve impreso en las notas que están frente a ti (el ‘dejar-atrás’, como se conoce en algunos círculos)”.<sup>[71]</sup> Estas conferencias intensivas en diapositivas han sido descritas como “Muerte por PowerPoint”.<sup>[72]</sup> Una caricatura del *New Yorker* mostraba al diablo (o por lo menos a un gerente del infierno) que al realizar una entrevista de trabajo le decía al posible empleado: “Necesito a alguien muy versado en el arte de la tortura, ¿conoces PowerPoint?”<sup>[73]</sup>

Sin importar cómo PowerPoint insensibiliza a los presentadores o tortura a diferentes públicos, por lo general se cree que sus atributos físicos hacen que su uso sea una mejora absoluta sobre las presentaciones de diapositivas de 35 mm. Ésta es una afirmación con poca visión, ya que no se puede decir que todos los aspectos de una presentación de PowerPoint son superiores a una en la que se utilice un proyector Kodak Carousel. Generalmente, el rediseño introduce nuevas limitaciones, al mismo tiempo que se jacta de hacer inmensas mejoras a la tecnología sustituida. De acuerdo con un crítico de la tecnología, existe “la sensación de asombro al ver que una nueva forma de tecnología en realidad funciona”, pero esa sensación “pronto dará paso al hastío”. Recordó que la primera vez que usó una cámara digital “estaba sorprendido” porque podía ver las fotografías inmediatamente después de haberlas tomado. Pero pocos días después había descubierto sus errores y defectos y “tenía una lista de formas en las que se podría mejorar la cámara”.<sup>[74]</sup> No es extraño que los fabricantes saquen a la venta nuevos modelos con tanta frecuencia y con tanto éxito.

No obstante, así como las diapositivas para linterna y las diapositivas de 35 mm coexistieron por décadas, es de esperarse que ocurra lo mismo con las diapositivas de 35 mm y PowerPoint, por lo menos mientras el equipo para proyectar las primeras continúe vigente. Las personas de mi generación, que crecieron profesionalmente con diapositivas de 35 mm, tienen un pie en el mundo de éstas y otro en el de PowerPoint. Con frecuencia nuestra biblioteca de diapositivas es demasiado vasta y familiar para nosotros como para pensar en digitalizarla, y continuamos llevando a costas carruseles repletos a los aeropuertos, esperando que a donde vayamos haya un proyector que funcione. La seguridad del aeropuerto pregunta si la curiosa forma circular que se ve en la imagen de rayos X de nuestra maleta con ruedas en verdad es un carrusel de diapositivas, pues los escáneres “ya no ven muchos de éstos”. En el sitio donde se dará la plática, los jóvenes del personal audiovisual, que no tienen problema para conectar al proyector digital la mayoría de las *laptops* de marcas no conocidas, dejan que quienes manejen el proyector de diapositivas seamos nosotros.

Entre las características más regresivas de PowerPoint se encuentra su estricta

conformidad al rígido formato de la pantalla de la computadora, que tiene aproximadamente las proporciones de una hoja de papel de 22 × 28 cm. Este diseño de paisaje de televisión, que es contrario a la forma en que se orientarán la mayoría de los documentos compuestos en la pantalla de la computadora al imprimirse, se puso de relieve en una reseña de Windows 2003 de Microsoft. Los cambios que se realizaron en el programa de *e-mail* Outlook fueron elogiados por mostrar un mensaje de tal forma que “se ve menos como un telegrama y más como un magnífico documento de negocios”. El crítico prosiguió apuntando que: “Este nuevo diseño explota una peculiaridad casi olvidada de las pantallas de computadora actuales: son más anchas que altas. Las ventanas apiladas una al lado de la otra tienen infinitamente más sentido que la anterior disposición vertical”.<sup>[75]</sup>

En realidad no se ha aprovechado en PowerPoint la ventaja de esta peculiaridad de las pantallas de computadora. Las diapositivas que se componen con ese programa son en su mayoría horizontales y deben permanecer así. Las imágenes verticales altas deben reducirse al marco horizontal, como jugadores de básquetbol en la entrada de una casa de Frank Lloyd Wright. Ésta es una limitación que no impone la tecnología anterior. Con una cámara de 35 mm, las imágenes de las diapositivas se pueden tomar con la cámara (y por lo tanto con la película) en una posición horizontal o vertical, y se pueden montar en el modo de paisaje o de retrato. El formato cuadrado de la diapositiva permite que se proyecten ambas orientaciones con el mismo aumento, y el marco opaco de la diapositiva oculta la parte no iluminada de la pantalla.

Las anteriores pantallas de proyección estaban diseñadas para ser utilizadas con diapositivas de 35 mm, en un formato generalmente cuadrado, cuando se desarrollaron por completo. Los ingenieros y los científicos se acostumbraron a usar toda el área de estas pantallas, mezclando diapositivas horizontales y verticales para sacarle provecho, empleando, por ejemplo, las primeras para tener una vista completa de un puente colgante y las últimas para una vista de su torre. Se optimizó el tamaño de las imágenes de las diapositivas proyectadas. (Los arquitectos y los historiadores de arte que están acostumbrados a utilizar dos proyectores para yuxtaponer diapositivas a fin de ver dos imágenes de manera simultánea con objeto de hacer un estudio comparativo, han usado con frecuencia pantallas mucho más grandes, que llegan a ocupar toda la pared del frente de una sala de conferencias. Recientemente asistí a una presentación de historia del arte hecha con PowerPoint, y los pares de imágenes estaban arregladas verticalmente y reducidas a un solo formato de pantalla de computadora.)

Las presentaciones de negocios, que son en gran parte texto y gráficas, tienden a consistir en diapositivas compuestas exclusivamente en el modo horizontal de paisaje. Ésta es, por supuesto, la forma de PowerPoint, y está naturalmente de conformidad con las proporciones

de la pantalla de la computadora. Cuando los proyectores —no los retroproyectores ni los proyectores de diapositivas, sino simplemente los proyectores, como se les llama comúnmente— fueron asequibles a finales de la década de 1990, las presentaciones de PowerPoint minimizaron la anterior proyección de diapositivas de 35 mm en varios sentidos. Al proyectar una imagen de la pantalla de la computadora nunca se podría llenar una pantalla de proyección completamente desplegada con un formato cuadrado. Había un molesto espacio entre blanco y gris en la parte superior y en la inferior, como los molestos espacios que hay arriba y abajo de una película en formato de buzón vista en un televisor común. Desplegar la pantalla de proyección sólo a las proporciones de la pantalla de la computadora eliminaba el molesto recuerdo de qué tan alta se pudo proyectar una imagen vertical alguna vez. Pero si la pantalla no se tenía que utilizar en su totalidad, no tenía que ser tan larga, y entonces cada vez más los catálogos de productos para oficinas y escuelas no ofrecían las antiguas pantallas de proyección cuadradas sino las nuevas en la sección dorada de la pantalla de la computadora.

Es bien sabido desde hace tiempo que las pantallas de proyección se ensucian, se perforan y se rompen. Así que en años recientes, cada vez que se ha comprado una nueva pantalla, ésta ha tenido las nuevas proporciones. La última que se instaló en el salón en el que doy clases se ajusta perfectamente con la imagen que proviene del proyector ubicado en el techo, así que una pantalla de computadora agrandada pende sobre el aula sin ningún rastro de margen, incorpórea como una fantasmagoría. Desafortunadamente, cuando quiero proyectar diapositivas de 35 mm en este salón, tengo que reducir la imagen para ajustar las diapositivas verticales, lo cual hace que las horizontales se vuelvan considerablemente más angostas que la pantalla. Parece que quien compró la pantalla no sabía que alguien podría querer usarla para algo que no fuera proyectar la imagen de la pantalla de una computadora, con o sin una presentación de PowerPoint.

Naturalmente, la nueva tecnología eliminará a la anterior, a la que imita en funcionalidad y terminología, si ya no se puede conseguir fácilmente. Pero eso no implica que la nueva tecnología sea superior en todo sentido a la antigua. Depende de qué tan exhaustivo y concienzudo haya sido el análisis de fallas proactivo anterior al rediseño. Es cierto que las diapositivas de 35 mm tienen la desventaja de que es necesario revelar y procesar la película, y por lo general lo hace alguien que no es el presentador, lo cual requiere planeación por adelantado. En el caso de PowerPoint, darle a los oradores el “control sobre las decisiones de diseño” eliminó este defecto del sistema que está a punto de ser obsoleto, pero las limitaciones de la pantalla de la computadora imponen un defecto diferente en el nuevo sistema, por encima de todas aquellas inquietudes de Tufte y otros críticos sobre la limitación del contenido debido al formato. Casi nunca un producto nuevo

es una mejora en todos sentidos para todos. Su éxito siempre es fugaz. Un contendiente está siempre acechando en las sombras.

Como la linterna mágica y el proyector digital, todo lo fabricado y usado por los seres humanos ha sido objeto de diseño, ya que se ha elaborado sobre la base de una idea, o sus partes se han seleccionado de entre los objetos ya existentes, modificadas si es necesario y ensambladas para formar un objeto nuevo y supuestamente mejorado. Los componentes de cualquier diseño consciente están dispuestos o ensamblados deliberadamente en una configuración particular para cumplir el propósito deseado, pero también hay diseños accidentales. De este modo, un inventor puede encontrar algo novedoso y útil al tratar de diseñar algo completamente diferente, como pasó con Roy Plunkett, que descubrió el teflón cuando buscaba un nuevo refrigerante.[76] En el proceso de diseño también puede haber una gran dosis de actividad lúdica. Algunas veces el propósito del diseño simplemente es divertir o entretener.

Los componentes, como los diseños ensamblados, no necesitan ser objetos tangibles; pueden haber sido elegidos por su significado, color, textura, forma o cualquier otra cualidad. Su ensamblaje final quizá no sea sino una de muchas disposiciones de prueba y error —la mayoría de las cuales no lograban satisfacer a su diseñador o a quienes los utilizaban— pero el resultado se conoce como *el* diseño. Siempre ha sido así, y siempre lo será, ya que el diseño es una actividad independiente del tiempo y el lugar. Por lo tanto podemos imaginar de manera creíble de dónde vinieron los objetos y saber que evolucionarán en diseños siempre nuevos.

Los diseños siempre dan origen a diseños. Sin embargo, ya que el diseño es una actividad humana, también es una actividad imperfecta. Todo lo diseñado tiene sus limitaciones y sus defectos. Esta realidad del diseño es lo que lleva al cambio constante en los objetos que nos rodean y nuestra conducta en torno a ellos. Los inventores, ingenieros y otros diseñadores profesionales critican constantemente el mundo de los objetos, lo que lleva a nuevos diseños para nuevos objetos. El nuevo objeto exitoso es uno que no falla en el sentido en que lo hacía el que intenta remplazar. Por esto el fracaso es la clave del diseño. Entender cómo fallan (y cómo pueden fallar) los objetos permite comprender mejor cómo rediseñarlos de manera satisfactoria. Pero el diseño exitoso de hoy será el fracaso de mañana, ya que las mismas expectativas de la tecnología se modifican constantemente.

Las complejas colecciones de objetos y nuestra manipulación e interacción con ellos se califican de sistemas, que son diseñados en sí mismos. Estamos inmersos en sistemas de todo tipo, algunos de los cuales obviamente son mecánicos o electrónicos pero muchos de ellos también sociales y culturales. De este modo, cuando conducimos un automóvil nos volvemos parte del sistema de la máquina humana. Al mismo tiempo, nuestra conducta en la calle está

gobernada por reglas y regulaciones, que son en gran parte sociales y culturales. Conducir por primera vez en un país cuyas reglas son diferentes puede ser desconcertante, pero los seres humanos son sumamente adaptables a la nueva tecnología. Aprendemos rápidamente cómo conducir un automóvil y cómo hacerlo con prudencia en una vía pública con demasiado tráfico.

En los campus de las universidades con muchos alumnos de distintas nacionalidades, las primeras semanas de clases con frecuencia hay confusión en las aceras, donde quienes están acostumbrados a caminar por la izquierda se encuentran con quienes lo hacen por la derecha. Estos conflictos se resuelven con facilidad y de manera cordial ofreciendo una sonrisa y haciendo ligeras correcciones en nuestros recorridos. Eso es lo que hacemos constantemente con los nuevos diseños inmersos en una tecnología en constante evolución. Pero así como las cosas cambian, lo que impulsa ese cambio en esencia sigue siendo igual. Se deduce que cualquier objeto o sistema específico pone de manifiesto la naturaleza del diseño.

- 
- [1] C. H. Townsend, "The Misuse of Lantern Illustrations by Museum Lecturers", *Science*, n. s., 35 (5 de abril de 1912): 529-531.
- [2] Simon Henry Gage y Henry Phelps Gage, *Optic Projection: Principles, Installations and Use of the Magic Lantern, Projection Microscope, Reflecting Lantern, Moving Picture Machine* (Ithaca, N.Y.: Comstock Publishing, 1914), 673.
- [3] Platón, *La República*, libro VII.
- [4] David Hockney, *Secret Knowledge: Rediscovering the Lost Technique of the Old Masters* (Nueva York: Viking Studio, 2001). Véase también David Hockney y Charles M. Falco, "Optical Insights into Renaissance Art", *Optics & Photonics News*, julio de 2000, 52; Lawrence Weschler, "The Looking Glass", *New Yorker*, 31 de enero de 2000. Pero véase también Sarah Boxer, "Computer People Reopen Art History Dispute", *New York Times*, 26 de agosto de 2004, E1, E5.
- [5] Susan E. Hough, "Writing on Walls", *American Scientist*, julio-agosto de 2004, 302-304.
- [6] Gage y Gage, *Optic Projection*, 674.
- [7] *Ibid.*
- [8] H. C. Bolton, "Notes on the History of the Magic Lantern", *Scientific American* 64 (1891), 277. Véase también Magic Lantern Society, <http://www.magiclantern.org.uk/history1.htm>. (A menos que se indique lo contrario, los sitios web se visitaron en 2004.)
- [9] Robert P. Spindler, "Windows to the American Past: Lantern Slides as Historic Evidence", *Visual Resources* 5 (1988), 1-2.
- [10] Bolton, "Notes on the History", 277.
- [11] Samuel Highley, "The Application of Photography to the Magic Lantern, Educationally Considered", *Journal of the Society of Arts* 11 (16 de enero de 1863), 142.
- [12] David Robinson, Stephen Herbert y Richard Crangle, eds., *Encyclopaedia of the Magic Lantern* (Londres: Magic Lantern Society, 2001), s.v. "Huygens, Christiaan".
- [13] Howard B. Leighton, "The Days of Magic Lanterns", *Nineteenth Century* 5 (1979), 44-47.

- [14] “The Magic-Lantern”, *The Manufacturer and Builder* 1 (1869), 199.
- [15] Robinson *et al.*, eds., *Encyclopaedia*, s.v. “Huygens, Christiaan”.
- [16] “The Magic Lantern”, 199.
- [17] Leighton, “Days of Magic Lanterns”, 45.
- [18] Gage y Gage, *Optic Projection*, 677.
- [19] “Lantern Slides: History and Manufacture”, <http://memory.loc.gov/ammem/award97/mhsdhtml/lanternhistory.html>.
- [20] Spindler, “American Past”, 13.
- [21] Leighton, “Days of Magic Lanterns”, 46.
- [22] Townsend, “Misuse of Lantern Illustrations”, 529.
- [23] Spindler, “American Past”, 12.
- [24] Townsend, “Misuse of Lantern Illustrations”, 530.
- [25] Robinson *et al.*, eds., *Encyclopaedia*, s.v. “ilustrated lectures”.
- [26] Leighton, “Days of Magic Lanterns”, 45. Véase también “Lantern Slides”. Para ilustraciones de la obra de los hermanos Langenheim, véase George S. Layne, “The Langenheims of Philadelphia”, *History of Photography* 11 (1987), 39-52. Véase también Highley, “Application of Photography”, 141, quien creía “que para los señores Negretti y Zambra el honor se debe a haber producido por primera vez para la venta al público temas de interés geográfico y artístico especialmente preparados para la linterna”.
- [27] Simon H. Gage, “The Introduction of Photographic Transparencies as Lantern Slides”, *Journal of the Royal Society of Arts* 59 (1911), 256.
- [28] “The Magic-Lantern”, 199.
- [29] *The Magic Lantern* 1 (1874), 8.
- [30] Robinson *et al.*, eds., *Encyclopaedia*, s.vv. “Marcy, L. J.”, “sciopticon”.
- [31] “Shadows in a New Light”, *Chambers’s Journal* 32 (12 de julio de 1859), 28-30.
- [32] Robinson *et al.*, eds., *Encyclopaedia*, s.vv. “lever slides”, “slipping slides”.
- [33] *The Engineer*, citado en *ibid.*, s.v. “Constant, C”.
- [34] Robinson *et al.*, eds., *Encyclopaedia*, s.v. “Constant, C”.
- [35] H. W. Whanshaw, *Shadow Play* (Darton, York: Wells Gardner, 1950), citado en *ibid.*
- [36] Highley, “Application of Photography”, 142-143.
- [37] Gage y Gage, *Optic Projection*, 200-201.
- [38] Robinson *et al.*, eds., *Encyclopaedia*, s.v. “masks, slide”.
- [39] Spindler, “American Past”, 6.
- [40] *Ibid.*, 7.
- [41] Robinson *et al.*, eds., *Encyclopaedia*, s.v. “slide boxes”.
- [42] Magic Lantern Society.
- [43] Robertson *et al.*, eds., *Encyclopaedia*, s.vv. “Best Devices Co., Inc.”, “cinemas, use of slides in”.
- [44] C. Francis Jenkins, citado en *ibid.*, s.v. “cinematograph and lantern”.
- [45] *Hope Reports Perspective* (Rochester, N. Y.) 1, núm. 6 (julio 1976), 1-2.
- [46] *Hope Reports* 2, núm. 5 (mayo de 1977), 1.
- [47] *Hope Reports* 1, núm. 6 (julio de 1976), 1.
- [48] *Ibid.*, 2.
- [49] Robertson *et al.*, eds., *Encyclopaedia*, s.vv. “advertising slides”, “Best Devices Co., Inc”.
- [50] Magic Lantern Society.
- [51] Hope Reports, *Large Screen Presentation Systems* (Rochester, N.Y.: Hope Reports, 2000), 34.

- [52] Véase <http://palimpsest.stanford.edu/byform/lmailinglists/cdl/2003/1253.html>.
- [53] Robinson *et al.*, eds., *Encyclopaedia*, s.v. “Brown, Theodore”.
- [54] Hope Reports, *Presentation Slides: Electronic and Film* (Rochester, N. Y., Hope Reports, 1998), i.
- [55] El término “acetato” sigue utilizándose en la organización IBM, como me pude dar cuenta en una visita al Yorktown Heights Research Center de la compañía el 7 de noviembre de 2004. En otros círculos los retroproyectores también eran conocidos como “acetatos” (véase Stanley Bing, “Gone with the Wind”, *Fortune*, mayo 2, 2005), 144.
- [56] Ian Parker, “Absolute PowerPoint”, *New Yorker*, mayo 28 de 2001, 76 ff.
- [57] Véase Henry Petroski, “Amory Lovins Guides the Hard Technologists”, *Technology Review*, junio-julio de 1980, 12-13.
- [58] Cierta vez, un científico informático que tenía programada una presentación en que usaría un retroproyector en un auditorio con una pantalla especialmente alta pensó que el efecto Keystone era una fuerte distracción. Resolvió el problema volviendo a trazar sus transparencias “con una corrección antikeystone, con lo que hizo el material de la parte superior de cada diapositiva mucho más angosto que el de la inferior”. Peter Calingaert, correo electrónico al autor, 15 de agosto de 2005.
- [59] *Hope Reports* 2, núm. 5 (mayo de 1977), 5.
- [60] Kenneth Silverman, *Lightning Man: The Accursed Life of Samuel F. B. Morse*, Nueva York, Knopf, 2003, 156.
- [61] Parker, “Absolute PowerPoint”, 80.
- [62] Hope Reports, *Presentation Slides*, 3, 5.
- [63] Hope Reports, *Presentation Slides*, 9.
- [64] Parker, “Absolute PowerPoint”, 86.
- [65] CompuMaster, “How to Build Powerful PowerPoint Presentations”, folleto para el otoño de 2004.
- [66] Parker, “Absolute PowerPoint”, 76.
- [67] Véase, p. ej., Edward Tufte, *The Visual Display of Quantitative Information*, 2ª ed., Cheshire, Connecticut, Graphics Press, 2001, Tufte, *Envisioning Information*, Cheshire, Connecticut: Graphics Press, 1990.
- [68] Ralph Caplan, *By Design: Why There Are No Locks on the Bathroom Doors in the Hotel Louis XIV and Other Object Lessons*, 2ª ed., Nueva York: Fairchild Books, 2004, 237.
- [69] Edward Tufte, “PowerPoint Is Evil”, *Wired*, núm. 11.09, septiembre de 2003, [http://www.wired.com/wired/archive/11.09/ppt2\\_pr.html](http://www.wired.com/wired/archive/11.09/ppt2_pr.html).
- [70] Edward Tufte, *The Cognitive Style of PowerPoint*, Cheshire, Connecticut: Graphics Press, 2003.
- [71] Parker, “Absolute PowerPoint”, 86.
- [72] John Winn, “Death by PowerPoint”, *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, julio de 2003, 115-118.
- [73] *New Yorker*, 29 de septiembre de 2003, 97.
- [74] James Fallows, “Is Broadband Out of a Wall Socket the Next Big Thing?”, *New York Times*, 11 de julio de 2004, sec. 3, 5.
- [75] David Progue, “Office Buzz: Check the E-Mail”, *New York Times*, 25 de septiembre de 2003, G1, G4.
- [76] Véase, p. ej., Charles Panati, *Panati’s Extraordinary Origins of Everyday Things*, Nueva York: Harper & Row, 1987, 106.



## II. Éxito y fracaso en el diseño

*Everything has two handles—by one of which it ought to be carried and by the other not.*

[Todo objeto posee dos asas: con una de ellas puede transportarse, con la otra no.]

Epicteto[1]

Es muy probable que los primeros instrumentos hayan sido los objetos que estaban a la mano. De este modo, el dedo habría sido la opción obvia para dibujar líneas en la arena, y luego señalar las características de un plan. Pero el dedo no tiene punta, y la mano a la que está unido estorba. La humilde rama o vara se convirtió, por supuesto, en la extensión natural del dedo, permitiendo al diseñador alejarse del dibujo y así estorbarlo menos. Pero incluso el simple acto de recoger una vara puede relacionarse con el diseño. Cuando se escoge una se puede rechazar un buen número de varas que se encuentran alrededor, unas por ser muy cortas o demasiado curvas, otras por ser demasiado débiles o demasiado quebradizas. Ni siquiera haría falta tocarlas para considerarlas fracasos. Un puntero apropiado habría tenido que ser elegido y cortado de un arbusto o árbol cercano. Una vez elegido, podría sostenerse de cualquier extremo —si bien en la mano generalmente se acomoda mejor el más grueso, dejando libre el más delgado para que sea más eficaz como puntero—. Todas estas elecciones y decisiones hechas con anticipación sobre el uso de la vara están relacionadas indudablemente con el diseño.

Una alternativa, por supuesto, era darle forma al puntero tomando un pedazo de madera adecuado. En el siglo XIX, cuando las imágenes proyectadas por las linternas mágicas crecían a un gran tamaño, se necesitaba un puntero cada vez más largo para alcanzar un detalle que el conferencista deseaba resaltar. Esto llevó a la fabricación (y compra y venta) de punteros largos, rectos y delgados con trozos de madera apropiados. Sin embargo, una gran longitud conlleva un peso nada despreciable, y un puntero de tres y medio metros de largo podría ser más bien pesado y difícil de manejar. Los conferencistas deben haber pasado momentos trabajosos sosteniendo uno precisamente del extremo, incluso por un tiempo breve, con el extremo más grueso del puntero apoyado en el piso para usarlo sin demasiada incomodidad.

[2]

Alguna vez el puntero fabricado de madera y de un tamaño más pequeño fue parte del equipo estándar del salón de clases. Aunque sutilmente afilado como una vara, tenía la

ventaja estética y funcional de una proporción apropiada. Por lo general contaba con una punta de goma —para suavizar su punta y rozar el pizarrón— y un ojo metálico para colgarlo de un gancho. Se puede decir que el puntero de madera ha sido un diseño “perfeccionado” en el siglo XX, pero se perdía a menudo o se rompía sobre algún alumno travieso y por lo tanto resultaba menos efectivo para el propósito buscado. Incluso en los campus de institutos y universidades, donde es extraño el castigo corporal, los punteros de madera tuvieron el hábito de desaparecer. Con frecuencia se les ofrecía a los conferencistas invitados que deseaban distanciarse de las imágenes proyectadas que estaban describiendo, un puntero *ad hoc* con la forma de una antena de automóvil o una regla de una yarda o un metro, una vara de delgada madera, o algún otro resto del almacén de maderas. Éstos tuvieron algún éxito como punteros pero sus defectos estéticos eran notorios.

Los conferencistas más exigentes comenzaron a cargar sus propios punteros mecánicos, por lo general en la forma de una especie de varita mágica diseñada a propósito para plegarse y con un clip para el bolsillo.<sup>[3]</sup> Una vez que desaparecieron, estos implementos parecían solamente una pluma o un lápiz más en el arsenal de bolsillo del ingeniero. Desafortunadamente, en auditorios más grandes, la longitud limitada de éstos y de la mayoría de los punteros obligaba a los conferencistas a estirarse a la luz de sus diapositivas para señalar la parte superior de la imagen iluminada. (Algunos oradores sostenían el puntero en el aire entre el proyector y la pantalla para proyectar una sombra sobre el objeto de interés.)



Figura 4. *Un conferencista victoriano usando un gran puntero durante una presentación sobre los humores del parlamento. (De London News & Graphic, 1891).*

El puntero láser, que preponderó en la década de 1990, fue primero por lo general grueso para la mano (debía albergar sus partes electrónicas y las pilas) pero tenía un buen rango. En poco tiempo, esos punteros aparecieron en modelos de bolsillo más delgados y en estilos más cortos, como llaveros. El puntero láser tiene claras ventajas sobre la simple vara, pero también tiene sus deficiencias. Necesita pilas y las pilas se acaban, la mano temblorosa de un conferencista nervioso se amplifica en los movimientos del punto rojo encendido y los ojos del público están en riesgo. Además, puede ser difícil ver el punto rojo en ciertos fondos, haciendo de ese modo que el puntero de alta tecnología resulte inferior incluso a sus predecesores de baja tecnología. Para corregir este problema, se introdujeron punteros láser más complejos electrónicamente y por lo tanto más costosos, pero con rayo verde que, según se informa, puede ser hasta 30 veces más intenso que el rojo.

Los avances tecnológicos generalmente tienden a la perfección pero nunca la alcanzan;

siempre existe alguna manera en que se pueden mejorar. Los conferencistas se sienten agobiados con un cambiador de diapositivas en una mano, un puntero láser en la otra, y por lo tanto sin ninguna para cambiar las páginas de sus notas. En más de una ocasión he visto conferencistas que oprimen la tecla de avance de diapositiva cuando querían activar el rayo láser, y viceversa. Los controles del cambiador de diapositivas fueron agregados a los punteros láser, cuya cubierta naturalmente se agrandó —como dispositivos a los que se les dio una forma parecida al familiar control remoto doméstico, con el que la mayoría de las manos se sienten cómodas al sostenerlo y manipularlo—. De este modo, el puntero láser evolucionaba tanto hacia la intensificación como hacia la complejización. Pero no cualquier combinación funcionaba para todos los usuarios.

El éxito y el fracaso son los dos lados de la moneda del diseño. Esto no es nada nuevo. Como pasó con el puntero, se puede suponer que virtualmente todos los primeros objetos utilizados en tiempos prehistóricos se han encontrado en la naturaleza: cuevas en las cuales buscar refugio, piedras con que cazar (y pelear), ramas caídas para alcanzar la fruta en lo alto de los árboles, varas para introducirlas en las colmenas y agujeros de los insectos, conchas para recoger agua de un lago, troncos caídos y piedras para cruzar un arroyo. Aunque esos objetos quizá no requirieron ser trabajados, su sola elección para un propósito hizo que fueran diseñados. Todo lo que hemos usado desde entonces también ha sido diseñado, en el sentido de que se ha adquirido, adaptado, alterado, arreglado o ensamblado deliberadamente para conseguir un objetivo específico. Los objetos diseñados son los medios por los cuales alcanzamos los fines deseados. Si los fines no siempre han justificado los medios, por los menos los han inspirado. ¿Pero cómo evolucionan los objetos de vara y piedra a ladrillos y cemento? ¿De conchas a cucharas? ¿De troncos a puentes? ¿De cuevas a castillos?

Cada vez que usamos cierto *objeto* para hacer *algo* que esperamos haga, lo probamos. Esta prueba no es necesariamente consciente, pero siempre es eficaz y de trascendencia. Sin duda, con la prueba de cada ejemplar de un objeto también probamos la hipótesis general sobre la que se basan, ya sea consciente o inconscientemente, nuestras expectativas. Si el objeto pasa la prueba, lo declaramos un éxito —por lo menos hasta que se realice la siguiente prueba—. Las pruebas exitosas son poco interesantes. Si el objeto no pasa la prueba, decimos que éste (y la hipótesis) han fallado. Los fracasos son notables. Los fracasos siempre nos enseñan más que los éxitos sobre el diseño de los objetos. Y por lo tanto, con frecuencia los fracasos conducen a los rediseños —a objetos nuevos, mejorados—. Los diseñadores y los fabricantes modernos lo pueden hacer por sí mismos, o tal vez reciban el estímulo de los consumidores, quienes son esencialmente críticos de diseño que votan con sus compras.

Tengo una versátil pieza de equipaje de mano que he sometido a muchas pruebas. Es

una maleta con ruedas que cabe en los compartimientos superiores de un avión. La maleta tiene muchos cierres, lo cual me da acceso a una variedad de bolsillos externos, uno de los cuales es expandible. Cuando mi maleta estaba nueva, con frecuencia llenaba ese bolsillo con libros y carpetas, pensando que no tendría que cargar aparte una maleta para libros. Con frecuencia, estando el bolsillo tan lleno, la maleta no cabía en el compartimiento. Estas experiencias me enseñaron los límites a los que podía expandir el bolsillo, aunque en sí éste tenía mucha más capacidad. En el frente de la maleta hay un bolsillo más pequeño no expandible pero que puede abrirse por cualquier extremo. En un viaje puse un libro en ese bolsillo y cerré el cierre superior pero olvidé cerrar el inferior, que había abierto la noche anterior para sacar el mismo libro. Sólo me di cuenta de que el libro se había caído en el vestíbulo del hotel cuando un extraño corrió detrás de mí con él. La maleta funciona como está diseñada sólo cuando la uso como está diseñada.

Mi maleta con ruedas tiene dos asas convencionales, una en la parte superior y otra a un lado. He encontrado el asa superior más conveniente para cargar la maleta al subir y bajar escaleras, algo que hago a menudo porque vuelo con frecuencia. El asa superior también es buena para cargar la maleta en el pasillo de los aviones más grandes. Antes, la forma en que subía la maleta al compartimiento hacía que el asa lateral fuera inaccesible para sacarla cuando terminaba el vuelo. Eso provocó algunas uñas rotas. Ahora pongo atención a cómo guardo la maleta, asegurándome de que una de las asas siempre quede hacia afuera. Ambas asas están reforzadas con Velcro, para que cuando no están en uso se peguen a la maleta y no se maltraten con el equipaje de otros pasajeros o por el trato que recibe cuando registro el equipaje.

Ya que es una maleta con ruedas, también tiene un asa plegable con la cual puedo jalarla en los aeropuertos y estacionamientos. Cuando está muy pesada, jalarla de esa asa resulta un poco incómodo. He notado que los pilotos y los sobrecargos, quienes casi invariablemente tienen este tipo de equipaje, tienden a colgar una segunda maleta al frente en vez de apilarla en la parte superior, como yo lo hacía. Ahora sigo el ejemplo de los profesionales. Ese modo de colgarla sirve de contrapeso a la maleta y por lo tanto disminuye la fuerza descendente en la mano que jala, haciendo que sea menos probable que cambie de mano con tanta frecuencia.

Una vez, durante un viaje largo, mi esposa compró una nueva maleta con ruedas. Lo hizo en una tienda que contaba con una gran variedad, así que elegir una entre tantos diseños tan similares no fue una decisión fácil. Después de reducir las opciones a unas cuantas que tenían la cantidad y disposición de espacio necesario para el equipaje, probó cada una sintiendo las asas y jalando la maleta (vacía) a lo largo del pasillo alfombrado de la tienda. Sólo después de que hubo elegido y comprado su maleta y la llevaba de vuelta al

hotel nos dimos cuenta de que sus ruedas hacían mucho más ruido que las de la mía, en especial cuando pasaba por una acera poco uniforme. Además, un día en que estaba demasiado pesada y jalé la maleta, advertí que su asa era más corta y por lo tanto más cercana al piso que el asa de la mía. Esto no había importado tanto cuando la maleta estaba vacía, pero sí cuando estaba llena y pesada. Las pruebas a que la maleta había sido sometida en la tienda no se hicieron en las condiciones bajo las cuales sería utilizada en la terminal del aeropuerto. Lo que parecía ser una pieza de equipaje cuyo diseño sólo difería estéticamente del de la mía, resultó ser también muy diferente en lo funcional. Su rendimiento no fue el que se esperaba, y mi esposa y yo hemos aprendido a ser compradores más críticos la próxima vez que adquiramos una pieza de equipaje o cualquier otra cosa.

“El fracaso es una diferencia inaceptable entre la expectativa y el desempeño observado”, de acuerdo con la definición integral utilizada por el Consejo Técnico sobre Ingeniería Forense [Technical Council on Forensic Engineering] de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles [American Society of Civil Engineers].<sup>[4]</sup> Un buen diseño es por lo tanto un análisis de fallas proactivo, algo que deben practicar tanto el diseñador como la persona que elige entre varios diseños. Anticipar y descubrir cómo puede fallar un diseño —o incluso solamente cómo puede ser percibido que falle— es el primer paso para hacerlo un éxito. Aun así, si estamos diseñando o comprando equipaje, o construyendo u ocupando almacenes, podemos pasar por alto los detalles que hacen la diferencia entre el éxito y el fracaso. Así como no es preciso que una maleta con ruedas se desmorone por completo para ser una decepción, un edificio no tiene que derrumbarse de manera catastrófica para ser considerado un fracaso. Un almacén con una puerta más angosta que las mercancías y que se construyó precisamente para almacenar, es un rotundo fracaso.

Una “diferencia inaceptable entre la expectativa y el desempeño observado” puede resultar cuando una estructura simplemente se construye y se agrieta. En tal caso, quizá haya un desacuerdo considerable sobre qué tanto debía esperarse y qué tanto debería considerarse inaceptable. Desafortunadamente, a veces las expectativas están expresadas sólo en retrospectiva, en la sala de un tribunal. A pesar de eso, cuando fracasa una parte de algo planeado para ser exitoso, todo el diseño ha fracasado; y es una señal para examinar, para el cambio, para el rediseño.

La nueva Sala de Conciertos Walt Disney en Los Ángeles es una sorprendente obra de diseño arquitectónico y de ingeniería. La imaginación de Frank Gehry ha dado a la dura fachada de acero inoxidable la apariencia de suaves y maleables pétalos de flor. Sin embargo, poco tiempo después de haber terminado el edificio surgió un problema inesperado. La superficie de una sección —cuyo revestimiento tenía un acabado brillante en vez de la textura de cepillado del resto de la estructura— reflejaba la luz del sol en un condominio de

la calle de enfrente, cegando a sus inquilinos y aumentando la temperatura hasta en 15 grados Fahrenheit. Si el inadmisibile resultado se hubiera anticipado, se habría utilizado un acabado no reflejante. Cuando visité la sala de conciertos se había colocado una tela parecida a una red sobre la agresiva superficie para mitigar el efecto no deseado mientras se buscaba una solución permanente. La solución —o rediseño— fue, poco sorprendentemente, opacar el brillo del acabado, y sólo quedaba elegir el proceso para hacerlo.[5] Después de casi un año de estudiar el problema, se anunció que se puliría la sección incómoda para “opacar el acabado a fin de que se asemejara el exterior del resto del edificio”. [6]

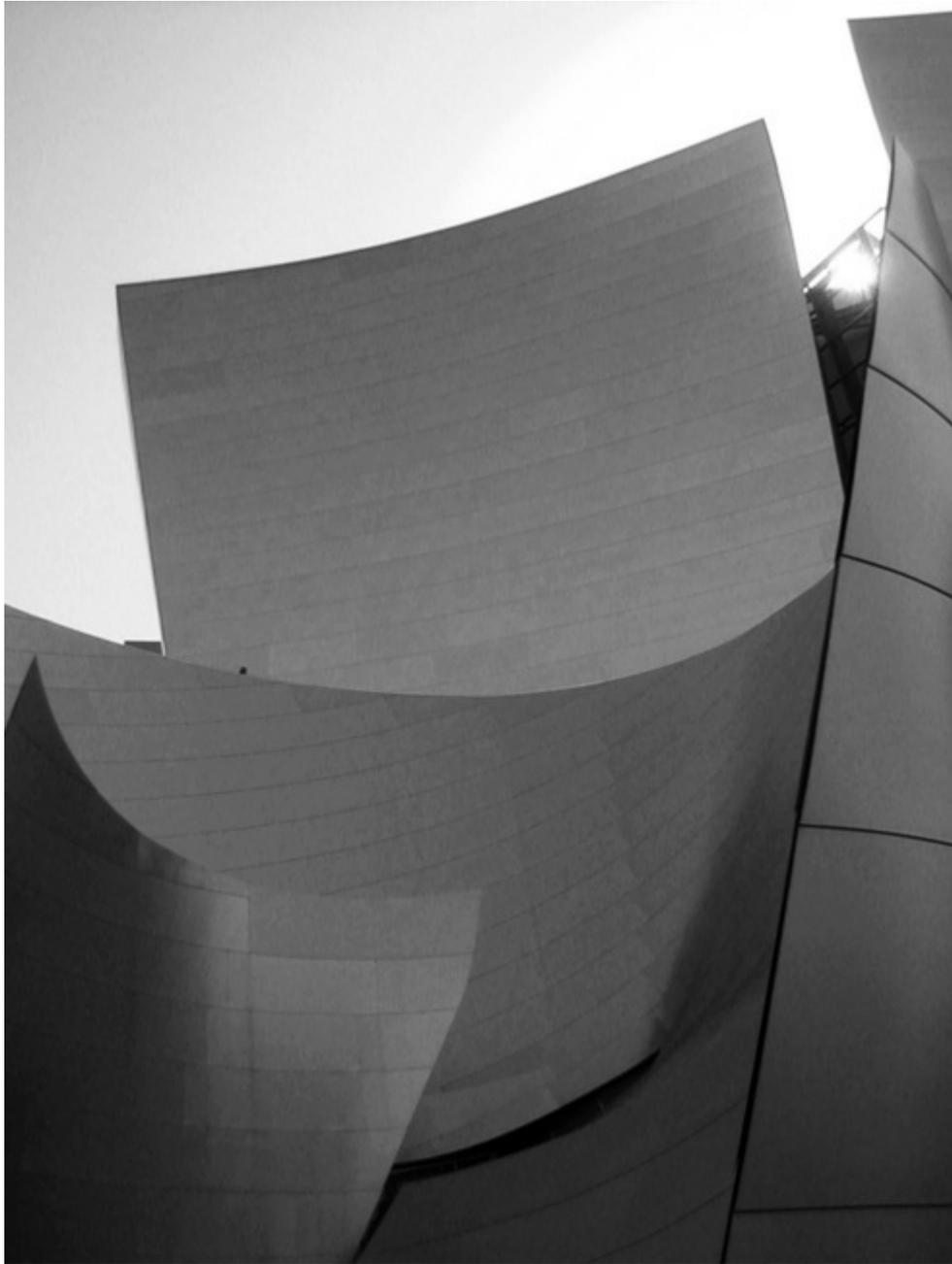


Figura 5. Algunos segmentos de la fachada de la Sala de Conciertos Walt Disney en Los Ángeles. (Fotografía de Catherine Petroski.)

Si la esquina de la sala de conciertos hubiera tenido una orientación diferente, el revestimiento de acero inoxidable no habría reflejado la luz solar en el condominio ni en cualquier otro edificio cercano, y no habría habido ningún problema. Tal vez esa fachada habría sido aclamada como un éxito rotundo. De hecho, los elogios de la crítica a la estructura podrían haber reforzado la convicción de Gehry de que yuxtaponer acero inoxidable brillante y cepillado producía el efecto estético deseado. Sin las medidas correctivas necesarias por el problema de reflejo, los futuros edificios de Gehry podrían haber sido diseñados con variaciones cada vez más atrevidas en cuanto al uso de tal revestimiento —y acaso obtener grandes elogios—. Mientras las fachadas no concentraran excesiva luz solar sobre sus abrasados vecinos, el revestimiento brillante podría haber sido utilizado cada vez con más confianza, hasta que lo ocurrido en Los Ángeles le sucediera a algún proyecto posterior. Ese fracaso incontrovertible habría revelado una falla que sólo había estado latente en todos los anteriores edificios “exitosos”.

La consecuencia no planeada del reflejo de la luz solar es sólo una de miles de formas en que el diseño arquitectónico puede fallar. Durante un invierno, en otro nuevo edificio de Gehry —la Weatherhead School of Management en la Case Western Reserve University— comenzó a derretirse la nieve y el hielo que había en el techo inclinado de acero inoxidable, poniendo en peligro a los peatones. La superficie curvilínea y lisa no proporcionaba ninguna barrera para detener la congelada precipitación acumulada que, una vez derretida, caía del edificio y formaba un arco como para esquiadores de esquí acrobático. Se dice que un arquitecto afirmó que “los beneficios de un edificio sorprendente compensan un problema menor”. También dijo: “Si vas a tener ese edificio brillante y hermoso con todas sus cosas maravillosas, éste es un precio muy pequeño por pagar”. No todos estuvieron de acuerdo. Entre los arreglos considerados en Cleveland estaba la instalación de cables para calefacción para prevenir, en primer lugar, la acumulación de nieve y hielo.<sup>[7]</sup>

Lograr que todo funcione es una tarea difícil en cualquier circunstancia. Cuando se estaba fabricando un nuevo tren —denominado M7— para el Ferrocarril de Long Island, se tomaron en cuenta las quejas de los pasajeros sobre los diseños anteriores. Después de muchos años de servicio, los asientos de neopreno de los vagones anteriores, M1 y M3, habían “perdido gran parte de su rebote”, tenían “hundimientos” y se les culpaba de los dolores de espalda. Así que los asientos del M7 fueron “inyectados con silicón, les dieron soporte lumbar y un reposacabezas” para mejorarlos ergonómicamente. Los pasajeros también se habían quejado de la falta de un descansabrazos en el asiento de la ventana, y en el rediseño “se moldeó uno en la pared del vagón”. Los miembros del grupo de sondeo a quienes les gustaban los asientos de otro modelo de vagón, el autobús de dos pisos C3, dijeron que “encontraban un poco cortos los descansabrazos”. Así que los del M7 se hicieron

cuatro décimas de pulgada más grandes que los del C3. Sin embargo, esta modificación aparentemente insignificante pero bien intencionada de los diseñadores “enganchó su sueño de perfección en el diseño de los vagones del ferrocarril en el futuro”. A dos años de la introducción del M7 “se habían presentado 73 quejas por ropa rasgada”, lo que se atribuía no sólo a la longitud extra sino también al material similar a la “goma de borrar” de los nuevos descansabrazos, que jalaba los pantalones y no los soltaba cuando el desafortunado pasajero se levantaba de su asiento.[8]

Culpar de un desafortunado incidente al mal diseño tal vez funcione para un convincente reclamo de daños —o incluso una demanda exitosa— pero la relación entre intención y resultado, entre causa y efecto, no siempre es lo que parece. Más de 3 000 cruceros de la ciudad de Nueva York tienen señales que instruyen a los peatones: “Para cruzar la calle / Oprima el botón / Espere la señal para caminar [To Cross Street / Push Boton / Wait for Walk Signal.]”[9] Con frecuencia transcurre mucho tiempo entre el momento en que se oprime el botón y en que aparece la señal de avanzar, pero los ciudadanos conscientes esperan obedientemente. Suponen, uno supone, que la demora es parte del diseño del sistema. Quizá sea un “mal diseño”, pero finalmente cambia la luz.

Estas “señales semiaccionadas” se comenzaron a integrar en los cruceros de Nueva York alrededor de 1964. Eran la “idea genial del legendario comisionado de tránsito Henry Barnes, el inventor de la ‘Danza Barnes’, el sistema de tránsito que detiene a todos los vehículos en el cruce y permite a los peatones atravesar la calle en cualquier dirección al mismo tiempo”. En su mayoría, los botones de la luz de cruce se instalaron donde una calle secundaria cruzaba con una principal, y el tránsito en ésta sólo se detendría si un sensor en el pavimento detectaba un vehículo que esperara entrar por la calle secundaria o si alguien oprimía el botón, haciendo que la luz cambiara por 90 segundos. Con un aumento en el tránsito (en 1975, cerca de 750 000 vehículos entraban diariamente a Manhattan), las señales se activaban con frecuencia por el tránsito en las calles secundarias. Los botones de la luz de cruce difícilmente parecían necesarios, y oprimirlos interfería con la coordinación de los semáforos controlados por computadora recién instalados en muchas calles. Por consiguiente, la mayoría de los dispositivos fueron desactivados a finales de la década de 1980, pero los botones y las señales que contenían sus instrucciones de uso permanecieron en el mismo lugar. Evidentemente nunca hubo un anuncio oficial sobre la situación de los “placebos mecánicos”. [10]

Aunque la mayoría de los botones de cruce de la ciudad de Nueva York están “apagados” cuando parecen “encendidos”, muchos aparatos electrónicos domésticos permanecen de hecho “encendidos” cuando los hemos “apagado”. Esta característica pasiva del diseño es necesaria para que nuestros estéreos, televisores y otros electrodomésticos

puedan responder al tacto de un teclado o a la señal de un control remoto. De acuerdo con un estudio, en el transcurso de un año un porcentaje considerable de hornos de microondas “consumen más energía en *standby* (corriendo sus relojes y manteniendo activas sus pantallas táctiles) que en cocinar”. Este fenómeno se ha denominado “desperdicio de energía por el uso del *standby*” y asciende hasta el 10% de la electricidad utilizada en los hogares estadounidenses.[11]

Cuando las computadoras en realidad están “encendidas” surgen singularidades igualmente extrañas del diseño. En 1998, IBM incorporó una característica muy útil en su ThinkPad: el teclado se puede iluminar, lo cual es obviamente práctico cuando se tecldea con muy poca luz, como en la cabina oscurecida de un avión. Sin embargo, como no había un lugar donde poner un interruptor de encendido-apagado o botón o tecla para la función de iluminación del teclado, ésta se activa al oprimir la poco intuitiva combinación Fn+PgUp. A pesar de que hay un icono de lámpara en la tecla PgUp, evidentemente pocos usuarios sabían de su importancia para que el teclado se pudiera iluminar, y entonces continuaban escribiendo en la oscuridad. Según el director de diseño de IBM: “No todo puede tener un botón. Si no los limitáramos, estaríamos viendo productos con tantos botones como un acordeón”. [12] Las opiniones dominan el diseño.

Como éstos, la mayoría de los fracasos y nuestras reacciones a ellos no son cuestiones de vida o muerte. En efecto, la mayoría de los fracasos son defectos realmente inofensivos que por lo general no alarman demasiado al fabricante ni al usuario. Las computadoras y su *software* son conocidos por trabarse inexplicablemente mientras llevan a cabo una tarea. Puede parecer que todo está funcionando bien, pero de pronto hay algún problema y todo se detiene. No hay respuesta al oprimir cualquier tecla, e incluso presionar las teclas Ctrl+Alt+Delete no sirve aparentemente de nada. En esos casos, el único recurso parece ser jalar el enchufe o retirar la batería, esperando que nada se haya perdido al restablecer la energía. Con frecuencia se culpa del fracaso a algún “error” desconocido de *hardware* o *software*, término que sugiere algo al mismo tiempo no deseado pero omnipresente, por lo general inofensivo pero potencialmente mortal. Un error de *software* puede hacer que la computadora “falle”, pero no hay daño físico visible. Nos hemos acostumbrado simplemente a reiniciar la máquina cuando esto sucede, esperando que cualquiera que sea el problema haya desaparecido. El fenómeno es tan común que se ha endoculturizado en la forma de chistes que todos entienden. Según uno de ellos, un físico, un ingeniero y un informático van en un automóvil, cuando de repente éste comienza a echar humo y se detiene el motor. El físico opina que el problema es teórico y tiene que ver con un par de torsión; el ingeniero dice que se trata de un problema mecánico que se puede arreglar con un ajuste, y el informático argumenta que todos salgan del auto, esperen un minuto y después vuelvan a

meterse e intenten reiniciarlo.[13] De hecho y con toda seriedad, incluso los físicos y los ingenieros recurren a esta solución. “Muchos usuarios reinician rutinariamente su computadora personal” y, por lo tanto, según una propuesta, “los ingenieros deberían diseñar sistemas para que se reinicien con gracia”. [14]

Se considera que reiniciar todo el sistema es “la forma más común de arreglar los defectos de un sitio *web*”, [15] cualquiera que sea su origen. Un “análisis detallado de las causas típicas de fracaso para tres sitios de internet” atribuye 15% a errores de *hardware*, 34% a problemas de software y el 51% restante a errores operativos. No es claro qué hacer con la causa principal:

Quando los diseñadores de otros sistemas de ingeniería han descubierto una tendencia al error operativo, con frecuencia han intentado eliminar la necesidad de aporte humano. Eliminar a los operadores puede llevar a una dificultad bien establecida que se conoce como la Ironía de la Automatización. Como los diseñadores por lo general pueden reducir pero no eliminar la necesidad de intervención humana, a menudo estos esfuerzos empeoran las cosas, porque los ingenieros generalmente automatizan las tareas sencillas y dejan los asuntos pesados para las personas. Estas medidas significan que sin regularidad los administradores deben realizar tareas difíciles en sistemas desconocidos: una receta segura para el fracaso. [16]

El fenómeno es similar al que recuerda un ingeniero que comenzó su carrera antes del uso omnipresente de las computadoras. Su jefe le dijo que “era posible crear un objeto ‘sencillo de manejar’, pero probablemente no ‘a prueba de tontos’”. Además, el jefe esperaba que los ingenieros más jóvenes no intentaran “mejorar las cosas empeorándolas” con innumerables cambios de diseño. [17] En la actualidad, diríamos, innumerables actualizaciones.

Podría decirse que las computadoras se encuentran entre las cosas más complicadas y misteriosas que los consumidores compran y manejan. Incontables electrones invisibles conducen instrucciones de manera instantánea del teclado a la pantalla, en la cual podemos manipular palabras, números e imágenes como por arte de magia. Los compactos DVD, más pequeños que los anteriores discos de vinilo a los que sólo les cabían dos breves piezas, ahora contienen todos los sonidos e imágenes de un musical de Broadway —y las proyecta en la pantalla con un solo clic del ratón—. Para hacer todo lo que hace, Windows 2000 fue diseñado con 20 millones de líneas de código fuente, y Windows XP con 40 millones. [18] Por todos sus rasgos y defectos —y características conocidas y desconocidas— confiamos a las computadoras, como a nuestros confidentes, nuestros pensamientos más privados y contamos con ellas para nuestros cálculos financieros más críticos. Sabemos que las computadoras tienen errores de *software* y que no funcionan a la perfección; sin embargo, cuando funcionan suponemos que nuestras palabras están bien guardadas y que nuestros números cuadran de manera confiable. Una suposición tan básica no está necesariamente justificada.

Los errores de *hardware* tienden a ser los menos comunes porque “los diseñadores de los chips del microprocesador han agregado con regularidad circuitos para simplificar la prueba de los chips, aunque estas adiciones aumentan el tamaño de éstos y no se vuelven a usar una vez que los microprocesadores salen de la fábrica”. No obstante, esta propuesta se ha considerado redituable “porque los circuitos de prueba permiten a los diseñadores inyectar ‘fracasos’ de manera artificial para verificar que el chip los detecta y se recupera de ellos de manera correcta”. Se ha propuesto que los diseñadores de los sistemas de cómputo creen en un *software* análogo los “medios para inyectar errores con objeto de probar la habilidad de los sistemas para estar de nuevo en servicio”, proporcionando por lo tanto una manera de comparar la confiabilidad de diferentes sistemas.[19]

El que ha sido llamado “el error de *hardware* más publicitado en la historia de las computadoras” se descubrió en 1994 por un profesor de matemáticas que estaba usando el entonces nuevo procesador Pentium en su trabajo sobre números primos. Encontró que bajo ciertas condiciones, al multiplicar dos números se producían resultados incorrectos. Al principio no sospechó del nuevo chip de la computadora y buscó en otras partes el error — incluso en su propio trabajo—. Desconcertados por el misterio, otros matemáticos, informáticos e ingenieros también dedicaron una cantidad extraordinaria de tiempo intentando descubrir qué era lo que estaba mal. Intel, el fabricante del chip, ya había descubierto el error pero no ofreció voluntariamente la información sobre lo que llamaron un “defecto sutil”. En lugar de retirarlo del mercado, Intel continuó vendiendo el chip imperfecto. Cuando finalmente admitió el problema, que mientras tanto ya había corregido, la compañía pidió a los “propietarios de sistemas Pentium que justificaran su necesidad de remplazar el chip”, demostrando que el tipo de cálculos que efectuaban requerían suficiente precisión para hacer la diferencia. Esta posición enojó a muchos usuarios y defensores del consumidor, y con el tiempo Intel sucumbió a la presión y accedió a proporcionar chips de remplazo a quien los pidiera.[20]

Al error de *software* de Pentium se le hizo demasiada publicidad en gran parte por la perseverancia de avezados usuarios de computadora y por la forma en que Intel llevó las relaciones públicas del asunto. Al mismo tiempo que estaba en las noticias, Microsoft se disponía a distribuir las copias “beta finales” del sistema operativo Windows 95. Un crítico anticipó que: “Incluso con años de pruebas, y potencialmente más de un millón de usuarios de prueba, habrá errores de *software* en Windows 95. Es un hecho”.[21] Eso puede ser verdad, pero se ha citado a Bill Gates diciendo: “No hay errores importantes en nuestro *software* que un número importante de usuarios quiera arreglar”.[22] Esto también puede ser un hecho, ya que “los consumidores se han acostumbrado tanto al *software* con imperfecciones” que los parches y las actualizaciones se pueden ofrecer al público sin

usuarios demasiado enojados.[23]

Con el desarrollo de internet y de la *world wide web*, las capacidades de este objeto que se conoce como *mi laptop*, con todos sus defectos, se han multiplicado virtualmente sin límites. Cuando una vez le pedí a Google que encontrara algo, informó que había “buscado 4 285 199 774 páginas web” en 0.24 segundos para arrojar “cerca de 203 000” resultados en respuesta a mi duda relacionada con la introducción de la Nueva Coca. (Un año después se buscarían más de 8 000 millones de páginas.) Tal vez no sea asombroso que de cuando en cuando mi computadora se congele, como lo haría cualquier persona con el solo pensamiento de completar tan rápido una tarea como ésta. Los fracasos fáciles de pasar por alto, como los accidentes de las computadoras personales, son esperados y un lugar común y, por lo tanto, no llaman la atención. Como hacemos cuando el teclado se traba, lo aceptamos (ya que no tenemos otra opción) y empezamos de nuevo. Lo hacemos con diferentes grados de enojo y con diversas muestras de indignación, dependiendo de la tarea que se realiza y el plazo de entrega con que estamos trabajando, pero por lo general sólo reiniciamos la computadora y seguimos con nuestro trabajo. Comúnmente, ni siquiera molestamos al fabricante, así que éste tal vez ni se entere de qué tan extendido puede estar el problema de su producto —aunque eso pueda parecer poco probable—. Pero los fracasos colosales, como el accidente de una gran red entera de computadoras, son relativamente raros, y por eso ocupan los encabezados de las noticias.

Hay un grupo de personas que no descarta, o tan sólo acepta con facilidad, incluso los fracasos más triviales. De hecho, ellos ven fracasos donde la mayoría de nosotros sólo ve éxitos. Ellos son los inventores, los ingenieros, los diseñadores del mundo, quienes siempre están tratando de mejorarlo con los objetos que hay en él. Para estos intrépidos precursores del propósito, un fracaso de cualquier tipo no es tanto una decepción como una oportunidad. Retuerquen los objetos que conocemos para convertirlos en objetos que ni siquiera sabíamos que necesitábamos. En conjunción con las ventas y la gente de mercadotecnia —ellos mismos de alguna forma diseñadores— cambian el mundo con un objeto a la vez. Y la única característica común de estas personas creativas es la forma en que ven el fracaso. Reconocen que un fracaso no sólo les ofrece la oportunidad de llevar a cabo otra vez el proceso de diseño y desarrollo sino que también les permite concebir algo nuevo y mejorado para eludir el fracaso. De acuerdo con Ralph Baer, quien ha sido llamado el “padre del videojuego casero”, los inventores comparten la característica de “ver el mundo como si todo en él necesitara ser arreglado”. [24]

Un joven, Thomas Fogarty, encontró algo que necesitaba arreglo mientras trabajaba como técnico quirúrgico en la década de 1950 y presenciaba lo que en ese entonces era la cirugía estándar para retirar un coágulo de sangre de una arteria obstruida en una pierna. El

procedimiento implicaba hacer una larga incisión, que en algunos casos se extendía del abdomen a la rodilla, para exponer el vaso sanguíneo coagulado. La larga y complicada operación tenía un alto índice de fracaso y podía terminar en una amputación o en la muerte. El deseo de reducir la incidencia del fracaso en este procedimiento llevó a Fogarty a concebir el primer catéter de balón del mundo, el cual patentó en 1969.[25] Continuó inventando y patentando muchos otros dispositivos médicos y en el proceso obtuvo mucha experiencia con intentos fallidos. Como cualquier inventor, tomó estos contratiempos con calma, reconociendo que “el fracaso es el preámbulo del éxito”. [26]

En el diseño, el fracaso no es sólo el preámbulo sino el camino hacia el éxito. El fracaso de un objeto o tecnología existente ofrece, además, la motivación inicial para buscar una mejora en algo o algún proceso y los medios para desarrollar cada vez más ideas y prototipos de inventos patentables. El primer prototipo de Fogarty para el catéter de balón fue creado al emplear técnicas del atado de moscas de la pesca para sujetar la punta cortada de un guante de látex a un catéter de plástico.[27] Los prototipos analizados por un jurado son importantes para eliminar los errores de los diseños. Hacer prototipos puede verse como una “especie de bloc de dibujo tridimensional” y posibilitan que los potenciales patrocinadores y usuarios observen el invento como un objeto tangible. Dennis Boyle, un líder de estudios de la empresa de diseño IDEO, va más allá y ve la construcción de “prototipos rápidos y aproximados” como un medio para identificar los problemas al principio del proceso de diseño, cuando es menos costoso corregirlos. De acuerdo con Boyle, si un “proyecto no está generando cantidades de prototipos, entre ellos muchos que claramente no van a resultar, en serio algo está mal”. El credo es, por ende: “Falla al principio, falla seguido”. [28]

El sentimiento no es nuevo, ni es exclusivo del diseño. Según Samuel Smiles, el biógrafo victoriano de ingenieros que escribió sobre sus grandes retos personales y técnicos superados: “La sabiduría se adquiere del fracaso más que del éxito. Con frecuencia descubrimos lo que haremos al percatarnos de lo que no funcionará; y probablemente el que nunca cometió un error, nunca hizo un descubrimiento”. [29] El poeta estadounidense James Russell Lowell expresó una idea relacionada mediante un símil: “Los infortunios son como cuchillos, pueden servirnos o cortarnos, depende de si los tomamos por el mango o por el filo”. [30] Lo que fue cierto para los ingenieros y poetas, al igual que para todos, en el siglo XIX, continúa siendo en la actualidad una verdad para todos. Como ha escrito el crítico de diseño Ralph Caplan: “Mientras más cambian las cosas, todo permanece igual”. [31]

Cómo reaccionan las personas al fracaso separa a los líderes de los seguidores, a los verdaderos diseñadores de los simples usuarios de los objetos. El profesor Jack Matson, de la Universidad Estatal de Pensilvania, cree tan plenamente en el papel del fracaso en el diseño que espera que sus alumnos fracasen para que puedan acreditar su curso de ingeniería de

diseño innovativo. El curso, al que llaman “Fracaso 101”, solicita a los alumnos “construir e intentar vender productos descabellados y con frecuencia inútiles”, como una parrilla de mano. Los alumnos más exitosos en el curso son los que corren más riesgos y por lo tanto quienes más fracasan. Matson espera llevarlos al punto “en que los alumnos aprenden a disociar los fracasos resultantes de sus intentos de tener éxito en que ellos mismos sean un fracaso”. Cree que: “La innovación exige que vayas más allá de lo conocido hacia lo desconocido, donde puede haber trampas y callejones sin salida. Tienes que trazar el mapa de lo desconocido. Trazas el mapa cometiendo errores”. No es muy diferente de tener los ojos vendados en un laberinto. Pegarse con las paredes puede significar un mal paso, pero la suma de esos malos pasos define un esbozo del laberinto. Mientras más rápido se cometan más errores, más rápido se traza el mapa del laberinto. Matson es un defensor del “fracaso rápido”.<sup>[32]</sup>

Ya sea rápido o lento, el fracaso y cómo evitarlo siempre han sido cuestiones centrales para el desarrollo de los diseños y su influencia trascendental. Aunque a menudo se considera apócrifa, la familiar historia de la entrevía estándar del ferrocarril de 1.45 metros sirve como ejemplo. Se cree que esta extraña distancia entre vías tiene sus raíces en la Antigüedad, cuando a todos los carros de guerra romanos se les dio el mismo espacio entre ruedas, el cual, se dice, se estableció que no fuera más ancho que el de los dos caballos que jalaban el carro. Este ancho, que prevaleció durante el Imperio romano, aseguraba que los caballos no jalaran un carro demasiado ancho en un espacio sólo suficientemente ancho para ellos. Mientras los carros estandarizados se extendieron en todo el imperio, hicieron surcos más y más profundos en los caminos romanos, incluidos los de Inglaterra. Entonces, la construcción de los carros ingleses incorporó el mismo ancho de la entrevía, para que sus ruedas no anduvieran en los surcos, el camino de menor resistencia y que causaba menos daño —y el de menor fracaso—. Las primeras vías y vagones de ferrocarril se construyeron con el mismo ancho entre ruedas porque los artesanos que los hicieron usaron los mismos patrones y herramientas que habían utilizado para los carros tirados por caballos. El ingeniero Robert Stephenson, quien cerca de 1850 participaría “en la provisión de la tercera red de ferrocarriles de la nación”,<sup>[33]</sup> adoptó lo que se conocería como la entrevía “estándar”.

El legendario ingeniero británico Isambard Kingdom Brunel no fue el único en reconocer la arbitrariedad de diseñar un ferrocarril del siglo XIX de acuerdo con lo que, según se afirma, es una antigua medida romana, y en vez de aceptar el “estándar”, diseñó su Great Western Railway con una entrevía de 2.14 metros, que se conoció como la entrevía “ancha”, a diferencia de la más angosta. Después de todo, los vagones del ferrocarril nunca correrían en antiguos caminos romanos ni ingleses. Al adoptar una entrevía más ancha, Brunel creía que podría diseñar vagones de ferrocarril más espaciosos, que ofrecieran un viaje más

cómodo a los pasajeros y que corrieran más rápido. En 1845 Gran Bretaña tenía 274 000 vías de entrevía ancha y 1 901 000 de entrevía estrecha, pero no era fácil que sus ferrocarriles siguieran progresando con entrevías incompatibles. Se designó una comisión real para estudiar el problema, y ésta recomendó que la entrevía más estrecha de Stephenson se volviera la estándar, argumentando que era más sencillo y más sensato que todo se convirtiera a esta medida. Como los primeros ferrocarriles de los Estados Unidos siguieron el modelo inglés, la extraña entrevía también se volvió el estándar estadounidense.<sup>[34]</sup> Sin embargo, no era el estándar en todo el mundo.<sup>[35]</sup> A lo largo del siglo XX, la entrevía “estándar irlandesa” —que también se utiliza al sur de Brasil y al sur de Australia— era de 2.28 metros. Esto dificultaba claramente la importación y exportación de material rodante e impedía la construcción de una vía de ferry que cruzara el mar de Irlanda. En 2000, en un recuento, había ocho “entrevías férreas principales” en el mundo. En diseño, que es más arte que ciencia, lo lógico no es siempre lo más práctico o lo más político —y viceversa—.

Mientras más rieles se colocaban con la entrevía estándar, se fue haciendo virtualmente imposible cuestionarla como el diseño por omisión. Las implicaciones de este diseño imperativo han tenido un gran alcance, afectando incluso los viajes al espacio a finales del siglo XX. De hecho, el diseño de los cohetes aceleradores sólidos esenciales para lanzar el transbordador espacial tuvo una fuerte influencia de la entrevía estándar. Como los cohetes los fabricó la Corporación Morton-Thiokol en su planta de Utah, tenían que diseñarse de tal forma que pudieran ser enviados por ferrocarril a través de las Montañas Rocallosas hacia el Centro Espacial John F. Kennedy en Florida. Los ferrocarriles cruzaban las montañas a través de túneles, cuyo ancho estaba ligado naturalmente al de la entrevía. Por lo tanto, los cohetes propulsores debían mandarse en secciones no mayores a las que podían pasar por los túneles. Una vez en el lugar del lanzamiento, se ensamblaban para formar los cohetes a su tamaño normal, incorporando las juntas o anillos tóricos que resultaron ser el detalle del diseño que inició el fracaso del *Challenger*.<sup>[36]</sup>

A pesar de que la elección de un diseño inicial pudo haberse originado en alguna decisión arbitraria, con frecuencia sucede que se han derivado tantas cosas de esa elección que cambiar cualquiera de ellas sería ocasionar una concatenación de fracasos. El primer uso de la película de 35 mm estuvo destinado a hacer filmes, empresa que Thomas Edison llevó a cabo en su “fábrica de inventos” de West Orange. Según la tradición de la compañía Kodak, George Eastman le preguntó a Edison qué tan ancha debía ser la película para su nueva cámara cinematográfica. Se dice que Edison levantó el pulgar y el índice separados por aproximadamente 35 mm y dijo: “Más o menos de este ancho”. Es muy probable que la historia sea apócrifa, ya que la película que usa una cámara obviamente tendría que haber sido especificada de manera más precisa. George M. C. Fisher, antiguo presidente de la

Eastman Kodak Company, ha ofrecido una explicación distinta: “Es más probable que un rollo de película de 70 mm, que era común en la década de 1890, fuera cortado a la mitad para hacer la película de 35 mm. Si ésta es la verdadera fuente del estándar, es tan arbitraria como la leyenda”.<sup>[37]</sup> Ni la película de 35 mm ni las cámaras que la utilizan podrían ser alteradas haciendo caso omiso de uno u otro de estos componentes, pero algunas veces un componente de una pareja de diseños se puede cambiar sin afectar la parte importante. No obstante, mientras el resultado sea funcional, el diseño tal vez falle estéticamente.

En 1994 se lanzó Aleve, una forma del analgésico naproxeno que se puede comprar sin receta.<sup>[38]</sup> Diez años después, la mayoría de los consumidores de las pequeñas pastillas azules se habían acostumbrado a encontrarlas en un frasco de plástico “a prueba de niños” y cuya parte superior no se podía desenroscar a menos que los dedos de una mano apretaran de la manera correcta las pequeñas cejas o pestañas a ambos lados del frasco, al mismo tiempo que la otra mano giraba la tapa en sentido contrario a las manecillas del reloj. La botella patentada tiene una forma aplanada que evita se resbale de la mano que la sostiene.<sup>[39]</sup> Sin embargo, podría decirse que el aspecto general del frasco, protegido por una patente de diseño aparte, había estado comprometido por la inclusión de las pestañas, que producen cambios poco elegantes e inesperados en la de otro modo superficie lisa blanca.<sup>[40]</sup> No obstante, claramente tuvieron una función importante y estuvieron asociadas con la presentación de la marca.

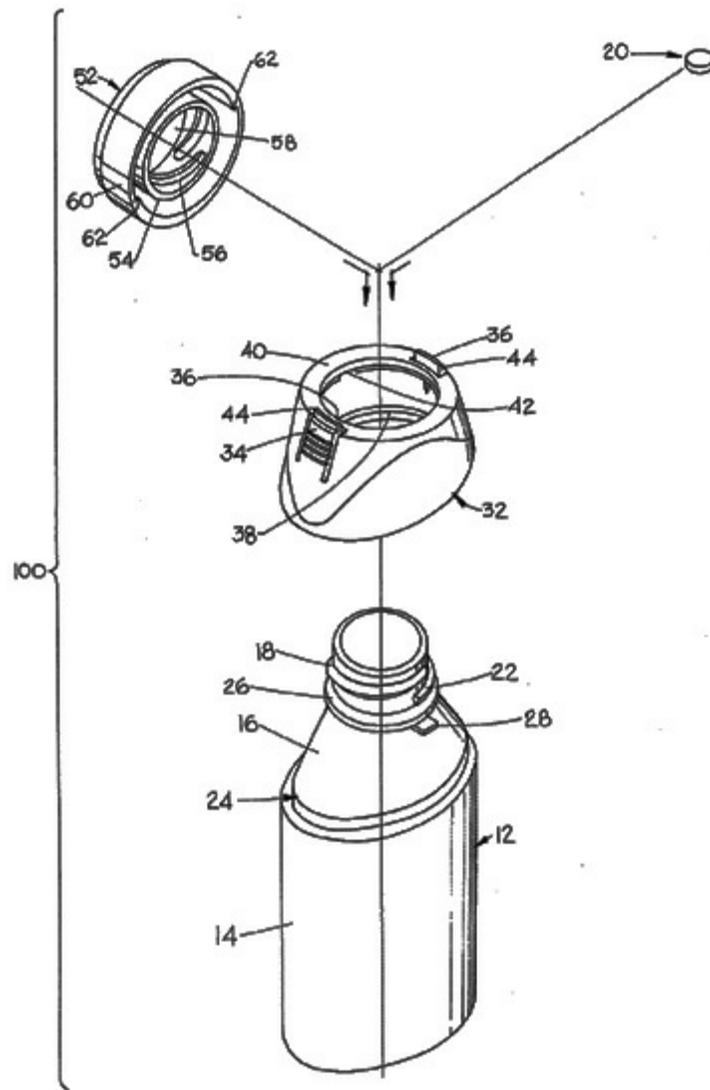


Figura 6. Una mejora en las presentaciones a prueba de niños para medicamentos potencialmente nocivos consistía en el diseño de un frasco de dos partes. (De Patente de EUA núm. 4 948 002.)

Aunque el frasco de Aleve estaba diseñado para ser “abierto con facilidad por adultos, en particular los que tienen problemas de destreza manual en manos y/o dedos”,<sup>[41]</sup> evidentemente en la práctica no era tan fácil para ellos, como lo probaron muchos artríticos que tomaban las pastillas. Antes de perder un importante segmento del mercado porque a su juicio la presentación era un fracaso, el fabricante diseñó una nueva “tapa para la artritis fácil de abrir” que recibió un “reconocimiento por presentación fácil de usar” de la Fundación para la Artritis.<sup>[42]</sup> A diferencia de la tapa anterior, con un borde liso que hacía juego con la textura del cuerpo del frasco, la nueva tapa tenía notorias estrías que permitían que cerrara mejor. Un cambio incluso más significativo se escondía en el interior de la tapa: no tenía las estrías que parecían dientes o levas que trababan las extensiones de la pestaña y mantenían la tapa anterior en su lugar. Como resultado, la nueva tapa se podía abrir y desenroscarse con facilidad del frasco, que ahora portaba la advertencia: “Este envase no es a prueba de

niños”. Con la nueva tapa, las pestañas al lado del frasco eran innecesarias, por supuesto, pero siguieron allí, junto con sus extensiones que ahora no tenían ninguna función, vestigios del sistema de tapa y frasco originales. Otro vestigio era la advertencia en la etiqueta, que en parte decía: “No se use si al abrir el frasco el sello de ‘seguridad SQUEASE®’ falta o está roto”. Era, por supuesto, la “seguridad SQUEASE” lo que faltaba.[43]

Sin duda en ese momento era menos costoso para el fabricante de Aleve usar un solo diseño de frasco (y de sello) sin importar la tapa que pusieran en el ensamblaje, pero esto se hizo a expensas de la estética, la consistencia y la integridad del diseño. La nueva combinación de frasco y tapa de Aleve fue una afrenta al buen diseño de un producto (y al sentido común) y un ejemplo de cómo los diseños y rediseños, con soluciones poco sistemáticas o provisionales a los problemas, pueden conducir del éxito al fracaso. Claramente el frasco a prueba de niños de Aleve (con pestañas de seguridad, etiqueta y sello) se había diseñado para ir con la tapa a prueba de niños; eran un “paquete”, de acuerdo con la patente que los protege.[44] Estrictamente hablando, un frasco diferente (y etiqueta y sello) tendrían que haber acompañado a la “tapa para artritis fácil de abrir”, a fin de evitar el conflicto de propósito y señal.



Figura 7. Las tapas a prueba de niños (a la izquierda) y la de “artritis” fácil de abrir (a la derecha) se han usado en frascos idénticos del analgésico Aleve. (Fotografía de Catherine Petroski.)

Como descubrí cuando compré un frasco de Aleve, el problema no terminaba con el frasco, por lo menos una pulgada más pequeño que la caja en que venía. Esto daba como

resultado un paquete más bien ruidoso. Cuando se agitaba a lo largo, el frasco iba y venía de acá para allá, golpeando los extremos con un ruido sordo que se combinaba con el ruido de las pastillas sueltas (los frascos de Aleve no contienen algodón, quizá otro intento por ayudar a los artríticos).[45] El frasco con 100 comprimidos estaba empaquetado en una caja del mismo tamaño de la que contenía un frasco más grande (plus) de 130 comprimidos, que también compré alguna vez. (De hecho, cantidades diferentes de Aleve vienen en una caja del mismo tamaño, lo que provoca confusión al comprar las pastillas.) Que el frasco y el tamaño de la caja no correspondan, como la parte superior dentada y el frasco liso, también indican lo poco apropiado del diseño.

Una revisión posterior de la presentación de Aleve reveló indicios de que sus creadores no prestaron mucha atención a los detalles de diseño gráfico, o por lo menos no demostraron un sentido crítico suficientemente agudo sobre la congruencia. La parte superior de la tapa a prueba de niños tenía impreso en el centro un par de flechas irregulares persiguiéndose entre sí en dirección opuesta a las manecillas del reloj y rodeadas con las palabras “seguridad SQUEASE”. Otro par más pequeño de puntas de flecha se encontraba en la orilla de la parte superior, y apuntaban al exterior hacia las pestañas de seguridad del frasco. Entre estas puntas de flecha estaban las instrucciones: “oprima las pestañas y gire la tapa”. Se infería que la dirección a la que apuntaban las flechas era la dirección en que se debía girar la tapa para abrirla. No se debía inferir, sin embargo, que las flechas que apuntaban hacia el exterior indicaban que se tenía que jalar las pestañas (más que oprimir) en esa dirección. En términos generales, las instrucciones impresas tendenciosas e incongruentes (y que apuntan en sentido contrario), si así se les puede llamar, debieron considerarse un defecto gráfico y de instrucciones que exigía un rediseño. El diseño gráfico de las instrucciones impresas en la parte superior de la tapa para artritis era mucho más directo. Las dos flechas que se perseguían entre sí tenían un diseño tridimensional con más gracia, y las palabras “tapa fácil de abrir” las rodeaban de una manera mucho más elegante. Como es comprensible, no había ninguna mención de los vestigios de las pestañas “SQUEASE”, un detalle distractor sin propósito estético o funcional. Esto también era un defecto que pedía a gritos un rediseño.

El fracaso del frasco a prueba de niños de Aleve para que los artríticos lo abrieran con facilidad fue evidentemente lo que generó su rediseño, no obstante la torpeza con que se hizo. La nueva tapa, a su vez, llevó a una advertencia adicional que se imprimió en la caja, ya saturada gráficamente: “Esta presentación es para hogares sin niños pequeños”.[46] Esa afirmación no estaba en el último frasco de Aleve que compré.[47] Esta presentación contenía 250 comprimidos en un frasco con otro diseño de tapa, que confería cierta congruencia al paquete. La tapa lisa y estriada era del tipo familiar que “empujas hacia abajo y giras para abrir”. El frasco mismo tenía la ahora clásica forma patentada de Aleve, pero sin las pestañas

a los lados. Sin ellas, el frasco podía estar y estaba hecho de una sola pieza, eliminando el ensamblaje horizontal que los puristas del diseño considerarían otra imperfección.[48] Finalmente, el sello se actualizó y simplemente decía: “Sellado por su protección”, eliminando así el último indicio del diseño original: “seguridad SQUEASE”. La nueva combinación de frasco y tapa tiene una apariencia mucho más limpia, que espero que permanezca estable por un tiempo. Mientras el diseño de la tapa para artritis había evolucionado funcionalmente en una dirección positiva, en lo estético había ido en una dirección negativa. En este sentido, había disminuido el diseño general del paisaje de encimeras y botiquines, que generalmente necesitan toda la ayuda que puedan obtener.

Aunque no siempre totalmente exitosos, inventores, creadores de productos y fabricantes encaran de manera constante el fracaso, ya sea formal, funcional o financiero. De ahí que encontremos una preponderancia de artículos en los estantes del supermercado con las denominaciones “receta mejorada”, “menos grasa”, “menos calorías”, “mejor sabor” y otras parecidas. Los criterios pueden diferir o no de los que rigen los productos farmacéuticos, pero no son menos comparativos: “fórmula mejorada”, “acción más rápida”, “alivio de larga duración”, “mejor sabor”, etc. El campo de la electrónica ha sido especialmente competitivo y comparativo, con publicidad que promueve dispositivos portátiles “más rápidos”, “más pequeños”, “más delgados” y “más ligeros”. Todos los productos que compiten —todos los diseños que compiten y evolucionan— necesariamente se comparan entre sí y sus predecesores, y todas estas afirmaciones comparativas de manera implícita atraen la atención sobre los defectos de la competencia —o de algún producto predecesor—.

La conocida marca Curitas data de principios de la década de 1920, pero la idea fundamental tiene una larga historia anterior. A mediados del siglo XX, las vendas se vendían con una cataplasma o linimento que se aplicaba a una herida y eran conocidas como cataplasmas de mostaza o, simplemente, cataplasmas. Cuando venían con una tira adhesiva para mantenerlas en su lugar, se les conocía como cataplasmas adhesivas. Sin embargo, la tecnología dejaba mucho que desear. En una patente de 1845 por una “mejora a las cataplasmas adhesivas”, William Shecut y Horace Day promovieron la porosidad de su diseño, lo que permitía que “la transpiración y demás material mórbido” escapara de la herida cubierta. Afirmaban que su mejora era “infinitamente superior” a las cataplasmas adhesivas existentes que se medicaban, a las que calificaban de “rígidas, duras y propensas a romperse, y cuando tras algún tiempo sufrían desgaste se arrugaban o se doblaban, lo cual ocasionaba mucha incomodidad”. Además, las cataplasmas adhesivas de mediados del siglo eran “sumamente difíciles de quitar”. A diferencia de éstas, las cataplasmas de Shecut y Day eran “siempre suaves, adhesivas y porosas”. [49] Un siglo después, tal vez los consumidores de Curitas (incluso algunos consumidores en los Estados Unidos los llamaban “cataplasmas”) se

preguntarían si en realidad la tecnología había avanzado o experimentado un retroceso.

La compañía Johnson & Johnson se fundó a mediados de la década de 1880 para fabricar vendajes quirúrgicos antisépticos recién ideados. Como director científico de la compañía, Fred B. Kilmer (el padre del poeta que escribió “Trees”) era el encargado de resolver las quejas sobre el producto. La respuesta de Kilmer a las quejas sobre las “irritaciones en la piel causadas por las cataplasmas de la compañía” fue empacarlas con talco. El talco pronto se vendió por separado como talco de bebé.[50] La Curita se inventó bajo la vigilancia de Kilmer, pero no en la compañía. En 1920 Earle Dickson, un comprador de algodón de Johnson & Johnson, vivía en New Brunswick, Nueva Jersey, con su nueva esposa, Josephine. Ella tenía tendencia a cortarse y quemarse en la cocina y cuando estaba sola en la casa le resultaba difícil vendar sus heridas con diferentes piezas de gasa y cinta adhesiva. A Dickson se le ocurrió la idea de hacer unas “vendas listas para usarse juntando cuadrados de gasa de algodón a intervalos con una tira adhesiva y cubrirlos con crinolina”. [51] La primera Curita [Band-Aid Brand Adhesive Bandages], que salió a la venta en 1921, medía 7.5 cm de ancho y 46 de largo, con el propósito deliberado de tener el tamaño y la forma necesarios.[52] (Compré un “vendaje” similar pero mucho más largo en Canadá hace algunos años. Se vendía bajo el nombre de la marca británica Elastoplast, y me pareció bastante conveniente de usar, siempre y cuando se tuvieran a la mano unas tijeras.)

En la actualidad, las Curitas de mi botiquín son de “tela flexible”, y la caja en que vienen promueve las mejoras sobre otras marcas y estilos: “Flexibilidad extra... Antiadherente... Mayor durabilidad”. Estas Curitas “se mueven contigo para adecuarse mejor... no se pegará a la herida para una suave remoción... se queda en su sitio por más tiempo”. Esto no es un despliegue publicitario: he descubierto que estas Curitas son todo lo que Johnson & Johnson afirma, y más. Una vez puse una de ellas en un tapete de baño para señalar una mancha para eliminarla cuando se lavara el tapete. La Curita se pegó con tal tenacidad que sólo se pudo quitar arrancando pequeños fragmentos de ella a la vez, pero éstos se llevaron consigo pedazos de tapete. Más que para no correr el riesgo de que se le hiciera un hoyo, pusimos el tapete en la lavadora con la esperanza de que la Curita flotara en el agua. Eso no funcionó. Fue sólo después de pasarlo por la secadora cuando, a su pesar, la Curita abandonó el tapete. Algo que funciona tan bien para lo que fue diseñado puede ser un fastidio cuando se le da un uso para el cual no estaba pensado.

Prácticamente todos los fabricantes hacen afirmaciones sobre la bondad de sus productos. Cuando Montgomery Ward estaba creando una nueva línea de aspiradoras, “los diseñadores comenzaron con un estudio para asegurarse de los datos sobre las características de todos los productos competitivos”. Como se informó en 1940 en un artículo de la revista de comercio *Electrical Manufacturing*, los resultados del estudio llevaron a una serie de

objetivos diseñísticos que incluían “mejor rendimiento en la limpieza, mejor apariencia, bajo costo, menor ruido al momento de operar, conveniencia en el manejo, menor peso y con la máxima accesibilidad al servicio”.<sup>[53]</sup> La lista de comparativos implícitos y explícitos podía haber sido reformulada con facilidad como una lista de los fracasos de la competencia: limpieza ineficiente, mala apariencia, alto costo, alto ruido al momento de operar, inconveniencia en el manejo, pesadas y con escaso acceso al servicio. Aunque se ha dicho que en la naturaleza “no hay fracasos, sólo retroalimentación”, en el diseño y la industria manufacturera existen ambos.<sup>[54]</sup>

Las garantías son reconocimientos del papel central que desempeña el fracaso tanto en la mente de los fabricantes como en la de los consumidores. Se está garantizando, por supuesto, contra la posibilidad de fracaso. Por mucho tiempo se anunció que el encendedor de cigarrillos y cigarrillos Zippo encendía “siempre a la primera”, una garantía implícita contra el defecto de no producir una llama, incluso en el viento.<sup>[55]</sup> Una garantía de 100 000 millas en un automóvil nuevo es la forma en que el fabricante da a entender que las partes garantizadas, por lo menos, no se gastarán antes de ese uso. Por extensión implícita, el mismo automóvil se mantendrá funcionando el mismo tiempo. De otra manera no sería competitivo.

El veterano capitalista de riesgo Michael Brown, en un imaginativo ensayo que tiene lugar en el año 2023, cuando sus hijos y nietos lo recuerdan, lo citan explicando cómo el máximo éxito de las pilas de combustible dependía de que lograran fiabilidad. Según Brown: “Cuando los fabricantes de pilas de combustible contaron sólo un fracaso en cerca de 5 000 horas, y cuando adivinaron qué fallaría, fueron capaces de ofrecer una garantía por ese periodo. También pagarían por cualquier trabajo extra que se necesitara en otros componentes mecánicos si tenías que visitar al concesionario más de una vez cada 50 000 kilómetros. Ni siquiera los mejores automóviles de la vieja guardia pueden hacer eso”.<sup>[56]</sup>

La fiabilidad de los automóviles “de la vieja guardia” que funcionan de manera convencional se ha vuelto sumamente alta, como es evidente cada vez que conducimos cientos de kilómetros en una carretera interestatal sin ver un solo vehículo descompuesto al lado del camino. Cuando vemos un automóvil con el capó levantado es por lo general de un modelo viejo, que nos recuerda lo común que era hace apenas unas décadas que se rompiera un ventilador, que una manguera tuviera una fuga, o que un motor se sobrecalentara. La fiabilidad (lo contrario del índice de fracaso), como se expresa a través de las garantías, se ha convertido en una herramienta de mercadotecnia esencial para ganar clientes sobre otras marcas de automóviles.

Pero librarse del fracaso manifiesto no basta para el éxito, como lo demuestra la historia de Oldsmobile. En 2000 General Motors anunció que la marca que había sido producida desde 1903 (con montos anuales que excedían un millón de automóviles) pronto dejaría de

fabricarse. No se trataba de que la línea de automóviles Olds no fuera fiable, sino que la compañía, que alguna vez lució el potente motor Rocket V-8 e introdujo las primeras versiones de la transmisión automática y la tracción delantera, simplemente no era capaz de encontrar su nicho tras la escasez de combustible de la década de 1970. Los modelos más pequeños de la marca cuyo nombre había estado asociado por tanto tiempo con automóviles grandes no pudieron mantener el mercado para los Olds. En gran parte, se culpó de su desaparición, que finalmente ocurrió en 2004, a la “práctica” de General Motors “de tapizar de manera diferente automóviles GM que tienen una apariencia similar y corren igual”, una práctica conocida como “ingeniería de tapiz”. Sin una identidad claramente distintiva que permitiera que se anunciaran como autos más grandes, más rápidos o de alguna otra forma claramente mejores que la competencia, los Oldsmobiles se quedaron atrás.<sup>[57]</sup> No lograron mantenerse en un mercado en que la imagen es, si no todo, algo muy cercano a todo.

Coca-Cola aprendió una vez una lección similar. Después de la segunda Guerra Mundial, la compañía perdió por años parte de su mercado, pues cayó de 60% precisamente después de la guerra a 24% en 1983. Gran parte de la pérdida fue la ganancia del malicioso competidor Pepsi Cola, cuyas ventas siguieron elevándose, mientras las de Coca se iban abajo. Evidentemente, como parte de una estrategia para detener la tendencia, en 1985 la compañía introdujo la Nueva Coca con el inigualable eslogan comparativo: “Lo mejor mejoró”. Según un informe, la “fórmula de la Nueva Coca era la de la Coca de dieta con azúcar real como sustitutivo de la sacarina”;<sup>[58]</sup> según otro, era simplemente “una versión de la original más dulce y más parecida a la Pepsi”.<sup>[59]</sup> Sin importar a qué sabía, a los bebedores de refresco de cola no les gustó la Nueva Coca, y en especial no les gustó el hecho de que a una semana de su introducción se hubiera suspendido la producción de la fórmula original de Coca-Cola. Los consumidores estaban molestos porque ni siquiera tenían la opción de regresar a su antigua favorita. Tres meses después de su atrevida acción, Coca-Cola volvió a la fórmula descontinuada como Coca Clásica, admitiendo un error: “Todo el tiempo, dinero y esfuerzo vertidos en la investigación sobre consumo de la nueva Coca-Cola no podían medir o revelar el profundo y perdurable apego emocional de infinidad de personas por la Coca-Cola original”.<sup>[60]</sup> Las teorías de conspiración abundaban; algunas personas creían que “el propósito deliberado de introducir la Nueva Coca” era provocar mayor atención y renovar la demanda de la fórmula clásica. “Otros creen que la Nueva Coca era una distracción para evitar que los estadounidenses notaran el cambio entre azúcar de caña y jarabe de maíz” en la fórmula original.<sup>[61]</sup> El consenso general parece ser que la compañía simplemente no logró apreciar que lo que veía como “una diferencia inaceptable entre lo esperado y el resultado observado” en la cuota de mercado, el consumidor lo vería reflejado en sabor y tradición. El fracaso toma muchas formas y desempeña muchos papeles.

- 
- [1] *The Encheiridion*, trad. W. A. Oldfather, Loeb Classical Library, 43. Citado en Bartlett, *Familiar Quotations*, 16ª ed., Boston: Little Brown, 1992, 108.
  - [2] Los punteros largos y delgados naturalmente se rompían con facilidad, y pocos de ellos subsisten en las salas de conferencias en la actualidad. El profesor David Billington, quien utiliza dos proyectores de diapositivas cuando imparte conferencias a su clase en un auditorio de la Universidad de Princeton, utiliza una larga pértiga de una ventana como puntero. En gran parte de la conferencia a la que asistí en diciembre de 2004, colocaba en el piso el extremo de la pértiga.
  - [3] Hace algunos años, como recuerdo de una conferencia que impartí en el Graduate Materials Engineering Program de la Universidad de Dayton, me presentaron con un puntero plegable de un diseño muy bien logrado. Cerrado, tiene el tamaño y el peso de una delgada pluma Cross, pero con un liso acabado negro mate. Plegado, el puntero delata el cromo de una antena de automóvil, pero con una punta negra de plástico, que contrasta con el fondo blanco de las diapositivas de ecuaciones, tablas y gráficas típicas que en ese entonces se usaban en una conferencia técnica.
  - [4] Kenneth L. Carper, "Construction Pathology in the United States", *Structural Engineering International* 1 (1996), 57.
  - [5] Jia-Rui Chong, "Whose Bright Idea Was This?" *Los Angeles Times*, 21 de febrero de 2004, B1.
  - [6] Robin Pogrebin, "Gehry Would Blast Glare Off Los Angeles Showpiece", *New York Times*, 2 de diciembre de 2004, B1, B9.
  - [7] Damian Guevara, "Snow, Ice Slide Off New Building; CWRU Closes Sidewalk for Safety", *Cleveland Plain Dealer*, 1 de marzo de 2003, B1.
  - [8] Michelle O'Donnell, "Rrrrrriipp! Another Victim of Those Pesky Armrests", *New York Times*, 28 de mayo de 2004, B2. Véase también Terence Neilan, "Grabbing Long Island, by the Pants Pocket", *New York Times*, 7 de julio de 2005, B2.
  - [9] Michael Luo, "For Exercise in New York Futility, Push Button", *New York Times*, 27 de febrero de 2004, A1, A23.
  - [10] Michael Luo, art. cit.
  - [11] "Plugging the Leak", *ieee Spectrum*, enero de 2001, 81.
  - [12] Katie Hafner, "Looking for the Eureka! Button", *New York Times*, 24 de junio de 2004, G1, G7.
  - [13] Véase, p. ej., <http://funnies.paco.to/mathJokes.html>.
  - [14] Armando Fox y David Patterson, "Self-Repairing Computers", *Scientific American*, junio de 2003, 54-61.
  - [15] *Ibid.*, 57.
  - [16] "Striving for Dependability", recuadro complementario, *ibid.*, 60.
  - [17] R. G. Elmendorf, carta al autor, 9 de marzo de 2004.
  - [18] Jessie Scanlon, "A Design Epiphany: Keep It Simple", *New York Times*, 20 de mayo de 2004, G5.
  - [19] Fox y Patterson, "Self-Repairing Computers", 60, 56.
  - [20] Linda Geppert, "Biology 101 on the Internet: Dissecting the Pentium Bug", *IEEE Spectrum*, febrero de 1995, 16-17. Véase también "Pentium Pandemonium: What It Means for Engineers", *Civil Engineering*, febrero de 1995, 26; "Intel Chips Away a Problem", *Engineering News-Record*, 2/9 de enero de 1995, 10.
  - [21] Peter H. Lewis, "The Inevitable: Death, Taxes, and Now Bugs", *New York Times*, 7 de marzo de 1995, C8.
  - [22] Citado en <http://www.makingitclear.com/newsletters/newsletter4.html>.
  - [23] Juliet Chung, "For Some Beta Testers, It's about Buzz, Not Bugs", *New York Times*, 22 de julio de 2004, G1, G7.
  - [24] Citado en "Ralph Baer: Video Games Wizard", *Prototype*, Boletín informativo del Lemelson Center for the Study of Invention and Innovation, National Museum of American History, Smithsonian Institution, verano de 2004, 3.
  - [25] T. J. Fogarty, "Embolectomy Catheter", Patente de EUA núm. 3 435 826.
  - [26] Jim Quinn, "Failure Is the Preamble to Success", *American Heritage of Invention & Technology*, invierno de 2004, 60-63.
  - [27] *Ibid.*, 60.
  - [28] Dennis Boyle, citado en Bart Eisenberg, "Thinking in Prototypes", *Product Research and Development*, enero de 2004, 28.
  - [29] Citado en <http://www.bartleby.com/l00/484.html>.
  - [30] Citado en *Bartlett's*, 16ª ed., 486.

- [31] Caplan, *By Design*, 229, 230.
- [32] Jeff Meade, “Profile: Jack Matson”, *ASEE Prism*, octubre de 1992, 36-37.
- [33] Michael R. Bailey, ed., *Robert Stephenson—The Eminent Engineer*, Aldershot, Hants.: Ashgate, 2003, xxiii.
- [34] Véase David P. Billington, *The Innovators: The Engineering Pioneers Who Made America Modern*, Nueva York: Wiley, 1996, 105-108.
- [35] Brian Richardson, “Luas Continuing, Not Creating, History”, *Irish Engineers Journal* 58 (2004), 362. Para una tabla de las principales entrevistas del mundo véase Douglas J. Puffert, “Path Dependence in Spatial Networks: The Standardization of Railway Track Gauges”, [www.vwl.unimuenchen.de/lis\\_komlos/spatial1.pdf](http://www.vwl.unimuenchen.de/lis_komlos/spatial1.pdf) (16 de marzo de 2005).
- [36] Véase, p. ej., Frank Romano, “Technology, the Future, and the Horse’s Behind”, *Ties*, octubre de 2000, 1.
- [37] George M. C. Fisher, “A 21<sup>st</sup> Century Renaissance”, *The Bridge*, otoño/invierno de 2000, 11-13.
- [38] Véase [http://www.aleve.com/info\\_central/faq/faq.htm](http://www.aleve.com/info_central/faq/faq.htm).
- [39] Del M. Thornock *et al.*, “Package Exhibiting Improved Child Resistance Without Significantly Impeding Access by Adults”, Patente de EUA núm. 4 948 002.
- [40] Del M. Thornock y James R. Goldberg, “Bottle”, Patente de EUA núm. 330 677.
- [41] Thornock *et al.*, “Package Exhibiting Improved Child Resistance”.
- [42] Según un representante de relaciones del consumidor, sólo cierto tamaño de la presentación de los comprimidos, tabletas y cápsulas de Aleve viene con la tapa para artritis fácil de abrir. “Bayer Email” al autor, 20 de octubre de 2004.
- [43] Citas de una caja y una botella de 100 comprimidos de Aleve adquiridas en el verano de 2004.
- [44] Thornock *et al.*, “Package Exhibiting Improved Child Resistance”.
- [45] Véanse las preguntas frecuentes en el sitio <http://www.aleve.com>.
- [46] Cita de una caja adquirida en el verano de 2004.
- [47] Paquete adquirido en el otoño de 2004.
- [48] El ensamblaje de dos piezas era necesario para producir un espacio entre la superficie externa y la interna del frasco en el cual las pestañas que se deslizaban se podían bajar para abrir el frasco. Véase Thornock *et al.*, “Package Exhibiting Improved Child Resistance”.
- [49] William H. Shecut y Horace H. Day, “Improvement in Adhesive Plasters”, Patente de EUA núm. 3 965.
- [50] Johnson & Johnson, “Our Company: Early Years—Our History”, [http://www.jnj.com/ourcompany/history/history\\_section\\_1.htm](http://www.jnj.com/ourcompany/history/history_section_1.htm). Cf. Charles Panati, *Panati’s Extraordinary Origins of Everyday Things*, Nueva York: Harper & Row, 1987, 250-251.
- [51] “The Band-Aid Brand Story”, [http://www.bandaid.com/brand\\_story.shtml](http://www.bandaid.com/brand_story.shtml).
- [52] “The Band-Aid Brand Timeline”, [http://www.bandaid.com/brand\\_timeline.shtml](http://www.bandaid.com/brand_timeline.shtml).
- [53] Citado en Caplan, *By Design*, 38.
- [54] Gregory J. E. Rawlins, *Slaves of the Machine: The Quickening of Computer Technology*, Cambridge: MIT Press, 1997, 95.
- [55] Véase, p. ej., “Tobacco Heaven”, <http://www.shopcanada.com/cigars/p1.htm>.
- [56] Michael Brown, “Generation 2023: Talking with the Future”, en *Fueling the Future: How the Battle over Energy Is Changing Everything*, ed. Andrew Heintzman y Evan Solomon, Toronto: House of Anansi, 2003, 336.
- [57] Ronald Ahrens, “RIP Oldsmobile”, *Wall Street Journal*, 4 de mayo de 2004, página editorial
- [58] “New Coke”, [http://en.wikipedia.org/wiki/New\\_Coke](http://en.wikipedia.org/wiki/New_Coke). Cf. “Knew Coke”, <http://www.snopes.com/cokelore/newcoke.asp>.
- [59] <http://www.uncover.com/coke2.htm>.
- [60] Donald Keough, presidente y director ejecutivo de Coca-Cola citado en “New Coke”.
- [61] “New Coke”. Cf. “Knew Coke”.

### III. Objetos intangibles

*Wit's an unruly engine, wildly striking  
Sometimes a friend, sometimes the engineer.*

[El ingenio es una máquina indócil que en ocasiones puede golpear con violencia Bien al amigo, bien al ingeniero.]

George Herbert[1]

No sólo son los objetos tangibles abiertamente asociados con la ingeniería y la tecnología los que se inventan y se diseñan —y triunfan y fracasan—. También las conferencias y los libros tienen que ser diseñados, anticipando tanto como sea posible las expectativas del público. Los críticos no son sino analistas de fallas. El acercamiento al sucesor de un éxito no representa una hazaña fantástica. Muchos autores de primeras novelas aclamados por la crítica han escrito con posterioridad libros decepcionantes, o publicado un libro que es el primero ligeramente rediseñado y con una nueva presentación.

Los sistemas de cualquier tipo también son diseñados en una gran escala. Como he escrito otras veces, nuestro sistema de colocar los libros en estantes no es obvio: en las primeras bibliotecas encadenadas los estantes no eran planos y horizontales, los libros no se acomodaban de manera vertical y sus lomos no eran visibles. La costumbre moderna de acomodar los libros verticalmente al mismo nivel y usar estantes horizontales con los lomos de las obras hacia afuera tenía que inventarse. Sus componentes debían ser diseñados en etapas, al igual que la infraestructura tangible que sustenta su uso. Todo el sistema moderno de ordenar los libros no se adoptó hasta bien entrado el siglo XVII, e incluso entonces aún quedaban bibliotecas que no se ajustaban a la nueva usanza.[2]

Ahora, por supuesto, el modo en que acomodamos los libros se da por sentado, como si siempre se hubiera hecho de la misma manera. Ejemplos todavía más recientes de diseño de sistemas, como las maravillas electrónicas conocidas como computadoras personales y dispositivos relacionados, se tratan como si siempre hubieran estado cerca. Aun así, constantemente son objeto de rediseños. En 2004, Apple introdujo una versión actualizada de su iMac en la forma de “un sistema minimalista todo en uno que esconde los componentes internos de la computadora dentro de un panel de visualización plano de LCD”. En ese momento, el jefe de diseño de la compañía, Jonathan Ive, comentó que el objetivo de rediseñar la iMac había sido “que pareciera sumamente sencilla”, lo que resultó

en “una pantalla de visualización que se mantiene en una delgada base de metal y que puede funcionar con un solo cable”. Según Ive, la solución fue “tan esencial y tan inevitable que incluso pareciera que no fue diseñada”.<sup>[3]</sup>

Pero todo, incluidos naciones, gobiernos y constituciones, tiene que ser inventado y rediseñado. La pregunta musical “¿Quién inventó Brasil?” abre la marcha *História do Brasil*, de Lamartine Babo, en 1933. Según los cálculos: “Comúnmente se entendía que lo brasileño significaba esa colección de cualidades que definían a la nación, que distinguían a los brasileños de los ciudadanos de Argentina, Portugal y los Estados Unidos —por nombrar tres poblaciones *frente* a las que los brasileños sentían que era importante definirse—”.<sup>[4]</sup> El objetivo era por lo tanto evitar el fracaso de ser diferentes.

Uno de mis colegas que da clases en la escuela de derecho participó en la creación de una nueva constitución para Sudáfrica. Durante ese tiempo, me expresó su interés en el papel del fracaso en la ingeniería, evidentemente pensando que anticipar cómo una constitución podría fallar era una manera de mejorar las oportunidades de alcanzar el éxito del nuevo documento gubernamental. Posteriormente me informó que cuando surgen nuevos gobiernos, como sucedió en Sudáfrica en 1983 y en Irak en 2004, éstos tienen una necesidad de “diseño constitucional”, que algunas veces también es llamado “ingeniería constitucional”.<sup>[5]</sup>

Las naciones y los gobiernos también necesitan crear banderas y otros iconos. Cuando le pidieron al artista gráfico Tariq Atrissi un logotipo para Qatar, “con objeto de comunicar a los inversionistas y turistas el ornado pasado y las aspiraciones modernas del país”, él presentó un símbolo que “combina azul por la hospitalidad, oro por la arena, el sol y el lujo, y borgoña, por el color nacional de Qatar”.<sup>[6]</sup> No todas estas tareas son tan poco polémicas, y los diseñadores de banderas en especial tienen que negociar en un campo minado de formas en las que pueden fallar.

Incluso antes de que Irak tuviera un gobierno permanente, se deseaba una nueva bandera, y las pautas del diseño eran fundamentalmente “presentar a Irak como un país occidental e incluir referencias al pasado”. Según una descripción contemporánea: “La nueva bandera tiene una media luna islámica azul en un campo blanco y tres franjas. Dos franjas son azules, que simboliza los ríos Tigris y Éufrates y las ramas suní y chií del Islam, y la tercera es amarilla, que representa a la minoría kurda”. Aunque el esquema general de color se apartaba considerablemente del usado por muchos otros países islámicos al no contener el tradicional “verde (el favorito del profeta Mahoma), rojo como un símbolo del nacionalismo árabe, y blanco y negro, como referencia a los principios de batalla de las dinastías islámicas medievales”, el azul utilizado en el diseño fue lo que recibió una crítica especial. A pesar del simbolismo que buscaba el diseñador, los críticos creyeron que el tono de azul se parecía al

que usaba Israel, y fue oscurecido. El diseñador apolítico de la bandera, Rifat Chaderchi, confesó que había abordado el asunto como si fuera un problema gráfico y que él “no pensó en Israel”. De este modo, cometió el error fundamental de no anticipar cómo el diseño podía fracasar políticamente desde el punto de vista del usuario.[7]

Tal vez Chaderchi no habría cometido ese error si hubiera considerado cómo habían fracasado otros diseños de banderas o si hubiera evitado el fracaso de manera explícita. Por ejemplo, para simbolizar una era posgenocida, la nueva bandera de Ruanda evitó los colores anteriores, “rojo y negro, recordatorios de sangre y luto”, usando en su lugar azul cielo, amarillo y verde.[8] El simbolismo y la imaginería son componentes reales de cualquier diseño, no sólo del de constituciones, logotipos y banderas de países nuevos y viejos.

Los rascacielos son estructuras sumamente simbólicas, y el fracaso de ser sensibles a las influencias culturales ha amenazado a monumentos que de otra forma serían exitosos. Cesar Pelli, el arquitecto de las Torres Petronas, recibió instrucciones de producir una imagen malasia para las estructuras monumentales que se construirían en Kuala Lumpur. Sin embargo, ya que no había modelos estructurales indígenas que seguir, miró hacia el arte islámico buscando inspiración y se presentó con un plan para el piso basado en un patrón de una estrella de 12 puntas. Cuando se le informó que esto era más simbolismo árabe que malasio, modificó el patrón a uno con ocho puntas conectadas con arcos intermedios. Si Pelli no hubiera ya ganado una competencia preliminar de diseño internacional, tal vez no habría recibido la comisión por su falta de atención al punto más pequeño. Después admitió que “el espacio entre” las torres era su “mayor interés en este proyecto”. Según Pelli, ese espacio estaba definido por la forma en que se reflejaban las torres y el Skybridge, que por un lado une las torres y por otro las convierte en un “portal de bienvenida” que “simboliza el umbral entre lo tangible y los mundos espirituales”. [9]

Muchas tradiciones, prácticas, hábitos e incluso estados mentales que pueden parecer naturales y sin un origen o diseño consciente, en realidad fueron introducidos por individuos ingeniosos, y fomentados a través de los años por muchos otros. Incluso en los deportes, donde las rígidas reglas parecieran incidir negativamente en la innovación, el fracaso de un jugador para anotar o del partido para capturar la imaginación de los espectadores han impulsado la invención.

El juego de básquetbol fue inventado por James Naismith, un educador físico que enfrentó un problema clásico de diseño. En 1891, mientras trabajaba en el YMCA College en Springfield, Massachusetts, deseó crear un juego que pudiera practicarse en interiores como una alternativa a la calistenia y la marcha durante los inviernos de Nueva Inglaterra. Quería idear un juego de habilidad más que de fuerza bruta. Entre otras limitaciones de su problema estaba que el campo de juego, ubicado en un espacio interior, tenía que ser

relativamente pequeño. Eligió usar un balón de fútbol fácil de conseguir y un par de canastas de duraznos para crear una actividad que fuera una variación del juego de la infancia del “pato en la piedra”, el cual había jugado afuera de una escuela de un solo salón al noreste de Ontario, donde nació. En vez de intentar golpear una piedra (“el pato”) con una piedra más grande y arrojándole otra, los practicantes del nuevo juego de Naismith tenían que meter el balón en la canasta. Él introdujo el juego con 13 reglas,[10] que naturalmente se refinaron con el tiempo. Como en cualquier deporte, lo que no estuviera explícitamente contra las reglas se consideraba juego limpio.

Entre las cuestiones que las reglas no limitaban estaba el tiempo que un equipo podía mantener el balón. El entrenador de básquetbol de la Universidad de Carolina del Norte Dean Smith explotó este “aro” y se volvió famoso por su ofensiva de “cuatro esquinas”, en que los jugadores se mantenían lejos de la canasta y se pasaban entre sí el balón para mantener también al equipo defensor lejos de la canasta. En un partido de 1979, los Tar Heels hicieron esta ofensiva todo el primer tiempo, al final del cual los Duke Blue Devils ganaron 7-0.[11] Tres años después, en 1982, vi a la ofensiva de Maryland correr con la misma determinación pero con más éxito al jugar contra Duke. El marcador se mantuvo reñido durante un primer tiempo más bien convencional, pero en el partido que se jugó en el Cameron Indoor Stadium de Duke, Maryland siguió siendo el equipo que tenía menos posibilidades. En el segundo tiempo, para eliminar la ventaja del equipo local, el entrenador de Maryland, Lefty Driessel, ordenó a su equipo en una ofensiva extrema de cuatro esquinas. Los Duke Blue Devils no fueron eliminados por las Tortugas de Maryland sino que simplemente mantuvieron su posición alrededor de la canasta y, por lo tanto, Maryland mantuvo el balón gran parte del resto del partido, pasándolo de un lado a otro de manera rítmica (y aburrida) hasta que quisieron anotar. Maryland le ganó 40-36 a un aparentemente desorientado y virtualmente hipnotizado equipo de Duke.[12]

Las Tortugas de Lefty Driessel pudieron jugar esa ofensiva hipnotizante en el partido porque en ese entonces no existía una regla que lo impidiera o no se notaba el aburrimiento que producía en la mayoría de los espectadores. De hecho, fue ese tipo de partido con pocas anotaciones y poca acción lo que contribuyó a la introducción del reloj de tiro en el básquetbol universitario, un innovador cambio de reglas que hacía más rápido el partido y mantenía un marcador más alto y por lo tanto más emocionante. Mientras las reglas anteriores no prohibían a ningún equipo jugar como Carolina del Norte o Maryland, el deseo de encestar, tan inculcado en los jugadores y no intentar cristalizarlo por casi 20 minutos, evidentemente no se le ocurría a la mayoría de los entrenadores.

Hacer que los sucesos deportivos sean más interesantes y emocionantes para los espectadores no es algo nuevo, pero introducir una jugada o movimiento novedoso implica

un acto especial de invención y diseño. En la actualidad, el tiro en suspensión es parte del repertorio de prácticamente cualquier jugador de básquetbol, pero antes de las décadas de 1930 y 1940 era desconocido. A veces se da el crédito del invento al “padre” del tiro con una mano,[13] Hank Lusetti, quien jugó para Notre Dame,[14] y otras a Kenny Sailors, de Wyoming,[15] quien descubrió que podía encestar por encima de jugadores más altos si saltaba mientras tiraba. La clavada, que tanto emociona a las multitudes hoy en día, no era parte del juego hasta 1946, cuando Bob Kurland, de 2.14 m de alto y quien jugó como centro para Oklahoma, no sólo pensó intentarla sino que logró hacer una. La Asociación Nacional de Básquetbol profesional acogió bien las clavadas para animar los partidos, pero la Asociación Nacional Atlética Colegial las prohibió hasta la temporada de 1976. Kurland también bloqueó tiros, pero este invento físico llevó a la mejora de las reglas que prohibían el “goaltending”,[16] algo que Naismith anticipó en sus reglas originales.[17] Las innovaciones a los tiros o a las reglas del básquetbol que haya en el futuro tal vez no sean obvias, pero es una apuesta segura que el juego, como todos los juegos, va a evolucionar.

A pesar de lo que algunos fanáticos puedan pensar, los deportes no son asuntos de vida o muerte. Pero la vida y la muerte sí lo son, por supuesto, y la práctica de la medicina gira casi por completo en torno al adecuado entendimiento del fracaso y al diseño de esquemas proactivos o reactivos para evitarlo o revertirlo. El deseo de combatir la enfermedad y detener o revertir el envejecimiento no es nada nuevo.

Robert Hooke, a quien comúnmente se le recuerda por haber perdido la polémica con Isaac Newton por el crédito de las teorías sobre la naturaleza de la luz y la ley de gravedad, participaba en tantas áreas de la ciencia y la ingeniería del siglo XVII (incluida la relacionada con el cuerpo humano) que se han referido a él como el Leonardo de Inglaterra. Entre sus descubrimientos más famosos se encuentra el que se conoce como la ley de elasticidad de Hooke, la cual afirma que la fuerza ejercida por un material elástico es proporcional a su extensión, un concepto fundamental en ingeniería estructural. En su tiempo, Hooke estaba, sobre todo, estrechamente asociado con la Royal Society, que se fundó “para promover el aprendizaje físico-matemático experimental”. [18] En 1662 fue designado conservador de todos los experimentos importantes para la nueva sociedad, cuyo lema era: “No creas en las palabras de nadie”. [19]

Hooke era evidentemente un hipocondriaco obsesionado con lo que entraba y salía de su cuerpo. Y era un experimentalista tan visceral, que él mismo se convirtió en una extensión del almacén de equipo del que era conservador. También era insomne, y buscaba correlaciones entre lo que ingería antes de dormir y cómo dormía. Cuando dormía “muy bien y a gusto” decía que soñaba “que montaba a caballo y comía helado”. Se usaba a sí mismo como un recipiente experimental y tomaba una gran cantidad de medicamentos y

purgantes. Evidentemente creía que lo que se ha llamado su “experimentación farmacéutica” mejoraba y agudizaba su habilidad mental.[20]

Robert Hooke no fue el único miembro de la Royal Society que vio su cuerpo como la curiosidad y misterio supremos de la naturaleza. Con seguridad, muchos hombres pusieron sus cuerpos a disposición de la experimentación después de la muerte —el “Gran Experimento”—. En un caso, los resultados de una autopsia a un miembro que murió de lo que se pensaba había sido un severo cálculo renal, fueron reportados a un grupo de miembros en la cena. Según la entrada del diario de Hooke sobre el caso, se “creía que sus narcóticos y algunas otras medicinas lo mataron, sin haber ninguna causa visible de su muerte”. [21]

El rango visible de observaciones, por supuesto, se había extendido en el siglo XVII por el microscopio y el telescopio, con los cuales Hooke estaba muy familiarizado. En efecto, tal vez su obra publicada más importante y perdurable sea *Micrographia*, un tratado clásico sobre cómo hacer y usar el dispositivo de aumento. Entre las ilustraciones del libro hay una que muestra una fina “arenilla” en la orina y la famosa ilustración de una mosca, grabada en una placa de 45.7 × 30.5 cm. Los integrantes de la Royal Society y los filósofos naturales con mentalidad similar también estaban interesados en mucho más que estudiar insectos bajo el microscopio.

Las disecciones humanas, prohibidas en la Edad Media, se habían convertido en espectáculos públicos en el siglo XVII. Sin embargo, hasta el siglo XIX los médicos no se habían dado cuenta de que los órganos afectados que tocaban durante las autopsias podían ser la fuente de microorganismos nocivos que transferían a sus pacientes sanos —en especial a las mujeres en trabajo de parto— que visitaban inmediatamente después.[22] Hacia el siglo XX, la disección se hacía con más cuidado y menos exposición, quedando restringida principalmente a la sala de autopsia y al laboratorio científico. En la actualidad, cuando “la atención de la medicina se ha transferido de los órganos enteros a las células y moléculas”, y cuando “escanogramas computarizados y las recreaciones tridimensionales del cuerpo humano ofrecen herramientas de enseñanza más nítidas y llenas de color que las disecciones del pasado que tomaban demasiado tiempo”, el estudio de la anatomía y la tradicional disección de cadáveres han quedado en el pasado. No todos en la profesión médica aprueban este adelanto, ya que creen que la práctica de la disección enseña a tener respeto por el cuerpo humano y el papel del médico al tratarlo,[23] sin mencionar que da a los futuros cirujanos una oportunidad de adquirir sensibilidad al manipular tejidos y órganos de manera directa, en lugar de hacerlo mediante el ratón de una computadora.[24] La disección, esencialmente en el contexto de una autopsia, también es una conexión importante entre el éxito y el fracaso en la práctica de la medicina.

Aunque la muerte puede definirse como el fracaso final, no todos los fracasos son fatales. La insuficiencia cardiaca ocurre cuando el corazón no lleva a cabo enteramente su función; cuando la acción de bombeo insuficiente provoca que los pulmones se llenen de fluido, el diagnóstico es insuficiencia cardiaca congestiva, pero el pronóstico puede ser optimista. Todo diagnóstico médico es en realidad un análisis de fallas. Vamos al doctor cuando sentimos que algo anda mal, y le decimos nuestros síntomas con la esperanza de que los reconozca y de que recetará una cura definitiva. La habilidad de los médicos para diagnosticar síntomas y prescribir una acción curativa es una metáfora acertada para el papel del fracaso en el diseño exitoso. No hay conocimiento de la salud normal (o exitosa) que baste; los doctores deben conocer las características patológicas y las causas de la enfermedad (fracaso) para poder diseñar una cura exitosa. En efecto: “La anatomía patológica es un campo de investigación que se encuentra en la base de toda la medicina científica”.<sup>[25]</sup>

Pero no todo en la práctica de la medicina es ciencia. También implica muchas opiniones y ofrece una gran oportunidad para el error humano, incluido todo, desde administrar la dosis errónea hasta amputar el miembro equivocado. Los errores van de los inofensivos a los fatales. Cuántos errores existieron y cuántos deberían esperarse y tolerarse se volvió tema capital de un debate de la década de 1990, cuando un artículo sobre el error en la medicina apareció en el *Journal of the American Medical Association* y el Instituto de Medicina publicó su famoso reporte, *To Err Is Human*.<sup>[26]</sup> Estas francas evaluaciones de la situación provocaron una considerable introspección y llamados a la reforma, pero en general se reconoció que es poco realista suponer que todos los errores podrían eliminarse. Lo mejor que se puede esperar se expresó citando a Yogi Berra, que dijo: “No quiero cometer el error equivocado”.<sup>[27]</sup>

Por mucho tiempo los ingenieros han recurrido a la analogía médica al pelear por el estudio sistemático y riguroso de los fracasos técnicos. Según el ingeniero de puentes estadounidense de finales del siglo XIX George Thomson:

El tema de la patología mecánica es relativamente tan legítimo e importante para el ingeniero como la patología médica lo es para el médico. Mientras se espera que un médico esté familiarizado con la fisiología, sin la patología sería de poca ayuda para sus prójimos, y [está] dentro del campo del ingeniero tanto investigar casos, estudiar síntomas y encontrar remedios para las fallas mecánicas como “dirigir las fuentes de energía en la naturaleza para el uso y la conveniencia del hombre”.<sup>[28]</sup>

Por eso se dice que la investigación y la documentación de los fracasos de la ingeniería “contribuye a mejorar las prácticas del diseño, de la misma manera en que los médicos patólogos han contribuido a los avances de la ciencia médica”.<sup>[29]</sup> Sin embargo, a diferencia de los médicos, que tienden a no querer admitir su falibilidad,<sup>[30]</sup> los ingenieros están demasiado conscientes de ella y de las posibles consecuencias. Según una definición: “La

ingeniería estructural es el arte y la ciencia de moldear los *materiales* que no entendemos del todo, en *formas* que no podemos analizar con precisión, para resistir *fuerzas* que no podemos predecir con exactitud; todo de tal forma que la sociedad en general no tenga razón para sospechar la amplitud de nuestra ignorancia”.<sup>[31]</sup>

Por disparatada que sea la comparación, ir al doctor cuando estamos enfermos no es tan diferente a llevar nuestro automóvil al taller mecánico cuando está fallando. En ambos casos, el profesional nos escucha describir los síntomas y plantea hipótesis sobre la causa del problema. Antes de la introducción de las computadoras, los diagnósticos dependían en gran parte de un auténtico examen físico, en busca de las partes que funcionaran de modo anormal y tuvieran que arreglarse. En la actualidad, cada vez más, hay poca revisión manual, y muchos diagnósticos son hechos en gran medida por máquinas controladas por computadoras. Con frecuencia, los médicos no están autorizados para llevar a cabo procedimientos a menos que estén justificados por los números generados no por unas manos sino por máquinas. La situación no es diferente de la del taller automovilístico, donde el mecánico no está autorizado a reparar o remplazar una parte a menos que los “diagnósticos” lo digan.

Las mismas computadoras trabajan con el principio binario cero-uno, encendido-apagado. El funcionamiento absolutamente exitoso sólo se da en la ausencia total de fracaso. Un programa informático perfecto en todo sentido excepto en uno, puede tener un error de programación tan difícil de detectar entre las líneas de perfección como ver una garrapata entre las flores del campo. Ni los errores de *software* ni los de *hardware* causan necesariamente que una computadora falle. En efecto, una máquina puede funcionar perfectamente bien con un error de programación, siempre y cuando no sea relevante para la operación que se lleva a cabo. Por ejemplo, un sistema conceptualmente tan sencillo como una cerradura y su llave puede parecer invencible siempre y cuando se use como fue diseñado. Pero la introducción de un objeto extraño imprevisto, incluso uno con mucho menos tecnología, puede ocasionar un caos.

Una situación de este tipo se presentó con los candados para bicicleta que tienen una traba gruesa en forma de U que se mete en un cilindro de aspecto todavía más grueso, al que se sujeta una cadena gruesa y pesada. El peso del ensamblaje representa problemas especiales para los ciclistas sobre cómo transportarlo cuando no está asegurando las llantas a una cerca o a otro objeto fijo. Para hacer hincapié en la fuerza de su producto, una compañía que hacía este tipo de candados y cadenas se llama Criptonita, como la sustancia que podía derrotar a Superman. Aún así, de alguna manera los ladrones de bicicletas descubrieron que “aplantar el cilindro vacío de un bolígrafo en el ojo cilíndrico de la cerradura y girarlo en la dirección de las manecillas del reloj hace el truco”<sup>[32]</sup> de abrir el candado en segundos. De este modo

una pluma de plástico Bic que se podía comprar por centavos —si no es que simplemente se podría encontrar tirada en el piso— era suficiente para derrotar el propósito del dispositivo de seguridad de 80 dólares. Según un crítico, la compañía de candados “se tardó demasiado en reaccionar a la crisis, ocasionando que muchos clientes dejaran de usar totalmente esa marca”. Criptonita anunció tardíamente que “planeaba dar a sus clientes nuevos candados sin ningún costo”, pero esto sólo sucedió después de que se publicaron videos en sitios de internet que demostraban el fracaso de baja tecnología de ciertos modelos.[33]

Incluso la ausencia de vulnerabilidad del *hardware* no significa que el funcionamiento de un sistema no represente ningún riesgo. Se cree que las pruebas de tomografía por resonancia magnética (TRM) son casi totalmente seguras, pero bajo ciertas circunstancias pueden ser mortales. Debido al fuerte electroimán incorporado a la máquina de diez toneladas, se supone que ningún objeto metálico de cualquier tipo debe estar en la sala de revisión. Pasar por alto esta advertencia de procedimiento ha terminado en desafortunados accidentes. Un policía vio cómo se separó de su mano su revólver calibre 45 y se disparó una bala. A una mujer que sin darse cuenta se dejó una horquilla la máquina se la jaló por la nariz hacia la faringe, de donde tuvieron que sacarla quirúrgicamente. Otra mujer, que tenía un clip para aneurisma implantado en el cerebro, murió cuando se sometió a un procedimiento de TRM. Y un niño que estaba siendo examinado murió cuando un tanque de oxígeno, que por razones desconocidas había sido llevado a la sala, fue atraído al centro de la máquina, que le fracturó el cráneo.[34] Los hospitales pueden ser lugares riesgosos, donde las máquinas aparentemente mejor diseñadas llegan a sorprender a sus ingenieros.

La Therac, que se inventó en la década de 1970 por Atomic Energy of Canada, parecía ser el dispositivo médico perfecto, ya que podía concentrar un rayo de electrones de alta energía en un tumor en una parte profunda del cuerpo y destruirlo sin dañar el tejido adyacente sano. Debido a los altos niveles de radiación que generaba la máquina, se incorporó una variedad de medidas de seguridad en el modelo Therac-25 para prevenir sobredosis. Para evitar fracasos se confiaba ampliamente en el control por computadora de los nuevos modelos del dispositivo enormemente exitoso. No obstante, a mediados de la década de 1980, sobrevinieron varios casos de sobredosis de radiación fatal o severa con la Therac-25, y la razón del mal funcionamiento fue un misterio.[35]

El *software* parecía estar exento de errores. Regulaba la dosis de un tratamiento prescrito de acuerdo con la indicación de parámetros específicos por parte del operario. Entre los parámetros indicados en la Therac-25 estaban una “x” para seleccionar el modo de rayos X, que ponía en función toda la capacidad de la máquina de 25 megaelectrovoltios, o una “e” para seleccionar el haz de electrones de energía relativamente baja. Mediante los análisis de las fallas se descubrió que en una ocasión el operario se equivocó al oprimir una “x” en vez

de una “e”, pero el error fue advertido antes de que se activara el rayo. No obstante, en algunos casos, a pesar de que el error tipográfico evidentemente se había corregido con anterioridad a la activación, se emitía la dosis más alta, lo que ocasionaba quemaduras graves y, algunas veces, una muerte dolorosa.

Aparentemente, lo que había estado sucediendo era que los operarios estaban ya tan familiarizados con la Therac-25 que usaban el teclado de manera muy efectiva. En efecto, introducían la orden de activación del rayo con tanta rapidez después de cambiar de una “x” a una “e” en la pantalla de la computadora que el *software* todavía no había procesado el cambio, y entonces se emitía un rayo X en vez de un haz de electrones. Los pacientes que recibían esta sobredosis se quejaban de sentir quemaduras, pero los operarios se resistían a creerlo ya que la pantalla de la computadora mostraba que se había emitido el haz de baja energía. Quemaduras graves y muertes sobrevinieron antes que se comprendiera que operar el teclado con excesiva rapidez, así se midiera en décimas de segundo, no permitía que la máquina volviera a cero antes de emitir el rayo.[36]

Ningún objeto o sistema creado se hace deliberadamente inferior a sus predecesores. Pero seguir los modelos de éxito, especialmente sin un contexto histórico, al final y con gran frecuencia lleva al fracaso. Cuando un sistema complejo tiene éxito, éste oculta su proximidad al fracaso. Imaginemos que el *Titanic* no hubiera chocado contra el iceberg en su viaje inaugural. El ejemplo de ese barco “que no se podía hundir” habría animado a los constructores de barcos basados en los éxitos a imitar trasatlánticos cada vez más y más grandes. Con el tiempo, aunque al azar, el *Titanic* o uno de los navíos hechos a su semejanza probablemente habría encontrado un iceberg, con obvias consecuencias. Así, el fracaso del *Titanic* contribuyó mucho más al diseño de trasatlánticos seguros de lo que habría hecho su éxito. Ésa es la paradoja de la ingeniería y el diseño.

---

[1] *The Temple. The Church Porch*, estrofa 41. Cita de Bartlett, 13ª ed.

[2] Véase Henry Petroski, *The Book on the Bookshelf*, Nueva York: Knopf, 1999.

[3] John Markoff, “New iMac Makes Debut a Bit Later than Apple Hoped”, *New York Times*, 1 de septiembre de 2004, C9.

[4] Véase [http://www.brazzil.com/2004/html/articles/jun04/p111\\_jun04](http://www.brazzil.com/2004/html/articles/jun04/p111_jun04).

[5] Donald L. Horowitz, comunicación privada, 18 y 22 de marzo de 2004.

[6] Ernest Beck y Julie Lasky, “In Iraq, Flag Design, Too, Comes under Fire”, *New York Times*, 29 de abril de 2004, F9.

[7] Ernest Beck y Julie Lasky, *ibid.*

[8] *Ibid.*

[9] Nadine Post, “Architect’s Passion Is Space between Towers, Not Their Height”, *Engineering News-Record*, 15 de enero de

1996, 39.

- [10] Véase, p. ej., “Dr. James Naismith, Inventor of Basketball”, <http://www.ukans.edu/heritage/graphics/people/naismith.html>.
- [11] Véase *Sports Illustrated*, 11 de abril de 2001, 26, <http://www.duke.edu/-wmp/stuff/duke.html>.
- [12] Véase [http://www.fansonly.com/auto\\_pdf/p\\_hotos/s\\_chools/duke/sports/m-baskbl/auto\\_pdf/dukerecyearbyyear](http://www.fansonly.com/auto_pdf/p_hotos/s_chools/duke/sports/m-baskbl/auto_pdf/dukerecyearbyyear).
- [13] Véase [http://www.bbhighway.com/Talk/Coach %20Library/Reviews/Books/Bjarkman\\_review.asp](http://www.bbhighway.com/Talk/Coach%20Library/Reviews/Books/Bjarkman_review.asp).
- [14] Fred Barnes, “One Game at a Time”, *Wall Street Journal*, 9 de junio de 2004, D4. Véase también el libro que Barnes estaba revisando: Michael Mandelbaum, *The Meaning of Sports: Why Americans Watch Baseball, Football, and Basketball and What They See When They Do*, Nueva York: PublicAffairs, 2004.
- [15] Véase <http://wyomingathletics.collegesports.com/genrel/wyo-hof.html>.
- [16] “History of Basketball”, <http://www.planetpapers.com/Assets/3753.php>.
- [17] “Dr. James Naismith”.
- [18] Lisa Jardine, *The Curious Life of Robert Hooke: The Man Who Measured London*, Nueva York: HarperCollins, 2004, 91. Partes de este ensayo sobre Hooke se tomaron de la reseña del autor de Jardine: “Urban Legend: A Study of the Life and Times of England’s Leonardo”, *Washington Post Book World*, 21 de marzo de 2004, BW04-05.
- [19] Jardine, *Curious Life...*, 97.
- [20] Citado en *ibid.*, 231, 232.
- [21] Citado en *ibid.*, 227.
- [22] Véase Sherwin B. Nuland, *The Doctors’ Plague: Germs, Childbed Fever, and the Strange Story of Ignác Semmelweis*, Nueva York: Norton, 2003.
- [23] Abigail Zuger, “Anatomy Lessons, a Vanishing Rite for Young Doctors”, *New York Times*, 23 de marzo de 2004, F1, F6.
- [24] Timothy Rowe, “Anatomy the Old-Fashioned Way”, carta al editor, *New York Times*, 30 de mayo de 2004, F4.
- [25] Nuland, *Doctors’ Plague*, 63.
- [26] Lucian L. Leape, “Error in Medicine”, *Journal of the American Medical Association* 232 (21 de diciembre de 1994), 1851; Institute of Medicine, Committee on Health Care in America, *To Err Is Human: Building a Safer Health System*, Washington, D.C.: National Academies Press, 1999. Disponible en <http://www.iom.edu/report.asp?id=5575>.
- [27] Citado en William Jacott, “Medical Errors and Patient Safety: Despite Widespread Attention to the Issue, Mistakes Continue to Occur”, *Postgraduate Medicine* (Minneapolis) 114, núm. 3, septiembre de 2003, 15.
- [28] George H. Thomson, “American Bridge Failures: Mechanical Pathology, Considered in Its Relation to Bridge Design”, *Engineering*, 14 de septiembre de 1888, 252-253; también 21 de septiembre, 294.
- [29] Carper, “Construction Pathology”, 57.
- [30] Leape, “Error in Medicine”, 1851.
- [31] James Amrhein, citado en Carper, “Construction Pathology”, 57.
- [32] Lydia Polgreen, “The Pen Is Mightier than the Lock”, *New York Times*, 17 de septiembre de 2004, B1, B6.
- [33] Lydia Polgreen, “Bicycle Lock Manufacturer to Provide Free Locks to Owners of Easily Unlockable Model”, *New York Times*, 23 de septiembre de 2004, B3.
- [34] David W. Chen, “Boy, 6, Dies of Skull Injury during MRI”, *New York Times*, 31 de julio de 2001, B1.
- [35] Véase Nancy G. Leveson y Clark S. Turner, “An Investigation of the Therac-25 Accidents”, *Computer*, julio de 1993, 18-41. Véase también Steven Casey, *Set Phasers on Stun: And Other True Tales of Design, Technology, and Human Error*, Santa Bárbara, California: Aegean Publishing, 1993.
- [36] Para una descripción más detallada del caso del Therac-25, véase Leveson y Turner, “Therac-25 Accidents”.



## IV. Objetos pequeños y grandes

*Let us not take it for granted that life exists more fully in what is commonly thought big than in what is commonly thought small.*

[No demos por sentado que la vida se manifiesta con mayor plenitud en aquello que solemos considerar grande que en aquello que generalmente consideramos pequeño.]

Virginia Woolf[1]

La distinción entre objetos pequeños y grandes se había establecido más o menos con facilidad en el siglo XIX. Los objetos pequeños eran generalmente los que cabían en la mano y se agarraban con facilidad, tanto física como intelectualmente. Por lo común se trataba de objetos sencillos que —dados los materiales necesarios, la habilidad, el tiempo y las herramientas más sencillas— se elaboraban uno a uno por un solo individuo. Durante el siglo pasado, cada vez más, merced a la división del trabajo, se empezaron a producir en cantidad apreciable. Se trataba de objetos como alfileres, agujas, botones, plumas, es decir, objetos pequeños olvidados con facilidad en la historia de la tecnología.[2]

Los objetos de tamaño mediano no se olvidaron tan fácilmente, pero tampoco eran muy diferentes —excepto en escala— de los grandes. Se trataba de cosas como la linterna mágica, que era una maravilla, como lo eran los modelos funcionales de las máquinas de vapor y otros dispositivos mecánicos que los niños precoces y curiosos encontraban fascinantes. Muchos ingenieros en ciernes comenzaron a crear sus propios modelos, y durante el proceso aprendían diseño. La fabricación de relojes y de instrumentos científicos de todo tipo representaba también un medio para aprender cómo funcionaban los objetos, cómo estaban hechos, cómo fallaban y cómo se podían mejorar.[3]

Los objetos grandes generalmente eran demasiado voluminosos y pesados para que un solo individuo los hiciera, menos que los levantara, a no ser con el auxilio mecánico de ayudantes y dispositivos. Estos objetos grandes eran las máquinas de vapor, los barcos de vapor, los ferrocarriles, los puentes de hierro y otros artilugios comúnmente utilizados como símbolos de la revolución industrial. En términos generales, sin embargo, se trataba de versiones a gran escala de objetos más pequeños y de ensamblajes de éstos. Aunque el todo era mucho más grande que la suma de sus partes, y los principios operativos no necesariamente resultaban comprensibles por completo a los no iniciados, provenían de la

misma fuente creativa que los objetos más pequeños.

Aunque los objetos pequeños y grandes eran tan diferentes como podían serlo en escala, su concepción y diseño mantenían similitud. Así, quienes dominaban la fabricación de objetos pequeños habían dado un paso adelante en la fabricación de los grandes, hecho especialmente importante en tiempos en que la educación formal era poco común y casi inexistente para inventores e ingenieros. La historiadora Carolyn Cooper encuentra esta idea personificada en “el mito del joven tallador yanqui, que dice que los inventos estadounidenses del siglo surgieron de la práctica de los jóvenes con una navaja”. Cree que la esencia del mito está captada en un “oscuro poema publicado en 1857” por el reverendo John Pierpont,<sup>[4]</sup> que en parte dice:

His pocket-knife to the young whittler brings  
A growing knowledge of material things.  
[...]  
Thus, by his genius and his jack-knife driven,  
Ere long he'll solve you any problem given;  
Make any grimcrack, musical or mute,  
A plow, a coach, an organ or a flute;  
Make you a locomotive or a clock;  
Cut a canal or build a floating dock;  
Make anything, in short, for sea or shore,  
From a child's rattle to a seventy-four;<sup>[5]</sup>  
Make it, said I? Ay, when he undertakes it,  
He'll make the thing and the machine that makes it.<sup>[6]\*</sup>

El reconocimiento del fracaso y sus lecciones fue la habilidad básica que podía darle a un joven tallador yanqui —o a cualquier otra persona joven curiosa y diligente— los medios para ir de la elaboración de baratijas de moda hechas con ramas a la construcción de canales que atravesaran los Estados Unidos. Al crear objetos grandes y pequeños, la percepción y la realidad del fracaso es siempre lo que impulsa su invención, diseño, fabricación y evolución. Para los objetos más pequeños, el proceso ya se había extendido siglos, habiendo llevado muchos objetos familiares a altos niveles de “perfección”. Para los objetos más grandes, las limitaciones (defectos) de los dispositivos que se operan a mano, como las máquinas ilustradas en la monografía de minería del siglo XVI de Agricola,<sup>[7]</sup> habían llevado al invento de la máquina de vapor para sacar agua de las minas sin la necesidad de la fuerza humana o equina. Lo que motivó la mejora de Watt a la máquina de Newcomen, cuyo cilindro tenía que apagarse con agua una vez que cada ciclo condensaba el vapor, fue el fracaso de éste para usar de manera económica el combustible y su calor. Watt mejoró el rendimiento al emplear un condensador por separado.<sup>[8]</sup> Pero aunque representó una mejora, el motor de

Watt no lograba conseguir el mayor potencial de su combustible, y entonces se inventó y desarrolló la ciencia de la ingeniería termodinámica para comprender mejor y aconsejar cómo se podría incrementar el rendimiento más adelante. Hasta hoy, los ingenieros buscan maneras de mejorar el rendimiento de los motores que diseñan.

El siglo XIX vio dos adelantos diferentes pero relacionados entre sí que profundizaron la distinción entre objetos muy pequeños y objetos muy grandes. En primer lugar, la fabricación manual, incluso con la ventaja de la división del trabajo, no lograba entregar de una manera confiable, eficiente y económica una producción mayor de lo que hoy llamamos bienes de consumo. La introducción de máquinas que llevaran a cabo tareas repetitivas automáticamente demostró ser de gran ayuda para los fabricantes. No sólo aumentó la producción y disminuyeron los costos, sino que el producto hecho a máquina tenía a menudo una apariencia más uniforme y su funcionamiento era más predecible. Con la réplica más confiable de un producto, se aceleró el proceso de la evolución del diseño. Ya no se podía culpar del mal funcionamiento de un artículo al ejemplar mal hecho a mano. Como cada uno era igual al resto, un fracaso acusaba no sólo al artículo en particular sino a su diseño. La literatura de patentes del siglo XIX está llena de *mejoras* a los dispositivos de todo tipo y a las máquinas para hacerlos.

Si los productos hechos a máquina eran mucho más predecibles en forma y función que sus precursores elaborados a mano, entonces su combinación para formar objetos más grandes también resultaría en un producto más predecible. El establecimiento del denominado sistema estadounidense de fabricantes, en el cual partes intercambiables reducían enormemente el tiempo y el esfuerzo necesarios para ensamblar o reparar cualquier cosa, desde rifles hasta linternas mágicas o máquinas de coser, y en especial el papel de Eli Whitney en ello, sigue siendo tema de debate entre los historiadores de la tecnología.<sup>[9]</sup> Pero no puede haber duda sobre su contribución al avance de la revolución industrial.

Objetos más grandes como las locomotoras y los puentes todavía se tenían que basar en gran medida en el trabajo manual para forjar sus partes y ensamblarlas, pero cada vez se crearon más máquinas por lo menos para ayudar a hacer todo, desde aserrar y perforar hasta dar forma y remachar. La fabricación y conexión de los tubos de hierro forjado del puente Britannia, que se terminó en 1850, necesitó cerca de 1.8 millones de remaches clavados a mano.<sup>[10]</sup> La construcción del puente de Forth, completamente de acero, terminado 40 años después, se benefició del uso de una máquina para clavar muchos de sus 6.5 millones de remaches.<sup>[11]</sup> La longitud total de la última estructura era casi cuatro veces mayor que la de la primera, y sus respectivos costos fueron de £2.5 millones *versus* £600 000.<sup>[12]</sup>

El segundo adelanto importante fue el ensamblaje y construcción cada vez mayor de sistemas complejos a partir de componentes. A pesar de que las locomotoras y los puentes

eran grandes y críticos, no eran sino minúsculas partes del sistema conocido como ferrocarril. E incluso cada uno de los ferrocarriles parecía pequeño ante las redes que se habían extendido en toda Gran Bretaña, los Estados Unidos y otros lugares en la última parte del siglo. Parecía no haber límite para la visión de los ingenieros y los hombres de negocios porque nunca hay límite alguno a sus percepciones de fracaso. Incluso si todos los continentes estuvieran entramados con redes ferrocarrileras, aún existiría la decepción de que los pasajeros no podrían cruzar los océanos en ferrocarril.

Isambard Kingdom Brunel había superado metafóricamente esa limitación. Cuando en una reunión de la junta directiva lo confrontaron con dudas sobre la magnitud de la propuesta de emprender la prolongación de la línea principal de su Great Western Railway hacia el oeste, imaginó continuar el viaje de los pasajeros a los Estados Unidos a bordo de un barco de vapor llamado *Great Western*.<sup>[13]</sup> Gustav Lindenthal, cuyo sueño era construir un puente monumental que cruzara el río Hudson en Nueva York, pensó en términos más tangibles. Una vez comentó que “era posible construir un puente sobre el Océano Atlántico, pero imposible financiar tal empresa”.<sup>[14]</sup> Se podría esperar que construir un puente sobre el Océano Pacífico haya intimidado incluso a los ingenieros, pero la proximidad entre Asia y Norteamérica por el Estrecho de Bering capturó la imaginación empresarial por lo menos desde 1890. Ese mismo año, con motivo de la inauguración del puente de Forth, que llevaba al North British Railway a través de la última barrera acuática a lo largo de la costa este de Escocia, un programa de recuerdo mostraba una locomotora llamada *Progress* jalando un vagón directo de pasajeros con la leyenda: “De Aberdeen a Nueva York, vía el puente Tay, el puente de Forth, el Túnel del Canal y Alaska”.<sup>[15]</sup> Dos años después, Joseph Strauss, quien construiría el puente Golden Gate, propuso en su tesis de graduación la construcción de un puente ferroviario internacional que cruzara el Estrecho de Bering.<sup>[16]</sup>

Los descubrimientos y avances en la electrónica que ocurrieron en la primera parte del siglo XIX inspiraron a Samuel Morse a utilizarlos al inventar el telégrafo.<sup>[17]</sup> El concepto de comunicación a distancia no era nuevo. En efecto, cada vez que hablamos con un vecino al otro lado de la cerca trasera, nos estamos comunicando a distancia, aunque a una muy corta. La voz humana se puede transferir a distancias mucho más grandes, como los oradores y cantantes tiroleses lo han sabido desde hace tiempo, e incluso sin amplificar es posible alcanzar a un público numeroso. Pero hay límites claros en cuanto a qué tan lejos y qué tanto contenido se puede transmitir de manera fiable. Los medios visuales superaron estos defectos de la voz humana, y a finales del siglo XVIII los franceses usaban dispositivos parecidos al semáforo para comunicarse a través de distancias considerables, usando las estaciones repetidoras para transmitir el mensaje.<sup>[18]</sup> Sin embargo, este sistema fallaba cuando se reducía la visibilidad, una limitación que no tendría la idea de Morse de enviar

señales eléctricas a través de cables. A finales del siglo XIX, no sólo se tendían los cables del telégrafo en los Estados Unidos y otros países, sino cables transoceánicos conectaban continentes.

El telégrafo tenía sus limitaciones, entre ellas el fracaso de los individuos no versados en el código Morse para comunicarse directamente entre sí. El invento de Alexander Graham Bell enfrentó ese reto haciendo que se transmitieran voces no codificadas a través de distancias ilimitadas, siempre y cuando estuvieran conectadas por cables telefónicos. Sin embargo, el teléfono también tenía sus fallas, siendo la principal una que compartía con el telégrafo: la necesidad de cables. Por lo tanto, el invento de la comunicación inalámbrica se convirtió en el siguiente gran objetivo, y se volvió factible, gracias, entre otros, a Guglielmo Marconi. Ya que la “comunicación inalámbrica”, como el nombre lo sugiere, se diseñó para remplazar al telégrafo, al principio se percibió como un fracaso ya que no sólo llevaba las señales de un punto a otro sino que las transmitía de forma que cualquiera que tuviera el equipo receptor adecuado podía escuchar lo que se suponía eran comunicaciones privadas. Tuvo que pasar algún tiempo antes de que este defecto se viera como una ventaja, pero en circunstancias diferentes. Los barcos en el mar podían transmitir llamados de ayuda, como el *Titanic* lo intentó. (Desafortunadamente, los posibles receptores más cercanos de sus llamados de socorro habían apagado sus aparatos en la noche, ya que todavía no reconocían todo el potencial de la nueva tecnología.) No fue hasta después de la primera Guerra Mundial cuando la ventaja de los programas de transmisiones en lo que se llamó *radio* se comprendió y explotó por completo.

Tanto en los objetos pequeños como en los grandes, tanto en los componentes como en los sistemas, el fracaso es un asunto de percepción. El telégrafo era generalmente aclamado como una maravilla, si no es que como un milagro. Después de todo, “¿qué dispuso Dios?” El dispositivo mágico que enviaba señales a la velocidad de la luz hizo posible lo que la gente común ni siquiera soñaba. Pero los inventores no son personas ordinarias. Si la comunicación a distancia estaba limitada a qué tan lejos podemos ver y qué tan inteligentes somos para transmitir mensajes, pensaba la persona común, entonces así tenía que ser. Quizá era parte del diseño de Dios. Pero los inventores también ven en cada diseño tanto un fracaso como un éxito, aunque uno que necesariamente tiene limitaciones —que ellos creen superables—. [19] Admiran lo que logra un diseño, pero lo ven como una vieja solución —y la base para un nuevo problema—. A un número sorprendente de patentes lo siguen patentes de mejoras posteriores hechas por los mismos inventores.[20] Para los inventores, el éxito siempre es fugaz y arrastran tras de sí el fracaso, como un pescador que arrastra un cebo en un lago silencioso. Los inventores siempre caen en su propia trampa.

Los inventores también nadan en el mar de la ciencia y la tecnología. Conocen sus

corrientes y su profundidad. Saben qué es posible hoy que no era posible ayer. Conectan los viejos problemas con nuevas soluciones, o por lo menos con nuevas soluciones posibles. Aunque algunos inventos pueden formarse en su totalidad en la mente del inventor, no se desarrollan por completo en la mano. El diseño conceptual puede surgir con facilidad, pero definir los detalles es generalmente trabajo arduo. Como dice Edison, la invención es 10% inspiración y 90% sudor, y el fracaso desempeña un papel central en ambos.

Cada invento nuevo se presenta como una mejora al artefacto anterior. Una solicitud de patente es una competencia contra el *statu quo*. El formulario de una patente, al igual que la literatura, cuenta el cuento. Aunque en apariencia las patentes de los objetos pequeños y las de los grandes son diferentes, como la patente de un lápiz es diferente de la de una computadora, existe cierta similitud entre ellas. Por lo común, en los párrafos iniciales de una solicitud de patente hay una declaración, normalmente explícita o por lo menos implícita, de qué es lo que está mal en el artefacto anterior, cómo no logró estar a la altura de lo que prometía en un principio, cómo encara los problemas la solución del inventor, cómo tiene éxito donde los anteriores fracasaron. Por ello, en su solicitud de patente de una percha para paraguas, William C. Carter comenzó diciendo: “En las perchas para paraguas de uso general, donde en circunstancias normales los paraguas se colocaban al azar, era probable que los sacaran o los robaran. El presente invento se refiere a una mejora con la cual se remedia este defecto”. La mejora de Carter en 1885 consistía en una rejilla en la cual cada paraguas se podía colocar de manera cuidadosa y cerrarla con llave.[21] Simeon S. Post, en una patente de 1863 por el invento de una escala diferente, declaró: “La naturaleza de mi invento consiste en construir un puente de hierro de tal manera que la expansión y contracción del material no ocasione efectos perjudiciales a la estructura, y de esta forma se evite una de las objeciones más serias al uso universal de estos puentes”. [22] En 1887 un artículo de *Scientific American*, que en ese entonces prácticamente era una gaceta que hacía públicas las patentes, contenía una columna que listaba los “nuevos inventos de todo tipo” que consistían en su totalidad en objetos “mejorados”, que iban desde una “almohaza mejorada” hasta “el conjunto de overol y jumper mejorados”. [23]

Aunque es similar el proceso creativo y cognitivo fundamental por el cual los objetos pequeños y los grandes se crean y se mejoran, también hay diferencias significativas en las consecuencias de su fracaso en funcionamiento. Por lo general los objetos pequeños han sido probados por años si no es que siglos de uso. El diseño de un nuevo objeto pequeño, que aún no ha pasado la prueba del tiempo, se puede someter a innumerables jalones, empujones, dobleces, giros y flexiones antes de que siquiera salga al mercado. De este modo, los prototipos de un diseño original de unos lentes que empleen un nuevo material para el armazón o un nuevo mecanismo para las piezas de la sien se pueden colocar en una máquina

de pruebas hecha con este propósito, que simula que los anteojos se ponen en la mañana y se quitan en la noche. La prueba se puede automatizar para proceder sin prestar atención, incluso los ciclos de uso se cuentan de manera automática, y la máquina está programada para detenerse en el momento en que los lentes se rompan —aun si es a mitad de la noche y no hay nadie en el laboratorio para presenciar el acontecimiento—. Un técnico que llegue a trabajar a la mañana siguiente puede leer y registrar el número de ciclos antes del fracaso y meter otro prototipo en la máquina de pruebas —reuniendo más datos para hacer que las pruebas sean estadísticamente significativas—. Estas pruebas proporcionan predictores de funcionamiento estadísticos pero no específicos.

No hace mucho, mi esposa iba a comprar unos lentes nuevos, y unos sin armazón llamaron su atención. Las piezas de la sien estaban unidas directamente a los lentes de plástico por dos pequeños tornillos. Cuando le preguntó al oculista qué tan bien funcionaría el diseño en alguien que con frecuencia se queda dormido leyendo en la cama, aquél respondió que eran lo suficientemente fuertes para resistir si alguien se dormía sobre ellos. Para demostrar su dureza, jaló las piezas de la sien en dirección contraria una de otra y las dobló con confianza —con lo cual se rompió el lente derecho en línea vertical desde los agujeros de los tornillos—. Antes había hecho incontables veces la misma demostración con los mismos lentes, dijo, y ésta era la primera vez que fallaban. No dijo si su prueba extrema se realizaba en el laboratorio de la fábrica.

Ningún número de éxitos históricos proporcionará la prevención absoluta contra el futuro fracaso. El fabricante y el usuario, sin mencionar a los intermediarios, pueden tener diferentes expectativas de lo que constituye un rendimiento aceptable. Aunque a los fabricantes les gustaría reducir a cero el número de fracasos razonables y benignos de un producto, es un objetivo tan poco realista como rehuir la responsabilidad de las demandas por defectos del producto. Una vez que los artículos hechos en serie se han ido a producción, el control de calidad se puede mantener probando con regularidad el rendimiento de la línea de producción, pero la creatividad de los usuarios está más allá de las pruebas. Por lo tanto, los clientes insatisfechos son para los fabricantes la fuente de retroalimentación más importante sobre los diseños. Así es, ellos ofrecen el tipo de información que de otra forma no se obtiene con facilidad, ya que los diseñadores y los fabricantes con frecuencia están demasiado cerca de un producto como para apreciar en su totalidad todas las formas en las que éste no satisface las expectativas de los clientes. Los diseñadores y los promotores, que trabajan con una serie de prototipos, contraen miopía mientras aprenden a manejar y manipular el dispositivo para evitar sus deficiencias. Definen sus límites y prueban el producto dentro de éstos. Los compradores, sin embargo, rara vez reconocen estos límites o leen las letras pequeñas en el manual del usuario. Ninguna prueba de laboratorio podrá

revelar una imperfección o punto débil en un producto de consumo que un experto imaginativo reconocerá de inmediato.[24]

En general, los objetos más grandes y más costosos son probados exhaustivamente por la compañía que los produce. La industria automotriz es famosa por sus pistas de pruebas, en las cuales los nuevos modelos que aún no se dan a conocer se ponen a prueba en secreto, tal vez para simular los meses en que se recorren 100 000 millas. Los pilotos de prueba de aviones son legendarios, así como sus maniobras, con que someten a los nuevos diseños a condiciones todavía más rigurosas de lo que se puede anticipar durante su funcionamiento.

Es especialmente importante probar los nuevos sistemas físicos complicados, que al momento de utilizarse pueden revelar algún comportamiento no previsto por el diseñador ni por ninguna simulación en computadora. De ese modo, el accidente de 1979 en la planta de energía nuclear Three Mile Island reveló operaciones inesperadas en que la lectura de los instrumentos que indicaban las posiciones de las válvulas dio lugar a malinterpretaciones.[25] Un sistema de manejo de equipaje incorregible y con mal funcionamiento retrasó la inauguración del nuevo Aeropuerto Internacional de Denver por más de un año.[26] Las simulaciones por computadora de estos sistemas complejos son en sí mismas artefactos diseñados, y por lo tanto están sujetas a las mismas limitaciones de previsibilidad y fiabilidad que cualquier otro diseño.

Incluso los vehículos espaciales, como los que llevaron los primeros hombres a la Luna, son sometidos a un régimen de pruebas. Con frecuencia éstas son demostraciones paso a paso de prueba de principio y prueba de concepto. Al iniciarse la década de 1960 la sola idea de enviar a un ser humano a la ingravidez del espacio, mucho menos que llegara a la Luna y regresara, era obviamente nueva. Las primeras demostraciones tuvieron lugar en las plataformas de carga de aviones que volaban en trayectorias parabólicas para alcanzar un momento de ingravidez. John Glenn, el primer estadounidense en orbitar sobre la Tierra, lo hizo sólo tres veces y estuvo menos de cinco horas en el espacio antes de volver a entrar a la atmósfera. Las misiones posteriores de otros astronautas implicaron cada vez un mayor número de órbitas y días en el espacio, demostrando que un componente crítico del sistema —el ser humano— era capaz de soportar las fuerzas físicas y psicológicas requeridas. Cada vuelo también ofrecía la oportunidad de comprobar la viabilidad de la operación de recuperación. Sin embargo, la última prueba no se pudo llevar a cabo de ninguna otra manera que intentando la misión.

Existe otro tipo de objeto grande que no puede probarse con facilidad hasta que está completamente construido. Se trata del proyecto de ingeniería civil —la presa, el túnel, el edificio, el puente— cuya escala es tan grande, cuyo costo es tan alto y cuyo diseño es tan específico en cuanto al lugar en que se emplazará que la estructura es única. Como es única,

no hecha en una fábrica sino construida en el lugar, no hay un ejemplar desechable que probar. Los modelos a escala se pueden usar para probar teorías o comparar diseños alternativos, pero ningún modelo podrá jamás reproducir por completo las condiciones de la verdadera estructura una vez construida. Incluso si fueran posibles los modelos incontrovertiblemente significativos, no es posible simular en su totalidad las fuerzas naturales de futuros terremotos, ráfagas de viento y situaciones similares a las que la estructura pudiera ser sometida. En resumen, la única manera de probar definitivamente una gran estructura de ingeniería civil es construirla, anticipando los desafíos de la naturaleza y dejando que ésta tome su curso. Este hecho de ingeniería en gran escala requiere un análisis de fallas cuidadoso y proactivo.

Eso no quiere decir que la construcción de cualquier estructura grande signifique correr un albur. Los ingenieros entienden lo suficiente sobre el comportamiento y las limitaciones de los materiales y los componentes de sus estructuras. El acero, el concreto, los tornillos, las soldaduras y los cables han sido probados exhaustivamente en una gran variedad de configuraciones y un amplio espectro de condiciones. Además, es la estructura poco común la que se construye 10 o 20% más grande que sus predecesoras (aunque hay algunas excepciones notables muy exitosas, entre ellas el puente George Washington y el Empire State), moviéndose de ese modo sólo un poco cada vez (y cautelosamente) en territorio desconocido. El balance final es la imposibilidad de realizar alguna prueba definitiva de la estructura terminada hasta que esté completa.

Existe una larga tradición de “probar la resistencia” de grandes estructuras ya terminadas, en especial los puentes. Al igual que a los diseños de los puentes, a estas pruebas las motivaron fracasos anteriores. A principios del siglo XIX había notables ejemplos de puentes colgantes derrumbándose bajo la estampida de ganados, la marcha de soldados y el peso de multitudes de espectadores que observaban espectáculos en el agua.<sup>[27]</sup> Posteriormente, las pruebas de resistencia de nuevos puentes y estructuras parecidas a ellos con frecuencia se hicieron simulando la marcha de soldados cruzando. Un ejemplo famoso y muy claro, como lo reportó el *Illustrated London News*, se llevó a cabo en presencia de la reina Victoria cuando se cuestionó la seguridad de las galerías del Palacio de Cristal.<sup>[28]</sup> Siglo y medio después, cuando el Puente del Milenio en Londres se reforzó con dispositivos de amortiguación para contrarrestar el movimiento de oscilación que obligó a cerrarlo sólo tres días después de su inauguración, empleados de la compañía de ingenieros Ove Arup recibieron órdenes de moverse sincrónicamente para probar la efectividad de la estructura modificada del puente.<sup>[29]</sup>

Las vibraciones que produce el tráfico mecánico también afectan a los puentes. Incluso el paso normal de camiones y automóviles puede hacer vibrar los componentes de un puente

flojo y llevarlo al límite, amenazando su seguridad. Pero el desafío inicial para los primeros diseñadores de puentes fue el peso de una máquina de vapor y su tren. A mediados del siglo XIX se volvió una práctica estándar hacer ensayos de resistencia en los puentes nuevos haciendo cruzar varias locomotoras sobre ellos para observar la deflexión de la estructura. Si la deflexión se encontraba dentro del rango esperado bajo el peso, el puente estaba “probado”. Estas prácticas han continuado, en especial en Europa, donde en 1994 el recién terminado puente de Normandía, en ese entonces el puente atirantado más largo del mundo, fue sometido a la carga de tráileres y tractores que ocupaban los carriles en más de un tercio de la longitud del arco principal. Estas pruebas de peso muerto se complementaban con otras concebidas para simular problemas provocados por las vibraciones. Un torno en un barco anclado en el Sena jalaba el centro del puente y luego lo soltaba de repente para confirmar que el puente vibraría como se esperaba.[30]

A finales del siglo XX, estos ensayos de resistencia física dejaron de hacerse en los Estados Unidos. Más que correr el riesgo de sobrecargar una estructura grande en un ensayo de resistencia, dice el argumento, se pondrían a prueba los modelos de la estructura por computadora. Como la mayoría de los argumentos en torno a los modelos por computadora, esto tiene sentido siempre y cuando la estructura representada en la computadora tenga una exacta semejanza a la estructura real. Estrictamente hablando, es muy poco probable que ocurra esto, ya que los artefactos de construcción —materiales con imperfecciones, tornillos sueltos, conexiones forzadas y demás— por lo general no se representan en el modelo por computadora. Así, una prueba de resistencia basada en la computadora no es en realidad tal. Aún así, se dice que los modelos por computadora, que cuesta menos probar, son sustitutos apropiados de las estructuras y sistemas reales.

Toda estructura grande descansa en cimientos únicos y tiene sus peculiaridades de construcción. Sin embargo, incluso un ensayo de resistencia física válido no proporciona una prevención absoluta contra el fracaso. Un ensayo de resistencia en realidad sólo demuestra que la estructura no falló bajo la carga de prueba al momento de ésta. Tampoco habrá sido probado el comportamiento de la estructura bajo otros tipos de cargas, como las impuestas por el tránsito a toda velocidad, un terremoto o vientos moderadamente fuertes —que debieron anticiparse para diseñar contra ellos la estructura—. La hipótesis de que el puente resistirá los eventos que los diseñadores previeron que posiblemente ocasionarían que fallara sólo se puede demostrar por completo ante el capricho de la naturaleza. Como cualquier otra hipótesis científica, nunca se puede demostrar de la misma forma que un teorema matemático; pero puede desmentirse (“falsificarse” en el lenguaje de Karl Popper)[31] con un solo contraejemplo. En la ingeniería tanto de las estructuras grandes como de las pequeñas, ese contraejemplo toma la forma de un fracaso inequívoco.

El fracaso, no el éxito, es entonces la verdadera piedra de toque del diseño. Habría sido virtualmente imposible la concepción de un ensayo de resistencia de las Torres Gemelas del World Trade Center de Nueva York que soportara la combinación de un ataque físico a su estructura y la conflagración que tuvo lugar a continuación el 11 de septiembre de 2001. Eso no significa que los ingenieros estructurales no consideraran la posibilidad de que un avión chocara contra los altos edificios. Después de todo, un bombardero B-25 se estrelló contra el Empire State en 1945. El análisis estructural de los efectos del impacto de un Boeing 707, el avión de pasajeros más grande que volaba en ese entonces, se llevó a cabo mientras se estaban diseñando las Torres Gemelas, y se concluyó que la estructura podía soportar tal ataque sin derrumbarse.[32] En 2001, por supuesto, los Boeing 767 se estrellaron deliberadamente en las torres, que al principio resistieron claramente el grave daño estructural que se les infligió. Esto confirmó su solidez mecánica, pero no sus condiciones para resistir lo que siguió.

Sin embargo, los efectos de los incendios posteriores, originados por el combustible del avión ardiendo y alimentados por el mobiliario y el papel de las oficinas, no se habían tomado en cuenta, ya sea en una simulación por computadora significativa y realista o en un ensayo de resistencia físicamente válido. Si se hubiera efectuado la primera posibilidad, las estructuras podían haber demostrado no ser capaces de resistir un infierno como éste. Cualquier prueba por computadora necesariamente se basa en suposiciones sobre las condiciones bajo las cuales se dará el ataque a la estructura. En cuanto a las Torres Gemelas, el diseñador profético de una simulación por computadora habría tenido que anticipar el alcance del daño estructural, la destrucción ocasionada por el choque del avión y la cantidad de combustible y materiales inflamables presentes —sin mencionar las condiciones del viento—. En retrospectiva, esto podría haberse realizado, pero en perspectiva eso habría implicado hacer a finales de la década de 1960 la combinación de suposiciones de lo que realmente ocurriría en 2001. El número de variantes y combinaciones de cómo puede ser atacada una estructura es simplemente demasiado grande para una computadora y sus operadores que tengan el propósito de probar con un modelo de cualquier complejidad. *A fortiori*, un ensayo de resistencia física de las condiciones que se dieron el 11 de septiembre habría sido impensable y en última instancia probablemente carente de sentido. Si el ensayo de resistencia de una torre terminada que abarcara el ataque de un 707 y un incendio hubiera revelado sus puntos débiles, éstos podrían haberse determinado. Incluso entonces, es probable que la estructura no se habría modificado lo suficiente para soportar el ataque de un 767 volando a una velocidad mucho más allá de lo que cualquiera hubiera considerado razonable para la altitud relativamente baja a la que fueron impactadas las torres. Si éstas hubieran pasado la prueba del 707, su diseño habría “probado” que era seguro, y nada

habría sido diferente.

Nuestro entorno urbano está poblado de estructuras que han sobrevivido ensayos de resistencia de todo tipo. Denominamos a estas estructuras diseños exitosos, y lo son. Sin embargo, los diseños exitosos no necesariamente dicen mucho sobre qué tan cerca están del fracaso. A veces aparecen grietas, lo cual indica problemas, pero pueden atribuirse al asentamiento e interpretarse como las arrugas de la edad. Cualquier fracaso, sin embargo, es evidencia incontrovertible de que existieron puntos débiles —en el diseño, la labor humana, los materiales, el mantenimiento o la defensa contra terroristas—. El fracaso es un contraejemplo de la hipótesis del éxito. De nuevo ésta es la paradoja del diseño: los objetos exitosos nos enseñan un poco más allá del hecho de que han tenido éxito; los objetos que fracasan ofrecen evidencia incontrovertible de que se han excedido los límites del diseño. Al emular el éxito se corre el riesgo de fracasar; estudiar el fracaso aumenta nuestras posibilidades de tener éxito. El simple principio, que casi nunca se plantea de manera explícita, es que los diseños con mayor éxito están basados en las mejores y más completas suposiciones de fracaso.

Los constructores parecen tener un impulso irresistible de hacer estructuras cada vez más y más grandes. Por mucho tiempo, los diseños más grandes se inspiraron en los diseños exitosos más pequeños. De este modo, las pirámides crecieron geoméricamente hacia lo alto, igual que los obeliscos y las catedrales góticas. Los barcos se hicieron más grandes, igual que los puentes. Desde el siglo XVII, Galileo observó que había límites para el crecimiento geométrico de las estructuras y enumeró ejemplos de esos límites marcados por fracasos. La misma geometría, concluyó, era base insuficiente para ampliar un diseño. Las estructuras naturales, como los esqueletos de los animales, no siguieron reglas geométricas, de otra manera se esperaría que todos los animales tuvieran las mismas proporciones. De alguna forma la naturaleza incorporó algo más a sus diseños. Galileo reconoció que la geometría se tenía que complementar con la fuerza de los materiales.<sup>[33]</sup> Y la clave que le permitió unir los efectos de la geometría y la fuerza, en lo que los ingenieros llamarían en la actualidad fórmulas de diseño, estuvo en las suposiciones de Galileo sobre el fracaso. Con su trabajo se estableció un nuevo fundamento para el diseño, uno que con precisión se puede denominar análisis de fallas proactivo.

---

[1] Citado en Ben Schott, *Schott's Original Miscellany*, Nueva York: Bloomsbury, 2002, 9.

[2] Cf. James Deetz, *In Small Things Forgotten: An Archaeology of Early American Life*, edición corregida y aumentada, Nueva

York: Anchor Books, 1996.

- [3] Véase, p. ej., James Nasmyth, *James Nasmyth, Engineer: An Autobiography*, ed. Samuel Smiles, Londres: John Murria, 1885.
- [4] Carolyn C. Cooper, “Myth, Rumor, and History: The Yankee Whittling Boy as Hero and Villain”, *Technology and Culture* 44 (2003), 85-86.
- [5] Según el *Webster’s New International Dictionary*, 1ª ed., un “setenta y cuatro” era un “viejo buque de guerra que podía cargar setenta y cuatro cañones”.
- [6] Citado en Cooper, “Myth, Rumor, and History”, 85, del Rev. J. Pierpont, “Whittling—A Yankee Portrait”, *United States Magazine* 4 (marzo de 1857), 217.
- \* Para el joven tallador su navaja ofrece / un saber sin fin de los objetos materiales. / [...] / Así, con su ingenio y el manejo del cuchillo / en un santiamén resolverá el problema que le pongas; / hacer un juguete, con música o sin ella; / un arado, un sofá, un órgano o una flauta ; / fabricar una locomotora o un reloj; / abrir un canal o construir un muelle flotante; / en suma, hará cualquier cosa, para tierra o para mar; / una matraca para el niño o un “setenta y cuatro”; / ¿fabricar dije? Sin duda, cuando se lo propone, / no sólo crea la cosa, también la máquina que la construye.
- [7] Georgius Agricola, *De re metallica*, trad. Herbert Clark Hoover y Lou Henry Hoover, Nueva York: Dover Publications, 1950.
- [8] Véase, p. ej., Billington, *The Innovators*, 23-29.
- [9] Cooper, “Myth, Rumor, and History”, 93.
- [10] Derrick Beckett, *Stephensons’ Britain*, Newton Abbott, Devon: David & Charles, 1984, 138
- [11] H. J. Hopkins, *A Span of Bridges: An Illustrated History*, Newton Abbott, Devon: David & Charles, 1970, 159; Sheila Mackay, *The Forth Bridge: A Pictorial History*, Edimburgo: HMSO, 1990, 69.
- [12] Hopkins, *Span of Bridges*, 159.
- [13] L.T.C. Rolt, *Isambard Kingdom Brunel*, Hammondswoth, Middlesex: Penguin Books, 1970, 249.
- [14] Citado en *New York Times*, 22 de agosto de 1923, 15.
- [15] Véase p. ej., Mackay, *Forth Bridge*, 112.
- [16] Dixie W. Golden, “A Man and His Bridge”, en *A Golden Gate Jubilee, 1937-1987*, Cincinnati: College of Engineering, Universidad de Cincinnati, 1987.
- [17] Véase, p. ej., Billington, *The Innovators*, cap. 7; Kenneth Silverman, *Lightning Man: The Accursed Life of Samuel F. B. Morse*, Nueva York: Knopf, 2003, cap. 7.
- [18] Véase, p. ej., Tom Standage, *The Victorian Internet: The Remarkable Story of the Telegraph and the Nineteenth Century’s On-Line Pioneers*, Nueva York: Walter, 1998.
- [19] Thomas A. Watson, asistente de Alexander Graham Bell, expresó decepción con el primer mensaje telefónico pedestre de Bell. Si Bell hubiera sabido que estaba haciendo historia al decir, “Sr. Watson. Venga. Quiero verlo”, “habría preparado una oración más resonante e interesante”. Watson consideraba el mensaje de Samuel Morse “¿Qué dispuso Dios?” como “un ejemplo de un primer mensaje ‘noble’”. Véase Ira Flatow, *They All Laughed... From Light Bulbs to Lasers: The Fascinating Stories Behind the Great Inventions that Have Changed Our Lives*, Nueva York: Harper Perennial, 1993, 82n.
- [20] Véase, p. ej., Whitcomb L. Judson, “Shoe-fastening”, Patente de EUA núm. 504 037, y Whitcomb L. Judson, “Clasp Locker and Un-locker for Shoes”, Patente de EUA núm. 504 038. Véase también Henry Petroski, “On Dating Inventions”, *American Scientist*, julio-agosto de 1993, 314-318.
- [21] W. C. Carter, “Umbrella-Stand”, Patente de EUA núm. 323 397.
- [22] Simeon S. Post, “Improvement in Iron Bridges”, Patente de EUA núm. 38 910.
- [23] “New Miscellaneous Inventions”, *Scientific American* 37, núm. 9 (1 de septiembre de 1877), 138.
- [24] Sobre expertos, véase Malcolm Gladwell, *The Tipping Point: How Little Things Can Make a Big Difference*, Nueva York: Little, Brown, 2002, 59-68.

- [25] Véase, p. ej., Neil Schlager, ed., *When Technology Fails: Significant Technological Disasters, Accidents, and Failures of the Twentieth Century*, Detroit: Gale Research, 510-517.
- [26] Véase, p. ej., W. Wayt Gibbs, “Software’s Chronic Crisis”, *Scientific American*, septiembre de 1994, 86.
- [27] Véase Bill Wolmuth y John Surtees, “Crowd-related Failure of Bridges”, *Proceedings of ICE*, Civil Engineering 156 (2003), 118.
- [28] “The Great Exhibition Building: Testing the Galleries”, *Illustrated London News*, 1 de marzo de 1851, 175-176; también 22 de febrero, 162.
- [29] Millennium Bridge Trust, *Blade of Light: The Story of London’s Millennium Bridge*, Londres: Penguin, 2001, 86.
- [30] Mike Winney, “Dampers to Cut Normandie Vibrations”, *New Civil Engineer*, 15/22 de diciembre de 1994, 5; también 12 de enero de 1995, 5.
- [31] Véase, p. ej., *Popper Selections*, ed. David Miller, Princeton: Princeton University Press, 1985, 136.
- [32] James Glanz y Eric Lipton, *City in the Sky: The Rise and Fall of the World Trade Center*, Nueva York: Times Books, 2003, 131.
- [33] Galileo, *Dialogues Concerning Two New Sciences*, trad. Henry Crew y Alfonso de Salvio, Nueva York: Dover Publications, [1954], 2-6.

## V. Construir sobre la base del éxito

*Three things are to be looked to in a building: that it stand on the right spot; that it be securely founded; that it be succesfully executed.*

[En cualquier edificio hay que atender a tres elementos: que se ubique en el sitio correcto, que sus cimientos sean seguros y que su ejecución sea exitosa.]

Goethe[1]

Lo mismo que Goethe buscaba en un edificio deberíamos buscar nosotros en cualquier estructura y, sin duda, en cualquier diseño. Incluso, hablando de sastrería, la aguja debe colocarse en el lugar correcto, sostenerse con firmeza en los dedos y manipularse de la manera adecuada para lograr el fin deseado. Ya sea para mostrar diapositivas para linterna o una presentación de PowerPoint, el proyector debe ubicarse en un lugar apropiado, colocarse con firmeza en una superficie sólida y manejarse debidamente. No cabe duda de que un orador preferiría que el proyector no estuviera colocado en un sitio frente al cual pasaran quienes lleguen tarde a la presentación, no le gustaría ver cómo se balancea en un banco poco firme o en un estante desvencijado, y no desearía que lo manejara alguien que no puede diferenciar arriba de abajo o la izquierda de la derecha, que son los costados de las diapositivas o las teclas de dirección de una computadora.

La proyección de diapositivas, por supuesto, es sólo una parte de una conferencia ilustrada. El diseño de la presentación en sí también debería ajustarse a las expectativas de Goethe. Buscamos tres características en una plática: que se desarrolle de acuerdo con el tema, que se funde sólidamente en los hechos y la lógica, y que sea claramente expuesta. No todo esfuerzo de comunicación tiene que estructurarse de manera tan formal, pero frecuentemente, incluso entre los animales, implica ocupar el territorio adecuado, mantenerse firmes en su demanda, y hacerla valer de manera convincente. Lo he escuchado a menudo de gatos, perros, pájaros y otros animales en el vecindario.

Luego de socavar nuestro jardín delantero con túneles, varias tamiás o ardillas listadas [*chipmunk*] han establecido su residencia allí. Sus entradas y salidas puntean el césped, y las pequeñas y lindas criaturas corren de un lado a otro, brincan y saltan. En mi etimología imaginaria, la palabra *chipmunk* viene del sonido de un chasquido agudo que hace la tamiá o ardilla listada, a veces en una repetición exasperante. He logrado reconocer a varias de las

tamias residentes, si no por su voz, sí por su territorio y sus hábitos. Una parece poseer la mitad de una línea de tres agujeros justo a la derecha de la puerta principal y a menudo salta hacia afuera y hacia adentro, sobre todo en la mañana. Especialmente cuando el césped necesita corte, esta tamia se para a menudo en sus dos patas traseras para inspeccionar la escena. No con poca frecuencia, se monta en una piedra a la orilla del jardín, supongo que para tener una mejor perspectiva de su territorio. Una tamia diferente, una algo más grande que parece habitar en algún sitio al costado de la casa, acostumbra sentarse en el primer escalón de nuestra entrada delantera y se estira, como si perorara o corriera a la oficina. Desde esta posición estratégica, dispone de una vista excelente de todo el jardín. Parece estar declarando su propiedad, y nunca he visto a otra tamia tan desafiante.

Estar en lo alto de un promontorio es una posición deseable para los animales de todo tipo, y nosotros la reconocemos como una posición de oportunidad, ventaja, privilegio, importancia, poder y simple orgullo. Cuando éramos niños, nuestros padres nos cargaban en sus hombros, con lo cual conseguíamos el apoyo de su movilidad y su altura para movernos y ver mejor, y para ser mejor vistos. Trepar a los árboles representa una atracción innata para los niños, quienes parecen subirse a ellos sólo porque están allí y los niños pueden hacerlo. Me parece que el miedo a las alturas es una fobia aprendida, por lo común inexistente en los jóvenes. Estar en una posición prominente tiene sin duda precedentes en la prehistoria. Incluso la evolución de la postura erecta del *Homo sapiens* puede haber sido prefigurada por el deseo de tener una posición estratégica más alta y por lo tanto mejor. Ésta no sólo le permitió al cazador un disparo más certero a la presa, también significó dominación. ¿Acaso no muchos animales en conflicto quieren parecer lo más grandes y altos que se pueda?

Los primeros refugios parecerían haber sido diseñados para retirarse en ellos y relajarse, más que para presumir y adoptar poses. Como tales, no necesitaban ser altos, en términos generales, y muchos pueblos desarrollaron tradiciones de vivir en el suelo. Donde el clima lo requería, se construyeron muros de protección como refugio del calor, el frío, el viento, la lluvia y la nieve. Cuando se crearon poblados, era probable que en un principio se extendieran horizontalmente. La edificación de ciudades amuralladas limitó naturalmente el espacio para construir, y así, el crecimiento posterior dentro de las murallas lógicamente continuó hacia arriba. Era ventajoso vivir en los áticos o los pisos superiores, donde los ocupantes de la casa podían dormir, como en los árboles, encima de cualquier animal de la casa y fuera del alcance de los predadores. Si se accedía a un ático por una escalera, ésta se podía jalar; si las escaleras se hallaban a la entrada del piso superior, sus escalones chirriantes podían ofrecer una advertencia contra los intrusos.

Las pirámides son anomalías —afirmaciones de altura y poder cuya *raison d'être* tal vez todavía no se entiende por completo—. Por milenios fueron las estructuras más altas de la

Tierra. En los pueblos medievales, lo más alto era la catedral, que señoreaba sobre la población como un árbol solitario rodeado de la pradera. La catedral gótica mostró que las estructuras altas podían ser construidas para verse ligeras, pero no eran proyectos que se emprendieran sin la ventaja de un propósito mayor, los recursos de los fieles y el debido respeto a la posibilidad de fracaso. Las catedrales también son famosas porque parece que siempre están en construcción y modificación. Un debate de finales del siglo sobre fracasos de construcción apuntó que los más comunes eran los “causados por alteraciones imprudentes [...] en que el peso que soportaba el edificio aumentaba en gran medida por la idea de que como la estructura y sus cimientos no mostraban señales de rupturas, protuberancias o grietas, había una reserva de fuerza con que se podía contar”. Entre los ejemplos proporcionados estaban las “torres centrales de muchas catedrales e iglesias”, incluida la catedral de Wells, “donde el avance de los asentamientos debido a la erección de una torre se detuvo con éxito al levantar arcos invertidos en las entradas de la torre de la catedral, para fortalecer la obra”.<sup>[2]</sup>

Durante la Edad Media, las torres proliferaron en el norte y el centro de las ciudades italianas, demostrando el poder de sus propietarios y la destreza de sus constructores. Pero estaban allí más para el espectáculo, la observación y lo sobresaliente que para el culto y el refugio. Y la finalización exitosa de la torre más alta nunca dejaba de alentar la edificación de otra todavía mayor. En el siglo XIX construir la torre más alta se volvió un fin en sí mismo. Cuando se efectuaba un concurso por el reúso de los componentes de hierro y cristal desmontados del edificio de la Gran Exposición de 1851 —el Palacio de Cristal— una de las propuestas fue erigir una Torre Panorámica de 305 m de alto, cuyo diseño incorporaba un reloj de 14 m de diámetro y que prefiguraba el rascacielos. En realidad esta altitud no se consiguió hasta casi cuatro décadas después, cuando en 1889 se terminó una torre de altura sin precedentes para otra exposición internacional. La Torre Eiffel de hierro forjado debe su diseño estructural a una experiencia de ingeniería con la construcción de puentes ferroviarios (entre ellos viaductos tan altos como el de Garabit en Francia, que cruzaban valles a lo largo y lo ancho). La Torre Eiffel fue la primera estructura de hierro que alcanzó la altura de 300 metros tanto tiempo buscada, que era lo doble de la pirámide más alta. (El Monumento a Washington, parecido a un obelisco, que la rebasó tres años antes con 185 metros, fue la primera edificación en los Estados Unidos en superar la altura de la Gran Pirámide. Pero ni las pirámides ni la Torre Eiffel ni el Monumento a Washington se consideran edificios porque en general no fueron ocupados en el sentido normal de la palabra.)

Aunque la experiencia de construir puentes era un prerrequisito para diseñar la Torre Eiffel, el Palacio de Cristal fue construido con una tecnología claramente independiente que realizó la más reciente iniciativa práctica. Había sido en otro Palacio de Cristal, el erigido en

Nueva York en 1853, donde Elisha Otis demostró su dispositivo de seguridad para elevadores, del cual el riesgo y el miedo siempre presentes de que se averiara un cable fueron punto de debate. Con el invento de Otis, si el cable se rompía, la cabina no se desplomaría sino que por la acción de un mecanismo de resorte y trinquete se quedaría detenida en el mismo lugar, con sus pasajeros sanos y salvos. Eso no quiere decir que los primeros elevadores no tuvieran ningún problema. El mismo elevador de vapor que se utilizó al construir el Monumento a Washington se usó para llevar a los visitantes a la parte superior del obelisco terminado —de 10 a 12 minutos—. El elevador se usaba tanto que la Compañía de los Hermanos Otis y personal del monumento lo inspeccionaban con regularidad. Cualquier señal de preocupación ocasionaba que se cerrara la cabina para las reparaciones. Aun así, su uso provocaba inquietud.<sup>[3]</sup> En una ocasión, el oficial del ejército a cargo de los edificios y lugares públicos reportó al jefe de ingenieros: “Se cree que el elevador es tan seguro como ha sido posible que el hombre lo fabricara, y se hace todo esfuerzo para prevenir accidentes; si alguna vez ocurriera alguno, será el resultado de algo imposible de prever”.<sup>[4]</sup> El diseño es precisamente previsión.

Y era fácil prever dónde radicaba el futuro. Si era posible construir estructuras tan altas como el Monumento a Washington y la Torre Eiffel, así como emplear elevadores para llevar a la gente a la parte superior, por tanto se podría hacer lo mismo con edificios comercialmente viables que albergaran oficinas y oficinistas. El nuevo acero laminado, más fuerte que el hierro forjado, era susceptible de utilizarse para hacer armazones más ligeros y construir a una altura todavía mayor. Pero antes que el uso extendido del acero y la seguridad del elevador, la altura de los edificios estaba limitada por los tramos de escaleras que la gente quisiera subir. Los elevadores, aún más que el acero, hicieron posible la edificación de los rascacielos.

No es sorprendente que los rascacielos surgieran primero en Chicago y Nueva York a finales del siglo XIX. Estas ciudades padecían escasez de agua, y el terreno para construir era limitado. En Nueva York, los primeros edificios altos se erigieron cerca de Wall Street, cuyo solo nombre evoca las restricciones de los primeros días de la ciudad. En 1653, previendo un ataque de los colonos de Nueva Inglaterra a Manhattan, se reparó el fuerte de Ámsterdam y se erigió una “alta empalizada y un pequeño parapeto a lo largo de la frontera norte de la ciudad”, la ubicación actual de Wall Street.<sup>[5]</sup> En Chicago, en sus inicios también un fuerte, el distrito comercial del centro estuvo acotado por vías férreas y es aún llamado *the Loop* [el apartadero], alrededor del cual el tren elevado se aparta ahora. De estas restricciones reales y metafóricas nació el rascacielos.

Así como la torre de 300 metros era el objetivo de la Europa del siglo XIX, el rascacielos de 305 m se convertiría en la meta de los Estados Unidos a principios del siglo XX. Sin

embargo, aunque técnicamente era posible construir incluso más alto, con frecuencia era difícil justificarlo sólo con base en motivos económicos. La construcción de la mayoría de los edificios se consideraba una inversión, cuyo rendimiento provenía de los ingresos por el alquiler de los diferentes espacios. Pero el solo hecho de construir un rascacielos no garantizaba la llegada de los arrendatarios. Una empresa próspera podría justificar la construcción de un rascacielos con el argumento de que albergaría sus oficinas, para ahorrar el pago de renta que de otro modo tendría que sufragar, pero pocas compañías llenarían un edificio muy alto. Además, la edificación y la operación de un rascacielos serían mucho más onerosas por metro cuadrado rentable que una oficina más eficiente (y modesta). Finalmente, la opción de construir rascacielos fue una decisión empresarial que encerraba un fracaso financiero potencial.

Pero había un beneficio intangible en el hecho de construir hacia arriba. Como una torre italiana, un rascacielos prominente era símbolo de poder e influencia, esas cualidades que la mayoría de la gente quiere tener. De este modo, negocios como los bancos y las compañías de seguros, basados demasiado en la imagen para distinguirse de la competencia, eran por lo general los que construían rascacielos a los que les daban el nombre de la compañía. Pero construir muy alto pronto podía ser contraproducente. Después de todo, un rascacielos de 305 m entre edificios de 30.5 y 61 m no dejaba de parecer extravagante y ostentoso, y ninguna de éstas es una cualidad de una empresa a la que los trabajadores desearían confiar su dinero o su vida.

Si los bancos y las compañías de seguros pudieran justificar de manera sensata la decisión de construir rascacielos importantes pero no extravagantes, entonces lo podrían hacer otros negocios. El edificio Woolworth fue financiado con dinero proveniente de las ganancias de sus tiendas de cinco centavos (después, de cinco y diez centavos). Había habido una creciente oposición a construir estructuras elevadas que bloquearan la luz y gravaran el servicio de transporte que llevaba a la gente de un lugar a otro. Pero Frank Winfield Woolworth quería un monumento a sí mismo tanto como un rascacielos rentable. El sitio que eligió, frente al City Hall Park, se localizaba convenientemente cerca de la sede de poder de la ciudad. También estaba cerca del distrito financiero y el puente de Brooklyn, lo cual lo volvió atractivo para los posibles arrendatarios.

Cuando el arquitecto Cass Gilbert le preguntó a Woolworth qué tan elevada deseaba que fuera su torre, él preguntó a su vez cuán alta podía ser. Gilbert respondió que tal decisión dependía de Woolworth, y entonces el arquitecto recibió instrucciones de hacerla 15 m más que la Metropolitan Life Tower, de 214 m, en ese entonces el edificio más alto del mundo.<sup>[6]</sup> La altura final del edificio Woolworth, inaugurado en 1913, fue de 242 m. Los toques finales a la estructura gótica que sería llamada “Catedral del Comercio” incluyeron grotescos que

sostenían las galerías encima del vestíbulo. Tallados en piedra están quienes participaron en el proyecto de construcción: el mismo Woolworth sosteniendo un centavo, Cass Gilbert, viendo un modelo del edificio; el ingeniero estructural Gunvald Aus revisando una viga y Edward Hogan, “el agente del alquiler del edificio, haciendo un trato”. Según Aus, fue Hogan quien insistió en “los tamaños máximo y mínimo de las oficinas”, factor que determinó el espacio entre las columnas del armazón de acero. También fue Hogan quien describió al edificio Woolworth como “las oficinas más altas, más seguras y con el terminado más perfecto en el mundo, además de protección efectiva contra el fuego y elevadores contra accidentes”.<sup>[7]</sup> Los superlativos hacen hincapié en la naturaleza competitiva del edificio alto.

El papel del ego (y el capricho)<sup>[8]</sup> al diseñar y encargarse de estructuras no se puede subestimar. En Newark, Ohio, cerca de 50 km al este de Columbus, se encuentra un edificio de siete pisos que es la réplica de una canasta. El edificio, 160 veces más grande que la canasta de madera de arce en la que está inspirada, funciona como las oficinas corporativas de la Compañía Longaberger, el mayor fabricante de canastas hechas a mano del país. El edificio Longaberger, creación de David Longaberger, fue coronado con un par de alas de 48 m de largo y 70 toneladas. Como el diseño de la canasta no permitía un ventanaje normal, el edificio se terminó con un tragaluz grande pero discreto sobre un atrio abierto. Esto a su vez precisó una resolución diseñística adicional: ya que las alas, en cuyo arco de 24.5 m encima del tragaluz del atrio se acumularía hielo como ocurre con el ala de un avión en una tormenta de nieve, las alas se calientan para prevenir la formación de grandes pedazos que caerían sobre el cristal.<sup>[9]</sup>

No todos los edificios icónicos son tan peculiares como el de Longaberger, pero sí pueden ser el producto de una obsesión, la más común la de ser asociado con el edificio más distintivo o el más alto del mundo, por lo menos durante corto tiempo. Ya que el edificio Woolworth tiene casi 244 m de alto, la marca de 305 m ya no estaba tan fuera de escala. A finales de la década de 1920, tres rascacielos que probarían los límites del ego se llevaron a la mesa de dibujo prácticamente de manera simultánea. Y no fue sólo el acero lo que atrajo la atención de los ingenieros.

Irónicamente, lo que acota la altura de los rascacielos no es de carácter estructural sino mecánico. Mientras los edificios crecen más y más, se requieren más y más elevadores. De otra manera, el sistema de transporte vertical no lograría trasladar a la gente de manera rápida y eficiente, y entonces la propiedad sería poco atractiva para los posibles arrendatarios. Pero si se destinara proporcionalmente más espacio dentro del edificio a huecos para elevador, entonces habría proporcionalmente menos espacio disponible para rentar. Además, los costos de construcción aumentan con la altura, y la regla general sería que con más de 75 pisos, los edificios no serían económicamente viables. En otras palabras, sería esperable que

los rascacielos más altos que eso no lograran obtener un rendimiento positivo de la inversión y por lo tanto no se diseñaran.

Entonces, ¿por qué se construyó el Empire State, con sus 102 pisos? La respuesta no se encuentra en su rotunda altura sino en lo extraordinario de tal número de pisos y de esa altura para su tiempo. El exgobernador de Nueva York y candidato presidencial recién derrotado, Al Smith, anunció el proyecto en 1929, como “las oficinas más grandes del mundo y la mayor propiedad inmobiliaria que se haya emprendido en la historia del país”. El enorme edificio tendría “casi 1 000 m de altura”, dijo,[10] pero no fue más específico. Por estar tan fuera de escala en su ubicación en la Quinta Avenida y la Calle 34, en cuyo entorno no había estructuras elevadas, las reglas comunes no se aplicaron al Empire State. Como dijo Gustave Eiffel de su torre cuando fue criticada por el *establishment* artístico de París, “existe una atracción en lo colosal, y un singular placer para el que son difícilmente aplicables las teorías de arte ordinarias”. [11] El Empire State no era sólo una colosal obra del arte ingenieril, también era el epítome del diseño arquitectónico. Y era alto sólo por ser alto.

Al mismo tiempo que se planeaba el Empire State, ya había comenzado la construcción de otros dos rascacielos enormes. Uno en la Calle 42 y la avenida Lexington, el edificio Chrysler, del que en un principio se dijo que tendría 247 m de alto y, por ende, desbancaría al Woolworth como el más alto del mundo. El otro era el Manhattan Company Building en Wall Street 40. Cuando Walter Chrysler supo que, después de cambiar los planes, se esperaba que este edificio superara los 282.5 m, aumentó en secreto la elevación de su propio edificio.[12] En última instancia, Chrysler y William Van Alen, el arquitecto de la gran estructura *art deco*, sorprendieron a todos cuando el chapitel ensamblado en la capa del edificio se había agrandado para dar al rascacielos terminado una altura total de 319 m. De esta forma el edificio Chrysler no sólo le quitó el mérito al Manhattan Company Building de que supuestamente reinaría por un breve periodo como el mayor del mundo, sino también al Empire State, que se suponía sería el primero en rebasar los 305 m cuando se terminara al año siguiente. Con el tiempo superó los 301 m (con la torre de transmisión y la antena que se agregaron después que la estructura alcanzó su altura total actual de 431 m).

Después de que terminó esta avalancha de edificios altos a principios de la década de 1930, no se construyó ninguno más elevado en Nueva York hasta que se terminaron las Torres Gemelas del World Trade Center al inicio de la década de 1970. (Con posterioridad a su derrumbe, los edificios de la preguerra de hace 70 años recuperaron su posición de los más altos de la ciudad.) No habría sido posible que la iniciativa privada construyera las megaestructuras de las Torres Gemelas de 110 pisos, pero lo que motivó a hacerlo a la semigubernamental Port of New York Authority no fueron sólo las ganancias. Las organizaciones también tienen egos. Aún así, tenía que justificarse la decisión de construir

no una sino dos estructuras de esa altura, con un total de casi 930 000 m<sup>2</sup> de espacio para oficinas. Si a los elevadores necesarios para dar servicio a las torres se les hubiera destinado más del 30% del área que ocupaban, se habría tenido que reducir la escala de las torres o modificar sus proporciones. Sin embargo, un esquema innovador de elevadores directos y locales —con transbordos en los *skylobbies*— hizo que el diseño funcionara. Al operar tres elevadores, uno encima del otro, en cada hueco local, se ahorró una extensión de espacio considerable. La Torre Sears, que se terminó sólo un año después de la segunda torre del World Trade Center y la cual recuperó con sus 442 m el título del edificio más alto del mundo para Chicago, utiliza un sistema similar de elevadores locales, directos y de dos pisos.

La Torre Sears reinó por más de dos décadas como poseedora del título, hasta que se terminaron las Torres Petronas en Kuala Lumpur en 1997. Sin embargo, estas torres gemelas orientales fueron polémicas por la manera en que le arrebataron a la Torre Sears la corona de la altura. Como el edificio Chrysler, aunque no de modo tan furtivo, las Torres Petronas alcanzaron su altura por chapiteles considerados integrales para la estructura. Las torres, de 452 m de alto, cuentan con sólo 88 pisos ocupables.

La competencia por el edificio más alto del mundo siguió capturando la imaginación tanto de los jugadores como de los observadores, pero el ataque a las torres del World Trade Center de Nueva York y su derrumbe el 11 de septiembre de 2001, cambió el juego. De repente surgía un nuevo enfoque por el cual un edificio alto tal vez no fuera un proyecto viable, y pudiera constituirse en el objetivo, ahora creíble, de terroristas. En general, los edificios superaltos financiados y en construcción siguieron adelante como estaba planeado, pero los proyectos que se encontraban en las primeras etapas de planeación se detuvieron, se redujo su escala o se descartaron por completo. Éste sería el destino del proyecto de Chicago llamado 7 South Dearborn por la dirección del edificio que habría recuperado para Chicago y los Estados Unidos el título del “edificio más alto”. Después del 11 de septiembre Donald Trump redujo su torre de Chicago de 125 a 90 pisos. En el Medio Oriente y Asia del Este, en especial en lugares que se perciben menos susceptibles o vulnerables a un ataque terrorista, los proyectos continuaron en general como se habían planeado. No obstante, el presidente del influyente Consejo de Edificios Altos y Hábitat Urbano reconoció que “el futuro de los edificios altos se veía incierto”.<sup>[13]</sup>

En los Estados Unidos, el temor a los ataques terroristas ha afectado no sólo el apoyo para proyectos futuros sino la manera en que se perciben los edificios existentes. A principios de 2004 una pequeña empresa se mudó al Empire State, tal vez atraída por la disponibilidad de un espacio con una vista imponente que después del 11 de septiembre de 2001 ofrecía tarifas atractivas por la prestigiosa dirección. Una invitación para mostrar las nuevas oficinas a clientes antiguos y potencialmente nuevos atrajo a un público lamentablemente pequeño.

La vista de las nuevas oficinas puede haber sido espectacular, pero muchos neoyorquinos, que sin duda aún tenían frescas en la memoria las imágenes de 2001, preferían no asistir a una fiesta en un piso alto de lo que percibían era un blanco excelente para los terroristas. La desairada invitación fue un presagio de lo que sucedería, ya que el número de clientes disminuyó y los empleados fueron despedidos.

Herbert Muschamp, el crítico de arquitectura del *New York Times*, cerró su reseña de una exposición de edificios altos que se montó en el Museo de Arte Moderno preguntando: “¿Es necesario decir que el temor creciente es una de las cosas realmente buenas de la arquitectura? Cualquier visitante de la Torre Eiffel lo sabe. Los edificios altos nos transportan al lejano aspecto del terror”. No todos son acrofóbicos, por supuesto, pero el miedo a los edificios altos ha adquirido un nuevo significado desde el 11 de septiembre. Muschamp también expresa otra afirmación notable en su reseña; concretamente dice: “Suponemos que los ingenieros pueden realizar cosas maravillosas”.<sup>[14]</sup> Sin duda pueden realizarlas, pero poco pueden hacer para disipar el terror. No obstante, tienen el talento para diseñar estructuras que sostienen edificios altos, y lo tienen para hacerlo de manera muy económica.

Incluso antes que el miedo a más ataques terroristas a edificios superaltos, la proliferación de éstos la limitaron, además del problema del elevador, otras circunstancias. Mientras los edificios de acero se hacían más altos, el costo de su construcción naturalmente se volvió más caro. El armazón estructural no sólo tenía que sostener el enorme peso del edificio sino fortalecerlo contra la acción lateral del viento, que aumentaba desproporcionalmente con el incremento de la elevación. Así, diseñar un edificio de más de 30 pisos significaba incurrir en costos adicionales relativos al fortalecimiento de la estructura contra el viento.<sup>[15]</sup> Éste fue el concepto del diseño que Fazlur Khan, el ingeniero estructural del John Hancock Center y Sears en Chicago, denominó el “recargo por altura”.<sup>[16]</sup>

Precisamente para disminuir el precio de este concepto Khan concibió el armazón tubular. Sostenía que la forma estructural más eficiente para resistir la flexión lateral era el tubo —el bambú debe su fuerza estructural a su hueca estructura ligera—, y en consecuencia diseñó sus más altos edificios siguiendo un principio tubular. De este modo, el John Hancock Center, con sus característicos tirantes de acero en diagonal al descubierto, tiene un armazón tubular cónico. (Este diseño mitiga el efecto del viento, mientras al mismo tiempo produce el deseable resultado de que el área de los pisos inferiores comerciales sea dos veces más grande que la de los pisos superiores residenciales.)<sup>[17]</sup> La Torre Sears está constituida por nueve tubos cuadrados de ensamblados, como un puñado de pajas de diferente longitud, en el que cada una contribuye a la fuerza del grupo. La forma tubular no sólo es eficiente sino que también tiene la ventaja adicional de empujar las principales columnas estructurales hacia el exterior, eliminando de este modo las obstrucciones del espacio interior, que lo hace

más atractivo para los posibles arrendatarios.

Las torres del World Trade Center de Nueva York también utilizaron un principio tubular. Las columnas exteriores estrechamente espaciadas le daban a las estructuras superaltas la rigidez suficiente contra el viento. Eso no significa que el viento no pueda mover las torres. En efecto, sin saber cómo reaccionarían los ocupantes de los pisos más altos al movimiento anticipado que permite la flexibilidad de las torres, los ingenieros que diseñaron las estructuras hicieron pruebas en sujetos desprevenidos para ver qué tan sensibles eran a los pisos en movimiento. Se montó una sala de pruebas sin ventanas sobre impulsores hidráulicos que podían mover la sala para simular lo que se sentiría estar en una oficina en lo alto del World Trade Center. El área de prueba se disfrazó como la sala de revisión de un optometrista y los sujetos llegaron ahí sin sospechar su verdadera función.[18] Al enterarse de esta manera de la tolerancia de la gente al movimiento, es decir, conocer la cantidad de movimiento inaceptable, los ingenieros pudieron diseñar las torres con la rigidez necesaria.

Cuando se terminó, en 1976, el edificio más alto de Boston, la John Hancock Tower, de 60 pisos (240 m de alto), la caída de sus ventanas sin razón aparente le acarreó una triste fama. La fachada de cristal que reflejaba la histórica iglesia de la Trinidad frente a la Plaza Copley fue tapiada con madera mientras se investigaba la causa del fracaso. Finalmente se advirtió que el problema principal estuvo en la manera en que se fabricaron los paneles de cristal, que los hizo susceptibles de romperse y despegarse de los espacios entre los vidrios de cristal aislado. En el curso de la investigación sobre la causa del fracaso en las ventanas, se descubrió que todo el edificio, con una estrecha huella trapezoidal poco común, se movía demasiado con el viento. Para reducir el movimiento, se conectaron con resortes enormes pesos al armazón de acero del edificio y se sintonizaron con su frecuencia natural. Este sistema, que utiliza lo que se conoce como amortiguador de masa sintonizado, está diseñado para que los pesos se puedan desplazar en sentido contrario a cualquier movimiento que se manifieste, controlándolo de ese modo como un niño puede hacerlo con el movimiento de un columpio impulsando éste en sentido contrario.[19] Los problemas con la torre Hancock de Boston ofrecieron el indicio de que los edificios habían sido estructuralmente diseñados de manera tan eficiente que eran demasiado flexibles, a veces en formas inesperadas. Siguiendo y extendiendo los modelos de éxito proporcionados por los edificios anteriores se ha llegado al punto en que las nuevas estructuras estén más cerca del fracaso.

El Centro Citicorp de Nueva York (ahora Citigroup) comprende una torre de 280 m de alto de un diseño poco común. Su parte superior tiene un corte en ángulo de 45 grados que forma hacia el sur un plano inclinado, reminiscente de los populares despliegues de paneles solares en los tejados de la época en que se construyó el edificio, lo cual le confiere una

silueta distintiva. Terminado en 1977, este rascacielos también se distingue desde el nivel de la calle. La esquina noroeste de la parcela sobre la cual está construido le pertenece a una pequeña iglesia, que no quiso renunciar a su excelente ubicación. Sin embargo, la iglesia deseaba vender los derechos aéreos, y entonces la torre de Citicorp se diseñó para asentarse en cuatro columnas enormes que no se ubican en las esquinas del edificio sino en los puntos medios de sus costados. Esto da lugar a las espectaculares salientes de las esquinas de la torre y el armazón estructural poco común que hay detrás de la fachada. Debido al apoyo poco convencional de la torre, se necesitó un armazón de acero demasiado consistente y pesado para mantener dentro de límites aceptables el movimiento inducido por el viento. El edificio se diseñó desde el principio para incorporar un amortiguador de masa sintonizado, a fin de evitar pagar el alto precio de la altura.[20]



Figura 8. *La distintiva base y corona de la torre del Centro Citicorp (ahora Citigroup) en la ciudad de Nueva York refleja las limitaciones e influencias bajo las que se diseñó. (De la colección del autor.)*

A causa del armazón estructural poco común de la torre Citicorp, que tenía que dirigir el

peso de la estructura lejos de sus esquinas, el análisis de su comportamiento no era rutinario. En particular, predecir cómo reaccionaría a las fuerzas del viento implicaba analizar los efectos no sólo de los vientos que pegaban directamente en una cara del edificio, sino también de los “vientos en cuartos”, que son los que golpean la estructura en dirección de una diagonal entre dos esquinas contrarias. Se determinó que un armazón con conexiones de acero soldadas era lo suficientemente consistente para resistir el “peor escenario”, y el diseño del edificio implicaba incorporar dichas conexiones.

Poco después de que el edificio fue construido, su principal ingeniero estructural, William LeMessurier, descubrió que en alguna parte del más detallado proceso del diseño se sustituyeron las conexiones atornilladas por soldadas. Temiendo que los efectos de los vientos se hubieran probado sólo como una estructura soldada, LeMessurier recalculó los efectos para las conexiones atornilladas menos consistentes y encontró que la estructura era deficiente para resistir una inclinación. LeMessurier notificó al propietario del edificio del posible desastre y la urgencia de impedirlo de manera inmediata debido a que se aproximaba la temporada de huracanes. Más que iniciar una acción litigiosa, el ingeniero y el propietario trabajaron para reforzar el edificio con conexiones de acero soldadas, lo cual se hizo en las noches, cuando las oficinas estaban vacías. Para los ingenieros, en la actualidad el edificio se levanta como testamento a la acción decisiva y la cooperación y como un estudio de caso clásico de la conducta ética.[21]

Aunque la vulnerabilidad de la torre Citicorp atornillada ante los vientos representaba una situación grave, el problema crónico de las estructuras altas de todo tipo se encuentra en los vientos preponderantes. Así, prácticamente todos los rascacielos superaltos que se construyen en la actualidad han incorporado dispositivos de control de movimiento en su diseño básico. Las Torres Petronas tienen cadenas largas y pesadas que cuelgan dentro de sus chapiteles para mitigar el movimiento no deseado de los edificios. Tanto los dispositivos de amortiguación activos como pasivos se han convertido en un medio casi esperado de estructuras altas, seguras y estrechas cuyo movimiento de otra forma sería incómodo e inquietante para algunos, si no es que para todos sus ocupantes. El Centro Financiero de Taipei, de 508 m, que significó la entrada de Taiwán a la competencia del edificio más alto del mundo, también se conoce como Taipei 101 por su número de pisos. Tiene una esfera grande y pesada suspendida cerca de la parte superior de la estructura. Sin embargo, en vez de esconderla en alguna capa del edificio o en una sala mecánica, este enorme péndulo es una firma decorativa que destaca en las calles de Taipei.[22] El edificio también tiene los elevadores más rápidos del mundo (alcanzan velocidades de 1 016 m por minuto para trasladar a los pasajeros del lobby al piso 89 en 39 segundos). Según el presidente de Taiwán, Chen Shui-bian, tener el edificio más alto del mundo “no sólo afirma la industria

arquitectónica de Taiwán, también es el orgullo y el honor de sus 23 millones de habitantes”.

[23]

Tener un récord mundial de altura no es la única manera de distinguir una estructura. Existe otro rascacielos recién terminado no tan elevado y estrecho que necesite dispositivos de amortiguación mecánicos para estabilizarse en el viento. Aún así, la forma completa del edificio de 180 m de alto conocido por su dirección londinense, 30 St. Mary Axe, nombre de la calle que rememora el arma utilizada en la masacre de vírgenes que encabezó Atila en el siglo V, se diseñó en parte para atenuar el viento en las calles que lo rodean. Debido a la configuración poco común de la estructura, la han descrito como “la figura de un lingam” [24] y “se le ha comparado de forma muy diversa: con un cigarro, un cohete, una bala, un pene, un lápiz labial, un zepelín, una lámpara de lava, un dedo vendado y, muy a menudo, con un pepinillo”. Sin embargo, su arquitecto, Norman Foster, “prefiere la metáfora de una piña”. Un crítico de arquitectura encuentra “una sensación trascendente de satisfacción intelectual”, al comprender que el edificio, único, es “más el resultado de ingeniería ruda e ingeniosa y de soluciones ambientales que de los caprichos de artistas inteligentes y con buen gusto”:

El edificio es circular en los planos (cada piso es de un tamaño distinto) tanto para reducir los fuertes vientos que se generan en el nivel de la calle por los altos edificios rectangulares como para minimizar su tamaño aparente: No puedes ver la parte superior desde abajo, y tiende a confundirse entre los edificios que lo rodean cuando se le ve desde lejos. La estrecha mitad inferior permitió al arquitecto abrir una plaza pavimentada en una de las partes más densas de Londres; la parte superior redonda suaviza su impacto en el horizonte.[25]



Figura 9. *El edificio Swiss Re, también conocido por su dirección en Londres, 30 St. Mary Axe, es circular en los planos. (Cortesía de Foster and Partners.)*

El “propietario y arrendatario principal” del edificio “es Swiss Re, una formal y respetable compañía de seguros con sede en Zurich” que se “preocupa en serio por los posibles costos financieros para sus clientes de asuntos como el calentamiento global”. De ahí que pretendiera que sus oficinas centrales en Londres fueran “un modelo de diseño ‘verde’

energéticamente eficiente”. Entre las características verdes del edificio están las “estaciones meteorológicas’ computarizadas externas que monitorean automáticamente el viento, la luz del sol y el calor, que abren o cierran ventanas y persianas en consecuencia”. Las ventanas que se pueden abrir permiten que el aire fresco de afuera “entre y se use para reducir considerablemente la necesidad de aire acondicionado”.<sup>[26]</sup> En este sentido, 30 St. Mary Axe es tanto una máquina como un edificio.

Un barco es una máquina de transporte y también un gran edificio que se mueve. Excepto cuando ancla, no permanece en un solo lugar, pero en todo momento su capitán debe saber su ubicación —su latitud y longitud— en la carta. Quizá el barco no parezca estar seguramente fondeado, pero si su flotabilidad no se ha lastrado de manera adecuada puede perder el equilibrio. Claro que el navío debe ser navegado con éxito, para que no termine encallado, o algo peor. Pero seguir un antiguo canal en un puerto que se visitó años antes no es garantía de llegar con éxito al muelle. Los canales cambian, y por eso existen pilotos portuarios. Más que navegar alrededor del mundo, ellos permanecen en un solo lugar, no siguiendo las estrellas sino los canales cambiantes, en los cuales sólo a ellos se les puede confiar pilotar de manera exitosa.

La tradición, si no es que algo más, no permitió que el *Queen Mary 2*, “el navío más grande, más alto y más ancho jamás construido”, con sus cubiertas elevadas casi como un rascacielos señoreando sobre muchos edificios de poca altura en las ciudades y navegando con instrumentos ultrasofisticados, entrara a puerto sin un piloto local. Y a pesar de que la Cunard Line “alardeó” de que su barco más reciente “podía atracar en muchos puertos sin remolques por sus propulsores de proa de vanguardia, controlados por palancas de mando en el puente”, en Nueva York se necesitaron remolques porque “las corrientes con régimen de marea son muy impredecibles en el Hudson”. Según el capitán del trasatlántico: “A veces hay poco movimiento en la superficie, pero hay una corriente 4.5 m abajo”. Aunque el barco se haya maniobrado con éxito sin ayuda en otros puertos, no se puede basar en esa experiencia en un nuevo entorno.<sup>[27]</sup> No importa qué tan exitoso pueda parecer un diseño, siempre existe el peligro de que el fracaso latente esté acechando bajo la superficie.

---

[1] *Elective Affinities*, trad. James Anthony Froude, Libro 1, cap. 9. Citado en *Bartlett*, 16<sup>a</sup> ed., 349.

[2] “The Failure of Buildings”, *The American Architect and Building News* 32, núm. 798 (11 de abril de 1891), 28-29.

[3] Louis Torres, “To the immortal name and memory of George Washington”: *The United States Army Corps of Engineers and the Construction of the Washington Monument*, Washington, D. C.: Office of the Chief of Engineers, s.f., 106-107.

[4] Citado en *ibid.*, 107.

- [5] Edwin G. Burrows y Mike Wallace, *Gotham: A History of New York City to 1898*, Nueva York, Oxford University Press, 1999, 63-64.
- [6] Neal Bascomb, *Higher: A Historic Race to the Sky and the Making of a City*, Nueva York: Doubleday, 2003, 9.
- [7] Sarah Bradford Landau y Carl W. Condit, *Rise of the New York Skyscraper, 1865-1913*, New Haven, Conn.: Yale University Press, 1996, 381-382, 389-390, 384, 386.
- [8] Especialmente las tiendas de comida han seguido una tendencia al diseño fantástico de una imagen de Clam Box, “una choza gris de madera con la forma del envase de cartón en el que tradicionalmente se sirven las almejas fritas”, véase R. W. Apple, Jr., “Even the Body Politic Has to Eat”, *New York Times*, 21 de julio de 2004, F1, F6. Véase también, p. ej., Robert Venturi, Steven Izenour y Denise Scott Brown, *Learning from Las Vegas-Revised Edition: The Forgotten Symbolism of Architectural Form*, Cambridge: MIT Press, 1977.
- [9] “No Picnic for Designers”, *Modern Steel Construction*, mayo de 1998, 44-48. Véase también “Robert McG. Thomas Jr., “David Longaberger, Basket Maker, Dies at 64”, *New York Times*, 22 de marzo de 1999, obituario.
- [10] Citado en Bascomb, *Higher*, 150.
- [11] Gustave Eiffel, citado en “The Tower Stirs Debate & Controversy”, <http://www.tour-eiffel.fr/teiffel/uk/documentation/dossiers/page/debats.html>; traducido de *Le Temps*, París, 14 de febrero de 1887.
- [12] Bascomb, *Higher*, 102-103.
- [13] William Foreman, “Taipei 101 Skyscraper Deemed Tallest”, Associated Press Online, 8 de octubre de 2004.
- [14] Herbert Muschamp, “Skyscraping around the Urban World”, *New York Times*, 16 de julio de 2004, E25, E29.
- [15] “A Super Engineer’s Skyscraper”, *Structural Engineer*, mayo de 2004, 42.
- [16] Véase, p. ej., Fazlur Khan, “The John Hancock Center”, *Civil Engineering*, octubre de 1967, 38-42. Véase también Yasmin Sabina Khan, *Engineering Architecture: The Vision of Fazlur R. Khan*, Nueva York: Norton, 2004, 69-70.
- [17] “A Super Engineer’s Skyscraper”.
- [18] Glanz y Lipton, *City in the Sky*, 139-140.
- [19] Véase, p. ej., Matthys Levy y Mario Salvadori, *Why Buildings Fall Down: How Structures Fail*, Nueva York: Norton, 1992, 197-205.
- [20] Matthys Levy y Mario Salvadori, *op. cit.*, 202.
- [21] Joe Morgenstern, “The Fifty-Nine Story Crisis”, *New Yorker*, 29 de mayo de 1995, 45-53.
- [22] Véase, p. ej., Dennis C. K. Poon *et al.*, “Reaching for the Sky”, *Civil Engineering*, 54-61, 72.
- [23] Foreman, “Taipei 101 Skyscraper”.
- [24] Muschamp, “Skyscraping around the Urban World”, *New York Times*, 16 de julio de 2004, E25, E29.
- [25] David Littlejohn, “It’s a Pickle, It’s a Pineapple—It’s a Brilliant New Skyscraper”, *Wall Street Journal*, 13 de julio de 2004, D8.
- [26] *Ibid.*
- [27] James Barron, “Queen Mary 2 Is Back, This Time Bringing Better Bathrooms”, *New York Times*, 6 de julio de 2004, B8.

## VI. De simples piedras a superarcos

*Twenty men crossing a bridge,  
Into a village,  
Are twenty men crossing twenty bridges,  
Into twenty villages,  
Or one man  
Crossing a single bridge into a village.*

[Veinte hombres que cruzan un puente / hacia un poblado / son veinte hombres cruzando veinte puentes / hacia veinte poblados / o un hombre / que cruza sólo un puente hacia un solo poblado.]

Wallace Stevens[1]

Los puentes, que se cuentan entre las estructuras más grandes y más ambiciosas diseñadas deliberadamente en el mundo, sin duda han evolucionado no como imitación del éxito sino como reacción al fracaso. Los fracasos colosales han causado especialmente los cambios más revolucionarios en el diseño moderno de puentes, pero incluso los más primitivos surgieron como reacción a molestias pequeñas y no tan pequeñas, si no es que a fracasos absolutos.

Vadear un arroyo poco profundo siempre ha sido una forma de cruzarlo, pero el proceso requirió que por lo menos los pies de alguno se mojaran. Incluso arroyos menos profundos se pueden cruzar de esta manera, pero la corriente más rápida puede haber representado un reto para los menos fuertes y con pies un tanto inseguros. Los ríos más profundos se podían cruzar nadando, por supuesto, pero con un mayor riesgo y con el precio de mojarse todavía más. Aunque esto puede haber sido muy natural para nuestros antepasados y la mayoría de los animales, incluso un perro cobrador quiere sacudirse el exceso de agua cuando sale de ella con un pato en el hocico.

La mente inventiva hace conexiones a partir de diversas observaciones, y quienes eran más fuertes y más altos quizá se ofrecieran como voluntarios para cargar en sus espaldas a los menos fuertes y menos altos, tal vez por alguna consideración espiritual. Por lo general, los inventores también tienen una inclinación empresarial, y algunos pueden haber visto una gran oportunidad al concebir formas de trasladar rutinariamente a los viajeros y sus cargas a través de aguas que no superaban el nivel de su pecho para que llegaran secas al otro lado. Los oportunistas extremos pueden haber cruzado primero al viajero y vuelto después por la

carga. Por supuesto, el regreso puede no haber ocurrido nunca, y los oportunistas llevarse consigo la carga mientras tomaban la dirección opuesta en tierra seca. Formas más seguras y mejoradas de cruzar los ríos deben haber sido especialmente bien recibidas por los débiles, los confiados y los crédulos.

Los individuos con inventiva y mentalidad diferente tal vez buscaron una alternativa para poder elegir entre mojarse y ser robados. Cuando encontraban un arroyo, estos inventores deben haber caminado a lo largo de la orilla, analizando el problema. Con el tiempo deben haber encontrado unos rápidos. Aunque el agua fluía más rápido y con más energía entre las piedras del cauce, el espacio fortuito puede haber sugerido una alternativa a mojarse por completo. Incluso si las piedras sólo permitían cruzar una parte del arroyo, no debe haber surgido más de una chispa de la imaginación para pensar en extender el camino natural colocando otras piedras hacia el lugar deseado. Por lo tanto, las piedras deben haber proporcionado los primeros cruces permanentes secos. En efecto, hasta el día de hoy los puentes comienzan con muy amplios espacios y piedras altas conocidas como pilares, entre los cuales se construyen los arcos del puente.

Quizá no haya sido conveniente cruzar un arroyo profundo con piedras convencionales, y esto habrá desafiado a los viajeros con inventiva decididos a no mojarse los pies. Otra colocación fortuita de un objeto natural puede haber proporcionado una alternativa. Un árbol caído, tal vez con las raíces socavadas por la erosión del mismo arroyo, puede haber sido lo suficientemente alto para llegar de una orilla a la otra. Podría decirse que este cruce seco y alto fue un puente, si bien uno que requería sentido del equilibrio para usarse.

Incluso si un árbol caído no alcanzaba a cruzar el arroyo, la mente ingeniosa puede haberse inspirado en la situación para aumentar el puente parcial con un segundo tronco de la orilla contraria, o para tirar otro árbol lo suficientemente grande para cruzar el arroyo. Puede decirse que estos cruces deliberadamente diseñados y contruidos fueron los primeros puentes verdaderos. Cumplían el propósito buscado, pero como todos los objetos diseñados también tenían sus limitaciones y defectos. Tenían “pasillos” estrechos y redondeados, y estaban sujetos a pudrirse y por lo tanto a derrumbarse. Aunque los usuarios de estos puentes pueden haberse adaptado a ellos y aceptado sus limitaciones como parte de la naturaleza de los puentes, sin duda los protoingenieros tomaron tales limitaciones como retos por superar. Seguramente se construyeron puentes más anchos con dos troncos paralelos, el espacio entre ellos formando un arco de manera transversal con otros más pequeños que proporcionaran un cruce plano, sin importar que fuera un pasillo acanalado. Sin embargo, como el material eran los árboles el problema de durabilidad continuaba.

Un material alternativo habría sido la piedra, y en lugares donde estaban disponibles piezas relativamente planas ésta debe haber parecido la mejor forma de construir puentes.

Los pilares pueden haber sido contruidos de piedras planas más pequeñas apiladas de manera vertical y las pilas espaciadas tanto como lo permitieran las piedras más grandes que se consiguieran. Con piedras más grandes abarcando los pilares de la manera en la que los troncos abarcaban las riberas, estos puentes habrían permanecido en su lugar por algún tiempo. De hecho, todavía existen puentes de piedra de edad indeterminada. Un ejemplo de finales del siglo XX hecho de una sola piedra, que mide poco más de 4 m de largo, casi 1.5 m de ancho y 30 cm de profundidad, está en uso en Stonecrop Gardens, ubicado en las colinas del este de Cold Spring, Nueva York, cruzando el río Hudson desde la punta oeste.[2]



Figura 10. Un puente de piedras se incorporó al diseño de un estanque a finales del siglo XX en Stonecrop Gardens. (Fotografía de Catherine Petroski.)

La naturaleza de la piedra es su fortaleza en compresión y, contrariamente, su debilidad en tensión. La piedra utilizada como viga se prueba en los dos aspectos, porque su peso la hace debilitarse y por lo tanto aprieta la parte superior en compresión y extiende la parte inferior en tensión. Aunque las antiguas columnas de piedra se podían construir altas, el espacio entre ellas estaba limitado por la fuerza de los dinteles colocados en la parte superior. Por eso los templos griegos tienen columnas muy cercanas. De manera similar, los puentes de viga de piedra debían tener pilares muy cercanos, lo que significaba que un cruce largo implicaba la construcción de un considerable número de aquéllos. Además, los pilares cercanos habrían dificultado el flujo del río y éste habría tenido que correr más rápido entre ellos, lo cual a su vez habría tendido a erosionar las bases de los pilares, ocasionando que con el tiempo se derrumbaran. Para evitar este tipo de fracaso los romanos crearon técnicas para clavar pilas de maderos en lo profundo del lecho de un río para proporcionar cimientos

firmes sobre los cuales construir pilares duraderos.

Las limitaciones naturales (léase, *defectos*) de los puentes de viga de piedra obligaban a su evolución constante hacia arcos más grandes. Una alternativa al construir pilares cercanos era hacer arcos en ménsula con piedras planas más largas. El arco en ménsula es una forma estructural que vuelve a descubrir cada generación de niños que juega con bloques. Se puede abarcar una distancia mayor a la longitud de un solo bloque con una estructura escalonada que se forma al apilar bloques y usarlos como contrapeso. Hacer esto desde dos pilares relativamente separados resulta en un puente. Algunas cámaras funerarias en las pirámides egipcias parecen haber sido construidas de esta forma.[3] Los arcos en ménsula también tienen sus limitaciones, como los niños siguen aprendiendo una y otra vez. Construir puentes más largos con menos pilares exigía un cambio en la forma estructural.

Sólo se puede especular acerca de los orígenes del arco semicircular babilónico o romano, [4] el “verdadero arco” compuesto de bloques de piedra en forma de cuñas, así como de los orígenes de las formas estructurales antiguas y prehistóricas en general. Las cuñas se cuentan entre las máquinas más antiguas. Posiblemente se usaban para cortar madera y extraer piedra que se utilizaría en la construcción de las pirámides, obeliscos y otras estructuras monumentales. En sus *Problemas mecánicos*, un pseudo-Aristóteles se preguntaba acerca de la cuña: “¿Por qué se cortan pesos y cuerpos de tamaño considerable con una pequeña cuña, y por qué hacerlo requiere una gran presión?”[5]

En la Antigüedad, la cuña habría sido omnipresente en las canteras. Para que funcionara, primero habría tenido que existir una grieta natural o hecha en la que se pudiera introducir la cuña antes de que se le pudiera golpear. La cuña colocada de esta manera era de alguna manera un puente que cruzaba una distancia, y era capaz de soportar una gran presión. Donde había una grieta relativamente ancha, se tendría que usar más de una cuña para abarcar la distancia. (Las cuñas, por lo menos antes de golpear, habrían proyectado una distancia a la grieta: sólo esta configuración pudo haber sugerido el diseño de un puente en arco.) Una vez que se hubiera clavado lo suficiente para partir la piedra, la cuña o cuñas no necesariamente caerían en la grieta, ya que las partes de la pesada piedra no dejarían una gran distancia al partirse. De este modo, la cuña o cuñas se soportarían a sí mismas, como un puente —en el abismo que habría sido creado por su acción— entre los “contrafuertes” de la piedra partida. La “gran presión” que ejerció la cuña fácilmente podría haber sugerido que ésta también podría seguir soportando una gran presión, como lo hizo durante el proceso de martilleo. Las cuñas que se dejaron en esa posición proporcionaron un modelo para el puente en arco.

Un puente en arco de tamaño natural está formado por la disposición deliberada de piedras con forma de cuña sin punta, conocidas como dovelas, entre contrafuertes que son lo

suficientemente grandes para resistir la gran presión creada por el peso de las piedras y que soportará en todas direcciones. Por supuesto, la “disposición deliberada” de dovelas es más fácil de decir que de hacer, porque un arco incompleto no se sostendrá más de lo que una cuña estrecha en una grieta ancha. Pero, sin duda, los canteros habían aprendido que era útil tener más de dos manos para hacer un puente de más de dos cuñas. Así que era obvio que lo que se necesitaba para construir un puente con muchas dovelas era un medio para mantenerlas en el mismo lugar hasta que una (la piedra angular) se pudiera introducir para completar el ensamblaje del arco.

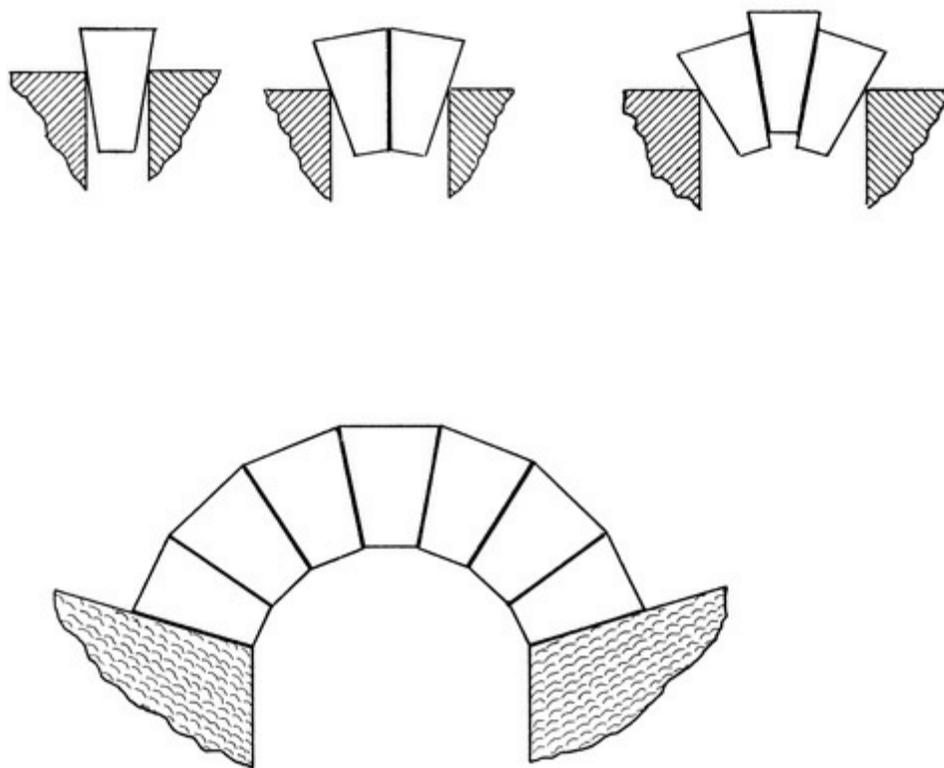


Figura 11. *El uso de cuñas puede haber servido como inspiración para la invención del arco de piedra. (Dibujos de Charles Siple.)*

El medio para hacerlo era, por supuesto, no las manos del cantero, sino un andamiaje de madera firme. Esta estructura temporal —un puente por derecho propio— se conoció como cimbra [*falsework* en inglés], porque no era el trabajo verdadero y final. También se conoció como centrado, un término especialmente apropiado para el arco semicircular que se convirtió en el estándar antiguo. El puente de arco romano necesitaba pilares pesados con un espacio no mayor que el diámetro del semicírculo. El ancho de los pilares era por lo común de casi un cuarto a un tercio del arco,<sup>[6]</sup> una regla general que sin duda se estableció tras los fracasos ocasionados por probar los límites de esas proporciones.

Un problema con el básico arco romano era que su subida tenía que ser por lo menos la mitad de su arco, ya que ésa es la naturaleza geométrica de un círculo. Por lo tanto, mientras

más largo el arco, más alta tendría que ser la calzada que lo cruzara. Esto no sería un problema particular para un arco diseñado para cruzar un profundo abismo o un río con orillas altas. Sin embargo, donde las orillas del río en general eran relativamente bajas, no habría sido conveniente. Construir un puente que necesariamente sea más alto que las orillas requeriría accesos relativamente largos para mantener una razonable calidad de la calzada. Mientras más alto se levantara el puente, más largos tendrían que ser los accesos, con lo que se invadirían las calles de la ciudad y se obstaculizaría la circulación a lo largo de las orillas. Para prevenir estas complicaciones se usaba un número suficiente de arcos de luz moderada en el puente adecuado. (El arco gótico, que con el tiempo se volvió popular por razones estéticas, casi nunca era apropiado para un puente porque hace más hincapié en la subida que en la luz.)

Un gran número de arcos cortos no sólo necesita un gran número de cimientos y pilares, lo cual aumenta el costo del puente, sino que también obstruye el flujo del río e impide la navegación. Los arcos más planos, con una forma más elíptica, permitían que se lograra una luz mayor sin que la acompañara una subida más alta, pero también ejercían una fuerza mayor en los pilares y los contrafuertes, exigiéndoles que fueran más gruesos y pesados. Este dilema fue resuelto en el siglo XVIII por el ingeniero francés Jean-Rodolphe Perronet, quien, a partir de los principios de los fracasos, sostuvo: ya que los pilares de soporte tenían que ser gruesos y pesados, principalmente para resistir durante la construcción las presiones de un puente parcialmente acabado, y por lo general se terminaba un arco a la vez, un puente cuyos arcos fueron construidos de manera simultánea se apoyaban entre sí y por lo tanto no necesitaban tales pilares sólidos. Perronet diseñó los arcos adintelados de su puente Neuilly para que fueran construidos simultánea y simétricamente, así dos arcos contiguos ejercerían presiones iguales y contrarias en el pilar que tuvieran en común, eliminando de este modo la necesidad de que resistieran el empuje de un arco entero antes de que el siguiente estuviera construido. Por lo tanto, los pilares podían ser delgados. La innovación necesariamente compensaba que la cimbra para todo el puente tuviera que estar en su lugar de principio a fin, eliminando así la medida de ahorro de reusar las vigas cuando se terminaba cada arco. El diseño de Perronet también requirió que toda la cimbra se quitara al mismo tiempo; de otra forma, los arcos contiguos ejercerían presiones desequilibradas sobre los delgados pilares, que por consiguiente se podían dañar. Lo asombroso de la cimbra para el puente Neuilly fue un espectáculo al que asistieron multitudes impacientes por ver cómo se hacía historia o cómo ocurría un fracaso espectacular. En la actualidad, París es una ciudad llena de puentes de arco adintelado, que hacen que los cruces entre la ribera derecha e izquierda le parezcan al peatón poco más que extensiones de las calles y avenidas.

Donde las riberas no eran bajas, los arcos semicirculares se siguieron utilizando para

crear estructuras monumentales. Los puentes de piedra de tiempos romanos, en especial los espectaculares acueductos que cruzan el valle de Gard al sur de Francia y en Segovia, España, han subsistido por dos milenios. Obviamente son estructuras duraderas, pero la construcción de piedra de cualquier tipo siempre tuvo sus inconvenientes. Entre los más importantes estaban el tiempo y el costo que implicaban, en especial si no había cantera disponible de la cual obtener el material adecuado. Donde la había, la madera era una alternativa a la piedra. Un puente de madera se podía construir más fácil y rápidamente, pero era más vulnerable a los estragos de las corrientes de agua y, por supuesto, estaba sujeto a ser destruido por el fuego o la putrefacción. Afortunadamente, en el siglo XVIII apareció una tercera alternativa para la construcción de puentes: el hierro fundido.

Por lo general se cree que el primer puente de hierro es el de un arco de 30 m terminado en 1779 que se extiende sobre el río Severn cerca de Coalbrookdale, Inglaterra, donde a la sazón florecía la industria del hierro. Mantener el río abierto para el movimiento comercial crítico, y al mismo tiempo construir un puente para facilitar la comunicación al otro lado del río, ofreció una oportunidad al fundidor de hierro Abraham Darby III, por su habilidad para hacer piezas grandes, de resaltar las ventajas de usar un nuevo material estructural. Como sucede generalmente con el uso de un nuevo material para hacer algo viejo, las propuestas para el diseño de un puente de hierro en Coalbrookdale siguieron modelos estructurales y estéticos impuestos por siglos de utilizar madera y piedra. El puente que se construyó se parece en su predominante forma semicircular a un arco de piedra romano y en los detalles de su conexión a una estructura de madera. La promesa de erigir el puente de hierro sin una cimbra costosa, y por lo tanto sin obstruir el río durante la construcción, fue una razón convincente para hacerlo. Cómo se erigieron los pesados medios arcos del puente ha sido por mucho tiempo un asunto de misterio y especulación, pero hace poco los académicos han propuesto el argumento convincente de que se hizo fácilmente y con poco más que el poder de los músculos y bloques y herramientas.[7]

El hierro fundido no tardó en usarse para hacer puentes de arcos adintelados y, con el tiempo, puentes de viga. Pero, al igual que la piedra, el hierro fundido es mucho más fuerte en compresión que en tensión. De hecho, la proporción de la fuerza del material de compresión a tensión de 6 a 1 estableció la forma transversal de la viga de hierro fundido, con el área del ala inferior seis veces más grande que la superior.[8] Por supuesto, en términos generales, mientras más grande sea una viga, mayor es su peso. Esto a su vez aumenta la tensión en la viga y por ende limita el arco de un puente que se pueda construir con ésta de manera efectiva.

Mientras tanto, otro tipo de hierro fue relativamente mucho más fácil de conseguir. El hierro forjado es un material mucho más resistente, y la fuerza que tiene en tensión es la

misma que en compresión. Esto hace que el hierro forjado sea apropiado para hacer que las cadenas, las varillas y otros componentes estructurales puedan resistir, y eso lo hace el material ideal para usarlo en los puentes colgantes. Aunque se cree que los puentes colgantes de cuerdas se han hecho por siglos en culturas en las cuales su sustitución regular se volvió un ritual, el uso de cadenas de hierro para estos puentes parece haber sido empleado por primera vez en China en el siglo XVII. Se cree que el primer puente con cadenas de hierro en Occidente se construyó sobre el río Tees cerca de Middleton, Inglaterra, en 1741.[9] Las aplicaciones del puente colgante se aceleraron con el aumento de la producción de hierro forjado a principios del siglo XIX. En ese momento, los puentes más largos fueron los colgantes con cadenas de hierro, y no sólo podían soportar calzadas más anchas y más pesadas sino que también tenían una vida más larga. A mediados de la década de 1820 se construyó un puente colgante con un arco de más de 153 m sobre el estrecho de Menai al noroeste de Gales. Aunque los arcos de hierro fundido de 183 m se habían propuesto a finales del siglo XVIII,[10] no se terminaría uno de más de 153 m hasta 1874, cuando James Buchanan Eads empleó el nuevo material, acero, en su puente que cruzaba el río Misisipi en San Luis.[11]

Mientras tanto, los puentes de viga simple más largos estaban limitados a ser de menor envergadura en cuanto al arco, que se estima era de 9 m, “justo en el límite del hierro fundido” todavía en la década de 1840.[12] Entonces fue el ferrocarril el que impulsó el desarrollo de diversos tipos de puentes. Aunque el puente de viga de hierro fundido era el adecuado para cruzar canales relativamente estrechos, su arco limitado hizo que no fuera indicado para el uso directo de ferrocarriles en otros lugares. Un medio popular para diseñar puentes más largos era complementar una serie de vigas de hierro fundido conectadas una detrás de otra con barras de hierro forjado. Este diseño de vigas atadas se aplicó a arcos más y más largos en la década de 1840, pero en 1847 el fracaso de un arco de casi 30 m de largo con un arco de tres vigas del puente Dee en Chester llevó la extensión de la forma a un final abrupto. Un siglo y medio después del desastre, un análisis atribuyó el fracaso a una grieta que se iniciaba en “una esquina del reborde de una viga”, un detalle que “se supone se agregó como una floritura artística”. [13]

En ese momento no se creía que los puentes colgantes fueran convenientes para el uso ferroviario, por lo menos en Gran Bretaña. A los puentes no sólo les faltaba rigidez, sino sus calzadas eran susceptibles de ser destruidas con el viento, características que eran inconsistentes con las necesidades y deseos de los ferrocarriles. De ese modo, la apremiante necesidad de puentes con un arco más largo provocó diseños innovadores como el puente Britannia, que constaba de tubos de hierro forjado de proporciones tan grandes que los rieles pasaban dentro de éstos. Cada arco medía aproximadamente 150 m pero el inmenso costo

del puente hizo que fuera una alternativa poco económica a los diseños de entramado abierto, de los cuales se construiría una gran variedad, en especial en los Estados Unidos. Por supuesto, sus arcos también estaban limitados. El puente colgante podía abarcar mayores distancias: a mediados del siglo se consiguió construir arcos de 300 m. El puente Niagara Gorge, de John Roebling, el primer puente colgante capaz de soportar ferrocarriles, abarcaba 250 m en 1854.

El desarrollo continuo del ferrocarril creó una necesidad de puentes siempre más largos, más fuertes y más resistentes para abarcar mayores distancias. Cuando un río, estrecho o valle más ancho presentaba un nuevo obstáculo que los diseños conocidos no podían superar al tender un puente, se buscaba otro. En la década de 1870 la expansión del ferrocarril hacia la costa este de Escocia produjo algunos problemas especialmente desafiantes. Una ruta costera entre Edimburgo y Dundee tenía que cruzar los estuarios, conocidos como esteros, de los ríos Forth y Tay. El fiordo de Tay medía más de tres kilómetros a lo largo de Dundee, pero era relativamente poco profundo y entonces se podía tender un puente de los diseños conocidos con vigas atadas sin que el arco excediera los 75 m. El puente largo y curvo destacaba por ser el más largo del mundo cuando se terminó en 1878, pero a finales de 1879 las vigas más largas y más altas se cayeron en una tormenta, matando a las 75 personas que cruzaban en el tren esa noche.[14]

El ingeniero del puente Tay, Thomas Bouch, también había sido contratado para construir un puente que cruzara el mucho más profundo fiordo de Forth, y para su diseño había elegido un puente con suspensión en fila con el que habría hecho arcos que impusieran récord. Fue durante su construcción cuando el puente Tay falló, y no es de sorprender que se le quitara la comisión del puente de Forth a Bouch. Después de que una comisión de investigación real afirmó que el puente Tay no había sido diseñado adecuadamente, se le reconstruyó como una estructura más ancha con pilares que parecían más sólidos. Se volvieron a utilizar en muchos casos las vigas intactas del puente original. El nuevo puente se construyó directamente al lado del anterior, vestigios de cuyos pilares permanecen visibles en la actualidad como un monumento al fracaso histórico, que se sigue estudiando y revaluando.[15]

La construcción del rediseñado puente de Forth se le confió a John Fowler, un maduro ingeniero con referencias impecables, quien se había interesado tanto en la estabilidad del puente Tay que “se negó a permitir que su familia lo cruzara”.<sup>[16]</sup> Gran parte de la responsabilidad del proyecto de Forth recayó en el joven asistente de Fowler, Benjamin Baker. Fue él quien escribiría: “Si hubiera fingido que el diseño y la construcción del puente de Forth no significaron una fuente de ansiedad presente y futura para todos los participantes, ningún ingeniero con experiencia me habría creído. Donde no existe

precedente, el ingeniero exitoso es el que comete menos errores”.[17] Robert Stephenson, el ingeniero del puente Britannia, había expresado inquietudes similares. En una carta a su ingeniero residente, Edwin Clark, escribió: “Dirás que siempre estoy evocando dificultades y consecuencias horribles: te respondo que es una parte importante del deber de un ingeniero”.[18]

Después de la tragedia del puente Tay, el puente que cruzaba el Forth no sólo tenía que ser un diseño sólido sino tenía que parecerlo a la gente no especializada que se esperaba confiara su vida al ferrocarril que lo cruzaba. Fowler y Baker eligieron un diseño poco común con proporciones sin precedentes. El tipo de puente era un puente en ménsula, que tiene sus raíces en el arco abovedado pero es capaz de arcos enormes. Los arcos del puente del fiordo de Forth son de más de 520 m, lo cual lo convirtió en el más grande del mundo cuando se terminó en 1890, habiendo superado incluso el logro del mundialmente famoso puente colgante de Brooklyn, que se terminó en 1883. El puente del fiordo de Forth, como el del nuevo Tay, no sólo era más fuerte que su diseño predecesor sino que, con sus enormes proporciones y su postura extensa, también se veía fuerte y estable contra el viento, y hoy se levanta como uno de los grandes puentes del mundo.[19]



Figura 12. El puente en ménsula (cantilever) en construcción que cruza el río St. John en New Brunswick demostró un principio estructural claramente diferente al del puente colgante. (De Scientific American, 1885.)

La evolución de los puentes, como la de cualquier otro objeto creado, avanza a través de la identificación y superación de los defectos y limitaciones —tanto reales como percibidos—

de la última tecnología. Y los objetos pueden ser juzgados como bien o mal diseñados. A pesar del éxito que tuvo, el puente de Forth se consideró una estructura demasiado pesada para su longitud. Por eso fue natural que otros ingenieros quisieran diseñar y construir puentes en ménsula más largos y más ligeros. Se estaba construyendo uno en Canadá a principios del siglo XX, bajo la dirección de Theodore Cooper, un ingeniero que había tenido una carrera larga y distinguida. El puente de Quebec abarcaría 550 m y cruzaría el río St. Lawrence—; sin embargo, en 1907 se derrumbó, cobrando la vida de 75 trabajadores que intervenían en su construcción. Una comisión real encontró el diseño deplorablemente deficiente. Cooper y su ingeniero de diseño, en su lucha por la economía y su falta de cuidado para llevar a cabo un diseño que rompiera récord sin el debido respeto a su magnitud, habían cometido algunos errores fundamentales.<sup>[20]</sup> Sin embargo, a los propietarios y posibles usuarios de los puentes no les preocupan los detalles del diseño, y tienden a asociar el tipo de puente con el fracaso.

La reacción natural a un fracaso tal, como sucedió con el original puente Tay, es reconstruir la estructura en una forma perceptiblemente fortalecida o construir otro de tipo claramente diferente en su lugar. En el caso del puente de Quebec, se reconstruyó como un puente en ménsula, pero se parecía un poco al original. Mientras el primer puente de Quebec era delgado, plano e incluso casi elegante, el remplazo era resistente, angular y austero. Hasta el día de hoy, el puente de Quebec es el más largo del mundo, distinción que ha mantenido por casi 90 años. No es que no se hayan diseñado y construido arcos más grandes; simplemente no se han construido como puentes en ménsula. Esto se debe a que había otros tipos que se podían hacer igual de largos e incluso mucho más.

Desde mediados del siglo XIX, el principal tipo de puente con arco largo fue el puente colgante. Después de que John Roebling mostrara con su puente colgante de Niagara Gorge que la forma podía soportar ferrocarriles sin demasiada deflexión, y con su puente de Brooklyn que podía abarcar distancias de más de 460 m y permanecer firme en el viento, el puente colgante fue la elección lógica para arcos largos. (El puente en ménsula lo desafió durante el periodo entre la construcción del puente de Forth y el colapso del de Quebec, pero fue sólo un breve periodo en la historia de los puentes.) A mediados del siglo después del puente de Brooklyn, el arco récord de los puentes colgantes midió más del doble, del arco de 490 m del de Brooklyn al de 1 067 m del puente George Washington, que se terminó en 1931. En 1937 el puente Golden Gate había aumentado el arco récord a 1 280 m, una distancia entre los soportes que ningún puente en ménsula ni otro tipo de puente conocido podía alcanzar.

Si el puente de Brooklyn tenía un defecto, era que se llevó un largo tiempo construirlo (14 años) y fue costoso (nueve millones de dólares, “aparte de daños terrestres, intereses y

demás”).[21] Gastar demasiado tiempo y dinero es un defecto que siempre atrae propuestas alternativas ingeniosas. En el caso del puente de Brooklyn, sus torres de mampostería eran vistas como un artefacto de la arquitectura del siglo XIX, y los distintivos cables que Roebling incorporó a sus puentes para darles estabilidad contra el viento eran vistos como redundantes en los pesados puentes diseñados para el ferrocarril del siglo XX y, más tarde, la circulación de automóviles. Por consiguiente, los nuevos puentes colgantes se construyeron con torres de acero y sin cables. Las torres de acero permitían que los puentes se erigieran mucho más rápida y económicamente, sin sacrificar fuerza, pero más tarde se demostraría que la eliminación de los cables fue un costoso error.

A finales de la década de 1930, los puentes colgantes se consideraban tan eficientes que se empezaron a construir algunos más grandes en áreas remotas y poco desarrolladas cuyas demandas de tráfico no exigían calzadas de más de dos carriles. Estos puentes largos y estrechos también fueron diseñados con cubiertas muy superficiales, para mantener la estética que había sido introducida con el puente George Washington. Pero mientras la cubierta sumamente ancha y pesada de éste, que colgaba de cables necesariamente enormes, le daba una inercia que ayudaba a mantenerlo firme en el viento, las cubiertas más estrechas y por consiguiente más ligeras provocaron que el viento las hiciera vibrar, se ondularan y, con el paso del tiempo, se rompieran. En 1940, cuando se produjeron las ondas en la cubierta del puente de Tacoma Narrows, éste se derrumbó en cuestión de horas —un destino que se capturó perfectamente en video—. [22]

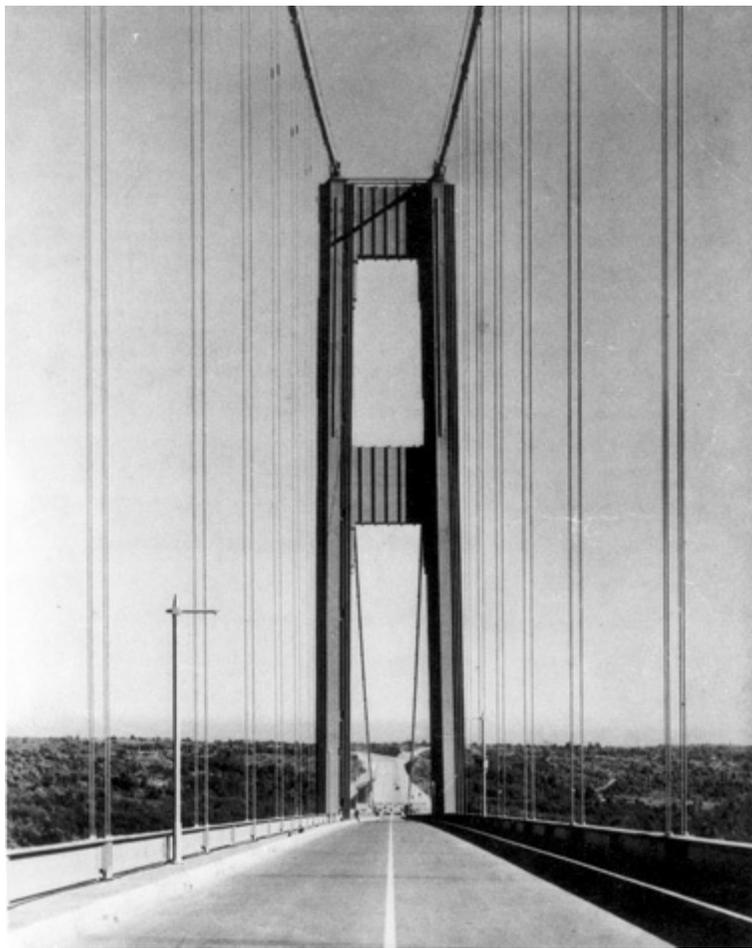


Figura 13. *El infortunado puente de Tacoma Narrows se caracterizaba por su calzada sumamente estrecha. (De la colección del autor.)*

Normalmente en la evolución de una tecnología, un fracaso como éste, sin precedentes y sumamente evidente y dramático, marcaría un callejón sin salida para el género, como sucedió con el entramado del Dee y el puente de Quebec. Sin embargo, en el caso del puente colgante, no existía un diseño alternativo que pudiera abarcar distancias tan grandes. Al mismo tiempo, aún había numerosos lugares y comunidades que necesitaban o querían cruces de largos arcos. Como resultado, tras una pausa que coincidió con la segunda Guerra Mundial y los primeros años de posguerra, se reanudó la construcción de puentes colgantes. El puente de Tacoma Narrows se reconstruyó en 1950, pero con una calzada más ancha, de cuatro carriles, y un entramado extremadamente profundo. El puente Mackinac, que se terminó en 1957, también tenía una cubierta fortalecida por un enorme entramado, y además la calzada tenía un enrejado abierto que permitía el paso del viento a través de la estructura. El arco de 1 300 m del puente Verrazano-Narrows, que se terminó en 1964, se construyó con una calzada rígida de dos pisos que estuvo en su lugar desde el principio, a pesar de que el volumen del tráfico no requería de inmediato el piso inferior y durante años no se usó.[23]

El puente Verrazano-Narrows sigue siendo el arco más largo en los Estados Unidos. Sin embargo, desde que se terminó se han construido puentes colgantes más largos en otros lugares. El primero en romper el récord fuera de los Estados Unidos fue el puente de Humber en Inglaterra que, con un arco de 1 410 m, se terminó en 1981. Al empezar el milenio, el puente colgante más largo del mundo era el Akashi Kaikyo en Japón. Con un arco principal de 1 990 m, es más de 50% más largo que el Verrazano. Aún están en la mesa de dibujo puentes más largos, particularmente uno que cruzará el estrecho de Messina entre Sicilia y la península de Italia. Se ha propuesto varias veces que este arco, que superará los 3 050 m, sea un puente colgante y una combinación de las estructuras del puente atirantado y el colgante.



Figura 14. El dibujo de un artista de un puente atirantado mostraba una opción que la firma Figg & Muller Engineers propuso para el puente Sunshine Skyway de Florida. (De la colección del autor.)

La forma moderna del puente atirantado se desarrolló tras la segunda Guerra Mundial, cuando se estaban tomando decisiones sobre la reconstrucción de muchos puentes europeos que habían sido destruidos en el conflicto. Donde los cimientos y los pilares permanecían relativamente intactos, reconstruir directamente sobre ellos era una posibilidad económicamente atractiva. Sin embargo, reproducir el antiguo puente habría significado limitar su capacidad de circulación a los niveles anteriores a la guerra. Mientras tanto, la cantidad y la intensidad de la circulación había aumentado, y por lo tanto eran convenientes los puentes con mayor capacidad. Una forma de lograrlo con los antiguos cimientos era hacer la superestructura de remplazo más ligera pero más fuerte, permitiendo de ese modo que el puente soportara una circulación más pesada sin sobrecargar la subestructura. El

punto atirantado parecía ser la forma ideal de alcanzar estos fines.

Aunque es diferente del puente colgante, en el cual la calzada está suspendida por cables secundarios (por lo general verticales) desde los largos cables principales que se tiran sobre las torres y dan a este tipo de puente su perfil característico, un puente atirantado tiene una calzada sostenida directamente por múltiples cables que provienen de las torres. Comúnmente llamadas pilones, las torres de los puentes atirantados son por lo general más ligeras en masa y forma. Además, como no hay cables principales de suspensión, el puente atirantado no necesita un anclaje costoso y no requiere que giren los cables en la obra, lo cual es muy demandante. Los cables se pueden instalar completamente formados, y su multiplicidad proporciona una redundancia estructural que por lo general le falta al puente colgante. Además, debido a la gran variedad de formas en las que se pueden arreglar múltiples cables para conectar la calzada al pilón, el puente atirantado ofrece muchas opciones estéticas. En términos generales, los diseños atirantados son más ligeros, se construyen más rápido, son menos costosos y de manera individual son más distintos que los diseños de puentes colgantes. No es de sorprender que en muchos casos se ha convertido en el puente más elegido, en especial por comunidades que buscan la denominada estructura emblemática, como lo hizo Boston para soportar las carreteras de su Big Dig sobre el río Charles.

Cuando se introdujo el puente atirantado, por lo general se creía que el diseño era apropiado para arcos moderados de más de 365 m. Se pensaba que el diseño clásico del puente colgante era el único adecuado para arcos considerablemente más largos. Sin embargo, a finales del siglo XX se estaban diseñando y construyendo puentes atirantados con arcos principales del orden de 915 m. (A principios del nuevo milenio, el puente de Tatara en Japón rompió el récord con 890 m, y había arcos más largos en la mesa de dibujo.)

El diseño de puentes ha recorrido un largo camino desde la colocación de piedras y troncos para cruzar arroyos. Sin embargo, todavía existe una similitud en el propósito y el proceso entre los antiguos canteros imaginativos que vieron un puente en el arco de las cuñas y los osados ingenieros modernos que han visto más allá al mirar por encima del hombro de sus predecesores. El proceso de diseño, ya sea aplicado a puentes o a cualquier otro objeto, es eterno. Avanza a través de la persistencia del fracaso al éxito. El fracaso de una cuña para abarcar una falla más grande que ésta llevó al uso de múltiples cuñas. El fracaso de una sola piedra para abarcar una distancia mayor llevó al uso de múltiples arcos. El fracaso de una viga de hierro fundido para abarcar más de 9 o 12 m (y sólo pocas veces hasta 15 m)<sup>[24]</sup> llevó al entramado de vigas. El fracaso del entramado de vigas para abarcar 30 m llevó al tubo de hierro forjado y a la cabriada. Otras limitaciones llevaron al uso de puentes colgantes y en ménsula. El fracaso del puente en ménsula en soportar los rigores de

la construcción llevó a su acortamiento y al predominio del puente colgante. Y hasta la prolongación del puente atirantado más allá de lo que alguna vez se hubiera escuchado, parecía no haber alternativa para las estructuras de arcos largos.

La invención, la ingeniería y el diseño tratan de conquistar el fracaso y superar las limitaciones. Desafortunadamente, la victoria puede ser intoxicante. Por lo general, el orgullo por el nuevo objeto exitoso se vuelve con el tiempo despreocupación, cuando el objeto una vez revolucionario se convierte en un objeto común. Los objetos comunes poco a poco se vuelven objetos prácticamente invisibles, y la multiplicación y extensión de objetos comunes se lleva a cabo con poca memoria de los fracasos de los cuales nacieron. Cuando se deja atrás el fracaso, el éxito guía con una confianza que el futuro inexplorado no garantiza. En la construcción de puentes, seguir el éxito significa tomar un camino que exige siempre que los arcos más largos se basen en versiones más cortas. El camino es muy peligroso y epicíclico. Con el tiempo, el éxito se encuentra de nuevo con el fracaso, y la historia se repite.

---

[1] “Metaphors of a Magnifico”, *The Collected Poems of Wallace Stevens*, Nueva York: Knopf, 1954, 19.

[2] Anne Raver, “In the Lair of a Tender Giant”, *New York Times*, 25 de septiembre de 2003, D9.

[3] Véase, p. ej., Mark Lehner, *The Complete Pyramids*, Londres: Thames and Hudson, 1997.

[4] Véase, p. ej., Steven M. Richman, *The Bridges of New Jersey: Portraits of Garden State Crossings*, New Brunswick, N. J.: Rutgers University Press, 2005, 2.

[5] Pseudo-Aristóteles, *Problemata Mechanica*, pregunta 17.

[6] Hopkins, *Span of Bridges*, 18.

[7] David de Haan, “The Iron Bridge—How Was It Built?” [http://www.bbc.co.uk/history/society\\_culture/industrialisation/iron\\_bridge\\_01.shtml](http://www.bbc.co.uk/history/society_culture/industrialisation/iron_bridge_01.shtml), 13 de octubre de 2005.

[8] Véase, p. ej., Derrick Beckett, *Stephensons’ Britain*, Newton Abbot, Devon.: David & Charles, 1984, 124, fig. 29.

[9] Sir Alfred Pugsley, *The Theory of Suspension Bridges*, Londres: Edward Arnold, 1957, 1-2.

[10] Hopkins, *Span of Bridges*, 83, 85.

[11] Véase, p. ej., Billington, *The Innovators*, 149.

[12] James Sutherland, “Iron Railway Bridges”, en *Robert Stephenson—The Eminent Engineer*, Michael R. Bailey, Aldershot, Hants.: Ashgate, 2003, 318. Cf. Cyril Stapley Chettoe, Norman Davey y George Robinson Mitchell, “The Strength of Cast-Iron Girder Bridges”, *Journal of the Institution of Civil Engineers* 22 (1944), 246.

[13] Véase, p. ej., Peter R. Lewis y Colin Gagg, “Aesthetics Versus Function: The Fall of the Dee Bridge, 1847”, *Interdisciplinary Science Reviews* 29 (2004), 177-191

[14] Véase, p. ej., T. Martin e I. A. MacLeod, “The Tay Bridge Disaster—A Reappraisal Based on Modern Analysis Methods”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Civil Engineering 108 (1995), 77-83.

[15] Peter R. Lewis y Ken Reynolds, “Forensic Engineering: A Reappraisal of the Tay Bridge Disaster”, *Interdisciplinary Science Reviews* 27 (2002): 287-298. Véase también Martin y MacLeod, “Tay Bridge Disaster”.

[16] Martin y MacLeod, “Tay Bridge Disaster”, 83.

- [17] Citado en Jim Crumley, *The Forth Bridge*, Grantown-on-Spey, Moray, Scotland: Colin Baxter Photography, 1999, 9.
- [18] Citado en Sutherland, “Iron Railway Bridges”, 331.
- [19] Para una descripción contemporánea del proyecto del Puente de Forth, véase Baker, “Bridging the Firth of Forth”, *Engineering*, 29 de julio de 1887, 116; 5 de agosto, 148; 12 de agosto, 170-171; 19 de agosto, 210; 26 de agosto, 238.
- [20] Para una reseña reciente del fracaso del puente de Quebec, véase, p. ej., William D. Middleton, *The Bridge at Quebec*, Bloomington: Indiana University Press, 2001.
- [21] David B. Steinman y Sara Ruth Watson, *Bridges and Their Builders*, edición corregida y aumentada, Nueva York: Dover Publications, 1957, 243.
- [22] La película ha estado disponible en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Washington.
- [23] Para puentes colgantes después del de Tacoma Narrows, véase Richard Scott, *In the Wake of Tacoma: Suspension Bridges and the Quest for Aerodynamic Stability*, Reston, Virginia.: ASCE Press, 2001.
- [24] Peter R. Lewis, mensajes de correo electrónico al autor, 8-9 de agosto de 2004.



## VII. El futuro histórico

*There is not a fiercer hell than the failure in a great object.*

[No hay infierno más cruel que fracasar en el cumplimiento de un propósito.]

Keats[1]

*I was never afraid of failure; for I would sooner fail than not be among the greatest.*

[El fracaso jamás me arredró, pues antes prefiero fracasar que no contarme entre los grandes.]

Keats[2]

El diseño tiene el rostro de Jano, siempre mirando hacia atrás y hacia adelante. En el pasado, el diseño ve al mismo tiempo un mundo inspirador y sin embargo imperfecto, lleno de objetos que deben ser admirados y también mejorados. Por supuesto, el pasado es también el depósito de los fracasos absolutos, monumentos a la ignorancia, el optimismo excesivo y la hbris.

Si se le presta atención, el pasado proporciona de este modo advertencias y lecciones para diseños futuros. Si se le rehúye, aun así perseguirá al futuro, siempre acechando en las sombras del éxito. En perspectiva, el diseño ve con demasiada facilidad un mundo de perfección, uno lleno de buenas intenciones y libre de errores. Bajo ninguna circunstancia debemos esperar que esto ocurra.

Las misiones espaciales tripuladas presentan problemas de diseño enormemente complicados. En el programa del Apolo no sólo se tuvo que diseñar un *hardware* complejo en la forma de una nave espacial estructural y mecánicamente fiable, sino que se tuvo que escribir y probar el *software* que controla y guía una misión. Para alcanzar los niveles de seguridad deseados, se trabajó hasta la redundancia tanto en el *software* como en el *hardware*. Se utilizaron múltiples computadoras para revisarse entre sí y para eliminar errores al azar. Cuando el principio del sumamente fiable cohete espacial Titán, cuyas juntas estaban selladas con un solo anillo en  $\odot$  (anillo tórico), fue adaptado para el sólido cohete propulsor del transbordador espacial, se utilizó un par de anillos en  $\odot$  en cada junta. En última instancia, la presencia de un segundo anillo en  $\odot$  de refuerzo permitió que el transbordador *Challenger* estuviera listo para su lanzamiento incluso frente a la repetida evidencia de que el principal anillo en  $\odot$  no funcionaba como fue diseñado.[3]

El vuelo fatal del *Challenger* fue el vigésimo quinto de una serie, lo que demostró un índice de éxito del programa del transbordador de 96%, muy por debajo de la fiabilidad que se creía que tenía. Antes del accidente, la “probabilidad de fracaso con pérdida del vehículo y vidas humanas” se había calculado “oscilando de 1 en 100 a 1 en 100 000”, con los números más pesimistas provenientes de “ingenieros y los funcionarios menores de la dirección”.<sup>[4]</sup>

Después de una pausa obligatoria, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) reanudó las misiones del transbordador espacial con cautela contrita. Sin embargo, a finales de la década de 1990, siendo el *Challenger* un recuerdo que se desvanecía, el mantra de “más rápido, mejor, más barato” caracterizaba la cultura de la NASA (aunque astutos observadores con frecuencia han agregado “elige dos” para hacer hincapié en que la ingeniería y el diseño siempre implican desventajas). A pesar de los incidentes embarazosos asociados con el miope, aunque costoso, telescopio Hubble y las sondas espaciales que inexplicablemente chocaron o fueron pérdida total (sólo una de tres misiones a Marte tuvo éxito), la NASA se siguió forjando con confianza, si no es que con arrogancia. En 1999 sufrió una plétora de vergüenzas y fracasos, entre ellos el aterrizaje de la flota del transbordador tras el descubrimiento de cables dañados, la pérdida de la Mars Climate Orbiter debido a la confusión entre datos métricos y no métricos, más problemas con el Hubble, y la inexplicable pérdida de la Mars Polar Lander. Según Tony Spear, quien en 1997 fue jefe de proyecto de la misión Mars Pathfinder, la cual fue “financiada y provista de personal de forma adecuada”, ese y otros éxitos contemporáneos habían permitido a la NASA “ser demasiado complaciente en la planeación de proyectos futuros”. Después de “la primera ola de éxito, la barra subió por recortar costos todavía más, y llegó demasiado lejos”, según Spear.<sup>[5]</sup> Al mismo tiempo, la dirección de los programas se había “vuelto demasiado segura de sí misma y demasiado descuidada”.<sup>[6]</sup> Un analista de política caracterizó el contraste entre la filosofía de “más rápido, mejor, más barato” de la NASA y una más realista como “creación de eslóganes *versus* ingeniería”.<sup>[7]</sup>

Después de un tiempo, la NASA parecía haber retomado el camino. Pero la destrucción del *Columbia* a principios de 2003 llevó las cosas a un alto abrupto. Una vez más era claro que la agencia espacial estaba sujeta a la misma falla de memoria de las personas que envejecen. Además, así como algunos distinguidos constructores de puentes han sido culpables de hibris, también lo fueron los equipos de la NASA. Los acontecimientos que llevaron a la desintegración del transbordador espacial *Columbia* al regresar a la atmósfera constituyen otro clásico ejemplo del éxito que enmascara al fracaso. Durante la vida del programa de lanzadera espacial, se desprendió la espuma aislante del tanque de combustible externo en cada lanzamiento, y el daño que causó se ha aceptado como el costo de volar. Sin

embargo, la porción de espuma que se soltó durante el lanzamiento del *Columbia* fue la más grande que había chocado con la nave espacial, y lo hizo en una parte muy vulnerable y crítica del borde del ala izquierda. Aunque los ingenieros querían evaluar el grado de daño, los directores de la NASA rechazaron las solicitudes para emplear herramientas de espionaje para inspeccionar el orbitador en el espacio y desestimaron las inquietudes sobre su condición. “Con los años, los directores del transbordador habían tratado los escombros de cada golpe no como una evidencia de fracaso que necesitaba corrección inmediata, sino como una prueba de que el transbordador podía sobrevivir sin peligro los impactos que violaban sus especificaciones de diseño.” Con una mentalidad similar a la que el daño del anillo tórico y la erosión antes de la pérdida del *Challenger* fueron considerados poco graves como para retrasar su lanzamiento en 1986, de nuevo en el caso del *Columbia*, “una generación de directores de la NASA, envanecidos, veían la evidencia de fracaso como señales de éxito”.<sup>[8]</sup>

Tras el desastre del *Columbia*, la flota del transbordador se retiró del servicio por más de dos años. Durante ese tiempo, una junta de investigación de accidentes hizo público su reporte y la NASA trabajó para mejorar el diseño y la fiabilidad de lo que quedaba de la nave espacial, prestando especial atención a la reducción de la cantidad y el tamaño de los desechos que se pudieron liberar del tanque externo durante el despegue. La NASA se mostraba optimista de que se habían hecho grandes mejoras y que cualquier riesgo que quedara era aceptable, pero no todos estuvieron de acuerdo. En las semanas anteriores al despegue, hubo acusaciones de que la NASA había “disminuido los estándares de lo que constituye un riesgo aceptable”. Estos debates sobre la fiabilidad de una tecnología no son poco comunes, ya que tanto los defensores como los oponentes buscan una concatenación de supuestos y sus consecuencias probables pero no seguras. Después de algunos retrasos debidos a la entrevista defectuosa del combustible y las condiciones poco favorables del tiempo, el *Discovery* finalmente se lanzó en julio de 2005. Desafortunadamente, un considerable pedazo de espuma —el tipo de desecho que dañó de manera fatal al *Columbia*— se soltó durante el despegue y el incidente fue captado por el sistema de cámaras de seguimiento que se había colocado después del vuelo fatal. Afortunadamente, esta espuma no dañó al *Discovery*, pero otros problemas que pudieron haber puesto en peligro el reingreso se manejaron como un paseo sin precedentes en el espacio. Incluso con el *Discovery* todavía en órbita, y antes de que cualquier daño hubiera sido completamente evaluado, la NASA anunció que toda la flota del transbordador estaba una vez más fuera de servicio por tiempo indefinido. El *Discovery* regresó sin percances a la Tierra, por supuesto, pero el vuelo hizo evidente cómo puede existir una pequeña línea divisoria entre el éxito y el fracaso.<sup>[9]</sup>

Hay dos enfoques para cualquier problema de ingeniería o de diseño: los que se basan en el éxito y los que se basan en el fracaso. Paradójicamente, siempre es mucho más probable que los últimos tengan éxito. John Roebling, experto de la forma del puente colgante, no analizó ejemplos exitosos del estado de la técnica sino fracasos históricos para su educación y orientación. De éstos aprendió qué fuerzas y movimientos eran los enemigos de los puentes, y diseñó uno propio que resistiera esas fuerzas y eliminara esos movimientos. Este pensamiento basado en el fracaso nos dio en última instancia el puente de Brooklyn con sus emblemáticos cables diagonales, que Roebling incluyó para estabilizar la estructura contra el viento que sabía podía ser su perdición.[10]

Podría parecer lógico que basar cualquier diseño —ya sea de un producto, un monumento o un proceso comercial— en modelos exitosos le daría ventaja a los diseñadores: pueden elegir las mejores características de los diseños efectivos existentes. Desafortunadamente, con frecuencia es difícil expresar lo que hace que funcionen las cosas y todavía más difícil extraerlo del diseño como un todo. Las cosas funcionan porque trabajan en una configuración particular, en una escala en particular y en un contexto y cultura en particular. Intentar invertir la ingeniería y plagiar un sistema exitoso sacrifica la sinergia del éxito y el éxito de la sinergia.[11] De este modo, cuando los constructores de puentes en la década de 1930 siguieron los modelos efectivos que habían evolucionado desde los de Roebling, terminaron con el puente de Tacoma Narrows, en ese momento el tercer puente colgante más largo del mundo y el más largo de la historia en derrumbarse con el viento. A través de los años, en el proceso de mejorar el diseño de Roebling, los mismos cables que él incluyó para evitar el fracaso se eliminaron en aras de la economía y la estética.

Como resultado de un inesperado accidente, John Roebling murió justo antes de que comenzara la construcción del puente de Brooklyn. Tenía poco más de 60 años, y si las circunstancias hubieran sido diferentes, tal vez habría vivido para diseñar todavía otro gran puente. Es interesante especular cómo habría sido ese puente. Sus tres principales puentes colgantes fueron construidos en Niágara, Cincinnati y Brooklyn. El primero se estabilizó contra el viento no sólo con cables que se extendían desde las torres a la calzada sino con cables tensores que se extendían hacia abajo de la cubierta y a los lados del desfiladero. Por si acaso interferían con la circulación del río, los cables que estaban debajo de la cubierta no se incluyeron en los dos puentes posteriores. ¿Es concebible que pudiera haber habido una situación en la cual Roebling eliminara también los cables en algún diseño futuro, tal vez para reducir costos o para satisfacer una estética diferente? O tal vez su hijo Washington, como sucesor intelectual de su padre, ¿habría sucumbido a simplificaciones de diseño similares?

La muerte prematura del padre y la salud deteriorada del hijo hacen que la pregunta siga

siendo discutible, pero desde entonces ningún diseñador importante de puentes colgantes ha incorporado los soportes mayores de Roebling, evidentemente porque creen que son redundantes, excesivos e innecesarios tanto estructural como estéticamente. Durante un siglo, los puentes de Williamsburg y Manhattan, localizados río arriba del puente de Brooklyn, han resistido esencialmente las mismas condiciones de tiempo que éste. Pero su estabilidad en el viento ya no demuestra la inutilidad general de los cables de suspensión cuya utilidad probó el puente de Brooklyn, porque los tres puentes son al mismo tiempo similares y únicos y, por lo tanto, diferentes. Sólo a finales de la década de 1930, cuando comenzaron a construirse puentes colgantes con cubiertas mucho más delgadas y estrechas, se hizo evidente el valor de los cables. Las cubiertas de los puentes que diseñaron Othmar Ammann y David Steinman, posiblemente iguales a los de Roebling —o por lo menos casi iguales— comenzaron a ondular en el viento. Los reforzaron con rapidez con una variedad de cables suplementarios y tensados, como el puente de Tacoma Narrows. Pero incluso estas medidas no lograron evitar que con el tiempo los destruyera el viento, una reivindicación incontrovertible de los diseños superiores de Roebling.

Como se describe en el capítulo anterior, el primer puente de Tacoma Narrows fue sólo uno más en una serie histórica de grandes puentes que fallaron en el último siglo y medio. En cada caso, se presentó una inestabilidad en un tipo de puente que hasta ese entonces se había considerado un éxito digno de emular con arcos más largos y más delgados. Entre las características sobresalientes de esta colección de fracasos, además de los fracasos posteriores de las estructuras de los puentes de viga tubular de acero, está que éstos ocurren en intervalos de aproximadamente 30 años.<sup>[12]</sup> El patrón (1847, 1879, 1907, 1940, 1970) era tan sorprendente que se elaboró la hipótesis de que ocurriría la falla de un puente importante cerca del año 2000. A principios de la década de 1990 parecía que el tipo de puente que probablemente fallaría era el puente atirantado,<sup>[13]</sup> un género que se podía pensar como el que había descartado los cables del puente de Brooklyn pero conservó sus cables de suspensión. De hecho, el patrón continuó con una clase diferente de puentes, en los que el fracaso se caracterizó por el tipo de carga más que por el principio estructural involucrado.

El enfoque de un nuevo milenio fue la ocasión para, entre otras cosas, una oleada de actividad para diseñar puentes peatonales largos y distintivos, que se consideraran obras de arte así como obras de ingeniería. Muchos recibieron el nombre de Puente del Milenio, pero fue el de Londres el que captó casi toda la atención cuando tuvo que cerrarse sólo tres días después de su inauguración porque se movía demasiado una vez que las multitudes lo usaban.<sup>[14]</sup> (El fenómeno sí tuvo precedentes, y se había manifestado recientemente en un nuevo puente peatonal que cruzaba el Sena en París —el Passerelle Solferino, que se había abierto a finales de 1999—.)<sup>[15]</sup> Después de reforzarlos con amortiguadores de masa

sintonizados y otros dispositivos estabilizadores, el Puente del Milenio de Londres se reabrió en 2002. Sin embargo, es probable que el puente todavía joven sea recordado en años venideros como “el que se tambaleaba” —y como el puente que continuó con el patrón de fracasos cada 30 años—.

Los puentes atirantados siguen siendo posibles candidatos para un fracaso más espectacular, aunque tal vez no hasta el año 2030, debido a la mayor conciencia del fracaso que creó el Puente del Milenio y los problemas asociados con las vibraciones en los puentes atirantados. Aún así, se están construyendo con longitudes más allá de lo que originalmente se pensó apropiado para su tipo. Como para señalar su vulnerabilidad al viento, muchos puentes atirantados han mostrado un movimiento inesperado de cables y se han modernizado con dispositivos de amortiguación.

Los cables de acero con un diámetro de diez pulgadas en un puente que cruza el lago Dong Ting en la provincia Hunan de China se balanceaban hasta 1.20 m con vientos fuertes. En un intento por contener el movimiento de un cable representativo, se instaló un amortiguador magnetoreológico. Esta tecnología relativamente nueva explota el hecho de que un fluido que contenga partículas de hierro se endurece en la presencia de un campo magnético, reduciendo de este modo la amplitud del movimiento. Estos dispositivos son “capaces de sentir la vibración en cada cable del puente y disipan la energía antes de que ésta alcance niveles destructivos”.<sup>[16]</sup> La demostración del amortiguador funcionó tan bien en el puente del lago Dong Ting que posteriormente el centenar de cables se modernizó con amortiguadores similares.<sup>[17]</sup>

Los puentes atirantados de arco largo ahora incorporan cada vez más dispositivos de amortiguación en su diseño original. Tal es el caso del puente Sutong en China, que tendrá un arco principal de 1 097 m —casi 30% más largo que el del puente de Tacoma Narrows— y se equipará con amortiguadores magnetoreológicos. Estas medidas quizá permitan que los arcos largos resistan el viento, pero no enfrentan, para empezar, el problema subyacente de exactamente por qué vibran los cables. De hecho, esto todavía no se entiende del todo, como la aerodinámica de los arcos de los puentes colgantes en 1940.

Otro tipo de puente que parece estar evolucionando hacia el fracaso es el puente de viga tubular de concreto. Es un pariente lejano de los puentes de mediados del siglo XIX como el Britannia, a través de cuyos enormes tubos de hierro forjado corrían los ferrocarriles. Esa forma de hierro forjado resultó demasiado costosa e inapropiada por el humo que sale de las locomotoras de vapor, pero trasladando la calzada a la parte superior del puente y cambiando el material a acero, experimentó un renacimiento a mediados del siglo XX. En la década de 1960 los puentes de viga tubular de acero se construían con longitudes sin precedentes mientras los muros crecían desproporcionalmente delgados. Con cada aplicación

exitosa, la forma “demostró” que era apropiada para llevarla incluso más allá. En 1970 dos puentes de viga tubular de acero, uno en Milford Haven, Wales, y otro en Melbourne, Australia, fallaron cuando se estaban construyendo. Los tubos se habían levantado relativamente muy delgados y los muros también eran tan delgados que se doblaron.

En el caso del puente West Gate en Melbourne, la técnica de construcción que se utilizó para las secciones trapezoidales provocó primero que se doblara localmente, lo cual se corrigió aflojando la estructura del puente. El “éxito de este método llevó a su repetido uso cuando se vio que el siguiente arco no estaba alineado”, también se usaron bloques de concreto de ocho toneladas y gatos hidráulicos para desviar la sección del puente a una posición en la que se pudiera unir con su pareja. Cuando se quitaron algunos tornillos para lograr la alineación final, todo el puente se dobló y cayó sobre los trabajadores de la construcción. Según la comisión real que investigaba el fatal accidente: “Todas las características del puente West Gate se habían utilizado antes, pero no necesariamente en combinación o en una escala tan grande. La buena disposición para sobrellevar los imponderables es lo que separa a los ingenieros de los científicos, pero son los imponderables los que pueden provocar los fracasos”.<sup>[18]</sup>

Aunque los puentes de viga tubular de acero fueron condenados, los diseños contemporáneos de puentes de viga tubular de concreto no estaban sujetos de forma obvia a los mismos imponderables de placas que se doblan. A finales del siglo XX, los métodos innovadores para construir puentes de viga tubular de concreto con una longitud sin precedentes se estaban volviendo un lugar común. Por lo general se usaba un método equilibrado de construcción de puentes en ménsula, en el cual el puente se construye poco a poco de ambos lados de sus pilares hasta que los medios arcos se encuentran a la mitad. Con cada aplicación exitosa del método, los diseñadores y los constructores parecían tratarlo con mayor familiaridad y estaban animados a intentar arcos más largos con aparentemente menos y menos atención a los detalles. En 1977 se consiguió un arco récord de 240 m en un arco postensado de un puente de viga tubular de concreto construido por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército para conectar las islas de Koror y Babeldaob en Palaos, que en ese entonces formaban parte del Territorio en Fideicomiso de las Islas del Pacífico de los Estados Unidos. Para corregir los hundimientos progresivos de la estructura, se estaba modernizando con tendones postensados adicionales en 1996, cuando de repente se derrumbó.<sup>[19]</sup> Se podría decir que el puente Koror-Babeldaob continuó el patrón de fracasos de cada 30 años, pero el hecho de que siguiera de pie por casi 20 años de alguna manera lo coloca en una categoría diferente. Eso no quiere decir que no valga la pena vigilar los puentes de viga tubular de concreto más recientes.



Figura 15. Un puente de viga tubular de concreto postensado que cruza el río Kennebec en Bath, Maine, ofrece más espacio y carriles de circulación que el estrecho puente anterior, que ahora sólo soporta el paso ocasional del ferrocarril. (Fotografía de Catherine Petroski.)

El puente Clearwater Memorial Causeway de Florida se diseñó como una estructura de viga tubular de concreto, y su construcción por el equilibrado método de puente en ménsula comenzó en 2002. Un año después una sección del puente de 24 m se había asentado y doblado. Fue reconstruido, pero otras secciones experimentaron problemas de asentamiento y grietas y se tuvo que quitar y volver a construir.<sup>[20]</sup> Aunque en conjunto estos incidentes fueron vergonzosos para los diseñadores y los constructores, no se pueden considerar catastróficos. Sin embargo, parecían reforzar la impresión de que los puentes de viga tubular de concreto no eran respetados por su enorme estructura, por lo menos en Florida. Aunque el puente Clearwater no se puede considerar un fracaso total, sus problemas de construcción son verdaderas advertencias para los diseñadores y contratistas que trabajan en diseños similares. A corto plazo, es posible que esta advertencia renovada resulte en proyectos de puentes de viga tubular de concreto mejor supervisados, pero a largo plazo los caprichos de esta forma de construcción, y el precursor y las fallas menores que conlleva, podrían aceptarse como un lugar común. Tal vez sólo es una cuestión de tiempo antes de que las lecciones del puente Clearwater se olviden por completo y los límites de la estabilidad se alcancen (quizás alrededor del año 2030).

¿Por qué los fracasos más importantes de los puentes ocurrieron en intervalos de 30 años y por qué deberíamos esperar que el patrón continúe? La explicación que ofrecen Paul Sibly y Alastair Walker, los investigadores que observaron el fenómeno, es que 30 años es el tiempo que toma a una “generación” de ingenieros sustituir a otra dentro de la cultura tecnológica que comprende a éstos trabajando en un proyecto o en una sucesión de

proyectos relacionados.[21] Aunque un tipo de puente nuevo o en rápida evolución pueda ser novedoso y desafiante de diseñar para los ingenieros, uno anterior que se ha convertido en lugar común no mantiene el mismo interés o inspira el mismo respeto de una generación más joven, que lo trata como tecnología normal. Mientras los ingenieros anteriores entendían las suposiciones y los retos que implicaba el diseño básico, éste y sus carreras evolucionaron en otra dirección y perdieron contacto con él. Al mismo tiempo, los ingenieros más jóvenes, que han heredado el diseño exitoso, no desarrollaron un gran respeto o miedo por él. De este modo, en la ausencia de supervisión y orientación de quienes conocen mejor la ignorancia, suposiciones y advertencias subyacentes, la tecnología avanza y avanza sin apreciar completamente sus limitaciones o las de sus ingenieros. Se presenta “una falta de comunicación entre una generación de ingenieros y la siguiente”. [22]

Se cree que una situación similar predominó en la NASA en el momento en que se perdió el *Columbia*. Las situaciones embarazosas de 1999 ocurrieron 30 años después de la misión espectacularmente exitosa del Apolo 11 que llevó a los astronautas a la Luna y los trajo de regreso. En 2003 “se esperaba que por lo menos una cuarta parte de los científicos e ingenieros de la NASA se retirara en cinco años. Las personas de más de 60 años ya superaban en número por casi tres a uno a los que tenían 30”. [23] Y los ingenieros mayores por lo general se habían retirado de la ingeniería para ocupar cargos directivos. Un físico de Caltech caracterizó la situación como una “curva de olvido”. [24] Una institución debería recordar cómo evitar las dificultades del diseño de un proyecto grande “conservando a algunas personas en un programa desde las primeras etapas del diseño hasta el final para mantener una continuidad que no se transmitiría en reportes escritos o bases de datos en la computadora”, según un tecnólogo espacial. [25]

Los problemas no son exclusivos de los grandes proyectos civiles y aeroespaciales. El accidente de 1979 en Three Mile Island ocurrió tres décadas después de que empezara la construcción del primer reactor nuclear en tiempos de paz. El problema informático Y2K apareció tres décadas después de que se programaron los lenguajes FORTRAN y COBOL que se utilizaron mucho en la década de 1960. De hecho, muchos programadores informáticos retirados fueron llamados para conseguir expertos en un lenguaje que muchos trabajadores informáticos de la generación más joven ni siquiera habían aprendido. A finales de 1999 la habilidad tecnológica de Japón se puso en duda después de un año de accidentes embarazosos que incluían el tren bala del país, su industria nuclear y sus capacidades de lanzamiento de satélites. Según un profesor de ingeniería de la Universidad de Tokio, la situación reflejaba “una falta de responsabilidad y arrogancia de parte de los ingenieros y la industria”. La racha de fracasos marcaba el fin de 30 años de orgullo japonés, si no es que de fe ciega, en los extraordinarios logros tecnológicos del país. [26]

La investigación en la historia literaria y en la ingeniería difícilmente parecerían tener algo en común, pero el desarrollo reciente en el estudio de la literatura ha revelado patrones temporales en el surgimiento y la caída de los géneros literarios que son sorprendentemente similares a los relacionados con el éxito y el fracaso de grandes estructuras de la ingeniería como los puentes.[27] (Pero tal vez la similitud no debería ser tan sorprendente, ya que después de todo tanto los puentes como los libros son objetos diseñados.) El académico literario Franco Moretti ha aplicado métodos cuantitativos al estudio de la novela, y en el primero de una serie de tres artículos propuso que el género no ha tenido una sola mejora sino más bien que se han desarrollado, evolucionado y desaparecido diferentes formas de ésta de una manera repetitiva durante los tres siglos de su existencia.[28] De hecho, según Moretti, la popularidad de diferentes tipos de novela —picaresca, gótica, costumbrista, etc.— parece haber subido y caído en periodos de aproximadamente 30 años, indicando que existen fuerzas que trascienden cualquier movimiento o moda literaria. En cuanto a por qué aplica un ciclo de 30 años al fracaso de los estilos de la novela, Moretti propone una explicación similar a la que se dio a los fracasos de los puentes: es generacional, pero no en un sentido estrictamente biológico. Más bien la dinámica es más parecida a las revoluciones recurrentes en contra de la “ciencia normal” que Thomas Kuhn demostró tan convincentemente.[29] Moretti plantea que hay una “literatura normal”, manifiesta en un tipo de novela, que se ve remplazada a través de un proceso de desestabilización intelectual. Pero no tiene un buen modelo de por qué este “reemplazo generacional” sucede con la regularidad de más o menos 30 años.[30] La misma pregunta esencialmente permanece abierta para los fracasos de puentes, que ocurren en una atmósfera de tecnología normal.

Aunque los tipos de puente involucrados para establecer el patrón de 30 años son muy diferentes, todos evolucionaron de acuerdo con los principios generales del diseño y el papel que desempeñan el éxito y el fracaso en el proceso de diseño. Cuando algo se convierte cada vez más en un lugar común —ya sea la construcción de otro arco en un tipo familiar de puente o el lanzamiento de otro transbordador espacial en una misión de “rutina” o la escritura de otra novela en la última modalidad— existe una mayor tendencia humana a obtener confianza de cada éxito. Las imperfecciones y los problemas técnicos siempre presentes, y los pequeños fracasos, se vuelven tan familiares como para pasarlos por alto, y son pasados por alto por todos menos por los críticos más severos, cuyas críticas por lo general también se desdeñan o se desestiman. Más que verlos como precursores de una catástrofe, los pequeños fracasos son vistos nada más como defectos fastidiosos atribuibles a las imperfecciones de los objetos resistentes y nuestro conocimiento de ellos.

Incluso en la ausencia de una brecha generacional, los ingenieros y los diseñadores pueden ser susceptibles de olvidar ser humildes frente a la tecnología que es forzada hacia

sus límites (desconocidos). Robert Stephenson fue uno de los más distinguidos ingenieros de la primera etapa del ferrocarril. Sin embargo, él fue el responsable del infortunado puente Dee, que en retrospectiva empleaba el diseño de la viga de atado con una longitud de arco mayor a lo que era prudente. Stephenson había usado este tipo de construcción para muchos arcos más cortos, y el éxito de su servicio en esas aplicaciones evidentemente le dio confianza injustificada en el puente Dee, que rompió récord y se derrumbó en 1847. Después del accidente, el inspector general del Consejo de Comercio testificó que, “él estaba en contra de esta forma de entramado de hierro y prácticamente admitió que había aprobado el puente por el número de puentes aparentemente exitosos que ya se habían construido”.<sup>[31]</sup> Según el ingeniero estructural James Sutherland, que escribió siglo y medio después del incidente: “Sería un error culpar a un solo individuo por la idea falsa sobre el comportamiento de estas vigas. Éste fue un caso de miopía grupal sufrida por varios de los ingenieros más distinguidos de ese entonces”.<sup>[32]</sup>

Stephenson había sido exonerado y continuó construyendo el enorme y atrevido puente Britannia que fue un enorme éxito estructural, aunque un fracaso económico y ambiental.<sup>[33]</sup> También se había convertido en un defensor incondicional de la cobertura de fracasos, para que todos los miembros de esta profesión se pudieran beneficiar de sus lecciones. Según Stephenson, quien tenía el cargo de presidente tanto de la Institución de Ingenieros Mecánicos como de la Institución de Ingenieros Civiles: “Los antiguos ingenieros derivaron su tan útil experiencia de las observaciones de las desgracias que le habían sucedido a su trabajo y al de otros, y fue muy importante que se hayan registrado fielmente en los archivos de la institución”.<sup>[34]</sup> De este modo, los ingenieros podrían obtener la ventaja de la experiencia, incluso sin haberla tenido directamente. En efecto, de manera indirecta podrían estar de acuerdo con el distinguido biólogo inglés T. H. Huxley, quien afirmó que: “Existe el gran beneficio práctico de cometer algunos fracasos en los primeros años de vida”.<sup>[35]</sup>

Thomas Bouch tuvo mucho éxito en los inicios de su carrera. Siendo un ingeniero maduro, creía que los puentes ferroviarios existentes estaban excesivamente diseñados, y produjo el puente Tay, que cuando se inauguró en 1878 se veía destartalado y estaba destartalado, pues se derrumbó un año después. Theodore Cooper coronaría una distinguida carrera en el diseño y análisis de puentes con el puente de Quebec, que sería el puente en ménsula más largo del mundo. Desafortunadamente, el fracaso de Cooper al insistir en la supervisión adecuada de los ingenieros con poca experiencia, que eran responsables del diseño y la construcción de la estructura, contribuyó a su derrumbe cuando aún se encontraba en construcción, en 1907. Incluso David Steinman y Othmar Ammann, rivales que por separado habían acumulado récords distinguidos como constructores de puentes de talla mundial, llegaron a grandes alturas a finales de la década de 1930 al diseñar puentes

colgantes con calzadas demasiado delgadas. Las calzadas insuficientemente resistentes de sus puentes de Deer Isle y Bronx-Whitestone, respectivamente, se agitaron con el viento en un movimiento ondulatorio que exigió la revisión de los cables suplementarios. En su tiempo cada uno de estos ingenieros podría haber sido acusado de hbris, esa arrogancia que surge cuando se aprenden las curvas de la meseta mientras la curva de la ambición sigue creciendo. El resultado son diseños más largos, más ligeros y más delgados que surgen de la admiración del éxito más que del respeto absoluto al fracaso.[36]

El problema de la hbris y la autocomplacencia en el diseño no era nada nuevo en los siglos XIX y XX y desde entonces no ha desaparecido. Algunos años después del derrumbe del puente de Quebec y mucho antes del de Tacoma Narrows, el ingeniero consultor John A. L. Waddell, cuyo enciclopédico *Bridge Engineering* se publicó en 1916,[37] defendía la “revisión independiente de los planos y las especificaciones de todas las obras importantes de ingeniería por expertos que no tuvieron nada que ver en su preparación”. [38] Escribiendo para *Engineering News-Record* en 1917, Waddell afirmó que,

Si esta revisión independiente de planos se practicara, grandes desastres [...] se podrían evitar. Le daría más fuerza a estas demandas de que fuera posible ofrecer una lista de los fracasos más importantes de las obras de ingeniería que han ocurrido durante las últimas tres décadas; pero hacerlo despertaría animadversiones y ocasionaría resentimientos, que es algo que se debe evitar siempre que sea posible.

[...] Está dentro del reino de lo posible que a la primera pueda haber objeciones en contra de la innovación que se sugiere por parte de algunos ingenieros que diseñan, ya que pueden sentir que es una invasión a sus derechos y privilegios, que es una ofensa a su dignidad y un insulto a su *amour propre*. [39]

Sibly hizo una recomendación sorprendentemente similar al final de su disertación sobre defectos estructurales.[40] Al mismo tiempo, igual que Waddell, reconoció que el costo de la revisión independiente podía ser significativo. Sin embargo, Waddell consideraba que el costo era “una bagatela comparada con las economías efectuadas con el ahorro de gastos” de los fracasos y la pérdida de vidas humanas que conllevan. También reconoció que se puede crear una fricción entre el revisor y el revisado, pero consideró que es un precio pequeño que pagar por la “seguridad contra el desastre” que implicaría. Como sentía que era “casi inconcebible que dos ingenieros, o dos conjuntos de ingenieros, trabajaran de manera completamente independiente uno del otro, se cometería el mismo error”. [41]

Pero en general las recomendaciones de Waddell siguieron sin formalizarse, por lo menos en los Estados Unidos, e incluso cuando la revisión independiente se llevara a cabo no tendría necesariamente el efecto deseado. Para conseguir fondos federales era necesario que un ingeniero consultor revisara el diseño del puente de Tacoma Narrows. Sin embargo, la seguridad que tenía Leon Moisseiff sobre el diseño del puente colgante y su posición como teórico destacado de la forma le permitió rebatir con éxito el reporte de Theodore L. Condron, ingeniero consultivo para la Corporación de Reconstrucción Financiera, de que

por su longitud era poco aconsejable lo estrecho del puente de Tacoma Narrows.[42] Como Moisseiff había estado participando en tantos proyectos exitosos, parecía que no estaba preparado para reconocer un fracaso potencial en uno de sus diseños.

En los últimos dos siglos, los puentes colgantes han sido especial y repetidamente propensos al fracaso parcial y total, pero no obstante la forma ha persistido. El ingeniero estructural Sir Alfred Pugsley, que trabajó tanto en estructuras aeronáuticas como civiles, una vez “observó que casi uno de 14 puentes colgantes había fallado dentro de su esperado lapso de vida normal”. [43] Eso ascendió a una fiabilidad asombrosamente baja de tan sólo casi 93%. Todo había mejorado considerablemente desde la inspección de Pugsley. Mientras tanto, se siguen construyendo arcos siempre más largos en los puentes colgantes, con el récord de principios del siglo XXI de un arco de más del doble de largo del de 854 m del puente de Tacoma Narrows. Por otro lado, el puente en ménsula, el tipo de puente que alguna vez se presentó como una alternativa a los colgantes para prácticamente cualquier longitud de arco propuesta, ha estado limitado por casi un siglo por el rediseñado y reconstruido puente de Quebec de 548 m. ¿Por qué este trato contradictorio al puente en ménsula y al puente colgante, si la persistencia de este último parece contradecir la regla general de que un derrumbe catastrófico marca el final de un género?

La respuesta parece residir en parte en el hecho de que el puente colgante moderno, que data de los primeros años del siglo XIX, tuvo una historia mucho más larga que el puente en ménsula moderno. La forma en ménsula se volvió popular en la década de 1880, en especial por el puente de Forth, sólo dos décadas antes de la tragedia de Quebec, que se explicó con algo tan simple como que el puente era demasiado pesado para soportarse a sí mismo. A continuación tuvieron lugar ambiciosos programas experimentales para probar la capacidad de enormes vigas de acero para resistir grandes fuerzas de compresión, pero estas búsquedas de conocimiento parecían ciencia difícilmente moderna. Después de todo, las grandes estructuras estacionarias de compresión en la forma de pirámides y columnas de piedra habían existido desde la Antigüedad. Aunque el puente colgante moderno sufrió desde sus primeros días numerosos fracasos en sus calzadas, las razones que se dieron fueron reiteradamente la acción misteriosa y dinámica de soldados marchando, las ráfagas del viento y otras similares, fenómenos que se prestaban a una discusión teórica si no a un análisis definitivo. Los avances en la teoría del comportamiento del puente colgante, aunque bajo condiciones estacionarias, proporcionaron una amplia justificación para forzar la forma hacia el reino de los ejemplos siempre más largos y más delgados.

Inmediatamente después del derrumbe del puente de Tacoma Narrows, se hizo evidente que el análisis sólido si bien fenomenológico de Roebling elaborado un siglo antes [44] había sido en gran parte olvidado medio siglo después de que se terminó el puente de Brooklyn

como “un triunfo de la ingeniería intuitiva”.<sup>[45]</sup> La denominada teoría de la deflexión que Moisseiff promovió y usó desde principios del siglo XX<sup>[46]</sup> había demostrado claramente que era un sucesor insuficiente. Pero un análisis más complejo, que incorpora la aerodinámica de mediados del siglo XX, ofreció una amplia justificación para continuar la construcción de puentes colgantes después de la pausa que coincidió con la guerra.<sup>[47]</sup> Además, se siguieron levantando puentes colgantes más largos que el de Tacoma Narrows, ofreciendo evidencia incontrovertible de que no era el tamaño absoluto, sino la proporción relativa, lo que hizo que se viniera abajo. Finalmente, con la reducción del puente en ménsula, no había alternativa al puente colgante para cruzar en un solo arco las largas distancias que aún se tenían que abarcar.

Conforme evolucionaron los diseños de puentes hacia arcos más largos y más flexibles, los diseños de construcción lo hicieron hacia torres más altas y más flexibles. Aunque el movimiento no deseado de los edificios altos parece haberse solucionado, puede existir alguna razón para preocuparse por la creciente dependencia de los amortiguadores de masa sintonizados y los péndulos para alcanzar este fin. (Cada vez se confía más en amortiguadores de diferente tipos para mitigar los efectos de los terremotos; se utilizan en más de 150 estructuras en los Estados Unidos y más de 2 000 en Japón, donde se exige que se incorporen en “toda construcción importante”).<sup>[48]</sup> Aun así, los rascacielos parecen estar evolucionando de maneras afines a la evolución de los puentes colgantes en la década de 1930. Los edificios superaltos cada vez más elevados y más delgados han sido diseñados tomando en cuenta al viento pero no necesariamente con el debido respeto a éste. Por analogía con los puentes, la respuesta de edificios siempre más delgados y flexibles al viento se está arreglando con parches *ad hoc* en vez de hacerlo con la eliminación del efecto. Los diseñadores de puentes no expresaron una gran urgencia cuando un puente nuevo tras otro se movía de forma imprevista con el viento. Los cables modernizados se usaban para revisar los movimientos mientras se estudiaba el problema, pero mientras tanto se continuaban diseñando y construyendo puentes más delgados siguiendo el paradigma imperante, que no incluía ninguna consideración a la aerodinámica.

Los edificios altos, por lo menos en el Este, se están diseñando en un clima análogo de autocomplacencia. La incorporación de dispositivos de amortiguación es un reconocimiento de que la estructura subyacente no puede controlar los efectos del viento sin ayuda. Se espera que se aproveche al máximo la capacidad de los dispositivos de amortiguación. Sin embargo, estos dispositivos tienen sus propias limitaciones y vulnerabilidades. Tienen partes móviles, que son susceptibles de desarrollar grietas y defectos, posiblemente en un momento inoportuno. También están sujetos a ser inhabilitados, tal vez por alguna persona mal intencionada, haciendo que resulten ineficaces. Sin embargo, lo más importante es que los

límites de eficacia de estos dispositivos pueden estar en un modo inesperado de vibración del edificio para el cual el amortiguador no está sintonizado. La lección esencial del puente de Tacoma Narrows no es que se cayera sino que esto ocurrió en una atmósfera de confianza indeseable y de una manera que no se anticipó. Forzar constantemente los límites de la experiencia de cualquier tecnología es peligroso. Se hace de manera responsable subiendo un solo escalón a la vez, vigilando realmente después de cada uno si lo que se tambalea en el escalón no se está saliendo de control.

El derrumbe de un rascacielos fue material de ficción y de películas de drama antes de que el World Trade Center se derrumbara en 2001.[49] En su novela de 1984 *Skyscraper*, Robert Byrne creó un edificio ficticio cuyos defectos causaron su derrumbe. (Desde el descubrimiento de la vulnerabilidad al viento de la torre de Citicorp y las medidas que se tomaron para reducirla, que ocurrió durante una prolongada huelga de los periódicos en la ciudad de Nueva York, su historia no se dio a conocer hasta que fue el tema de un artículo de una revista neoyorquina en 1995.)[50] A principios de la década de 1990 se creía que la idea de que algo así le pudiera suceder a un edificio real era literalmente material de ficción. La descabellada idea de que un rascacielos real en una ciudad real se pudiera caer incluso se reafirmó después del fallido intento terrorista de 1993: el camión bomba que usaron para el ataque detonó en el estacionamiento que estaba debajo del World Trade Center y no logró su propósito. Aunque varios pisos del estacionamiento del sótano fueron destruidos, las enormes columnas que sostenían la torre norte quedaron intactas. Que las torres hayan soportado con éxito un ataque como éste se tomó como evidencia de su fuerza y estabilidad. Recuerdo que cuando visité el World Trade Center después de ese ataque, me llamó la atención el evidente aumento de las medidas de seguridad. Éstas incluían la prohibición de estacionarse debajo de los edificios y un banco con servicio de barra en el lobby que se abrió para despejar a los visitantes antes de que pasaran a los elevadores. (Por supuesto, no incluían una defensa contra los aviones usados como armas.) Lo que también recuerdo de esa visita a mediados de la década de 1990 fue no tener el más ligero miedo de que los enormes edificios pudieran derrumbarse.

Sospecho que antes del 11 de septiembre de 2001, pocos oficinistas de Nueva York o visitantes del World Trade Center o de cualquier otro edificio superalto tenían miedo desmedido de su derrumbe. Incluso la idea de un incendio en un rascacielos no era especialmente inquietante. Después de todo, los incendios que habían ocurrido en oficinas altas por lo general se habían limitado a un piso o dos y se apagaron o estuvieron bajo control sin un daño estructural significativo.[51] Si había algún lugar del cual preocuparse por un incendio catastrófico, era un gran hotel y no un alto edificio de oficinas. Las muchas vidas que se perdieron en el incendio del MGM Grand Hotel en 1980 fueron la tragedia de un

casino en la lejana y frívola ciudad de Las Vegas, no de una torre de oficinas cerca de varios hogares y la formal ciudad de Nueva York.[52]

El ataque terrorista de 2001 cambió irrevocablemente esa percepción. Aunque las personas atrapadas en los pisos superiores que sufrieron el impacto buscaron en vano rutas de escape que ya no estaban ahí y padecieron el destino inimaginable de estar atrapadas a más de 305 m de altura de la calle, los que se hallaban en los pisos inferiores en general experimentaron una considerable confusión pero evidentemente no se dejaron llevar por el pánico. Tampoco lo hicieron los empleados de reacción a urgencias, la policía y los bomberos, quienes entraron con valor a la estructura dañada y subieron con velocidad las escaleras por las que otros bajaban corriendo. Según la mayoría de los informes, había orden en medio de la confusión y eran pocos los que parecían temer que el derrumbe de los edificios fuera inminente. Recordar el incidente en que las Torres Gemelas habían resistido con éxito el ataque del camión bomba sólo pudo haber reforzado esa confianza. En la actualidad, por supuesto, lo inimaginable es vívidamente imaginable. No se puede culpar a nadie de tener un miedo irracional a que un rascacielos se derrumbe simplemente porque eso no sucede. El contraejemplo del World Trade Center anula de inmediato cualquier argumento en contrario. El fracaso es el antídoto más efectivo para la creencia desmedida en el éxito.

Otro ejemplo de tecnología forzada más allá de sus límites implica al ex arquitecto en jefe de los aeropuertos de París, Paul Andreu, “quien lleva la ingeniería al máximo para alcanzar sus objetivos estéticos” y “admite tener poco interés en moldear diseños de pureza estructural”. Tiene la reputación “de ejercer dominio sobre el equipo de diseño”. [53] Como arquitecto en jefe, Andreu supervisó la expansión del aeropuerto Charles de Gaulle, lo cual implicó diseñar y construir “terminales cada vez más novedosas”. La Terminal 2E fue su último proyecto antes de retirarse del servicio civil y embarcarse en la segunda carrera de diseñar “terminales futuristas en los aeropuertos alrededor del mundo desde Abu Dhabi hasta Singapur”. La estructura de París era sensacional: una explanada elíptica parecida a un túnel de 30 m de ancho y 640 m de largo sin columnas que dificulten el movimiento de los pasajeros o les bloqueen la vista. La construcción de la terminal de concreto y cristal estaba apoyada en pilones y esto la elevaba del piso para que los vehículos de servicio del aeropuerto pudieran pasar por debajo. El enorme espacio abierto del interior y la curva aplanada del exterior lograron una construcción arquitectónicamente sorprendente. Por desgracia, la arquitectura no sostiene estructuras por sí sola. Casi un año después de que se inaugurara la progresista terminal, una sección de 30 m se derrumbó inadvertidamente, matando a cuatro pasajeros que no escaparon a tiempo.[54] La causa del fracaso no fue aparente de inmediato, pero los indicios preliminares eran que pudo haberle faltado algo de

acero de refuerzo al concreto, lo cual era crítico para el atrevido diseño arquitectónico.[55]

Después de un estudio más riguroso del fracaso, un equipo designado por el gobierno encontró que el proceso de diseño en conjunto era una falla. Los modelos empleados para predecir el comportamiento de la compleja estructura tridimensional eran demasiado sencillos para captar en detalle y predecir con exactitud cómo funcionaría la estructura real. Ya que había sido clasificada como edificio, más que como la estructura de ingeniería civil de un puente, en Francia no existía el requisito de que el diseño fuera revisado por un igual. Se creía que el fracaso, que ocurrió donde se inauguraba un puente peatonal a un costado de la estructura, se debía a la presión excesiva en algunos de los puntales o a la fractura de una viga opuesta a la entrada. Incluso la forma en la que la luz del sol pegaba en la estructura puede haber jugado un papel importante, calentando y por lo tanto expandiendo un lado con respecto al otro. Un miembro del equipo que analizaba el fracaso indicó que si se culpaba al arquitecto Andreu, sería por pensar que la estructura “no era tan difícil de controlar”. Un factor que tal vez también contribuyó había sido el presupuesto ajustado, que no permitió que se gastara el dinero suficiente en los diseñadores estructurales “muy, muy inteligentes” que exigía el complejo proyecto. *Engineering News-Record*, generalizando la situación, condenó a un sistema en el cual “los contratistas de todas las tallas, aparentemente adictos a márgenes bajos y un volumen alto, viven al filo de la navaja del éxito o el fracaso en cada proyecto”. [56]

Andreu, “quien tal vez más que ningún otro ha establecido el estándar de cómo diseñar las terminales de los aeropuertos”, [57] ha querido “demostrar que su ámbito iba más allá de los aeropuertos” [58] y ser conocido como algo más que un arquitecto de aeropuertos. Se le ha descrito como “uno de los arquitectos extranjeros más prolíficos en China”, habiendo sido el encargado de un estadio en Guangzhou, la sensacional Shanghai Opera House y el más reciente Gran Teatro Nacional de Beijing. Se ha hecho referencia a esta estructura de titanio y cristal, cuya figura se parece a la que toma un globo lleno de agua colocado en una superficie dura, como “burbuja de cristal”, como un “huevo fosforescente flotando en un mar de cristal”, y, cuando se cubre con el polvo del desierto, como “estiércol seco”. Después del derrumbe de la terminal del aeropuerto de París, el edificio del teatro nacional fue blanco de varios ataques, no sólo en el terreno estético y económico sino también por posible corrupción política al habersele concedido la comisión y por el riesgo de la seguridad visto en la entrada submarina. [59]

Los arquitectos e ingenieros atrevidos siempre han caminado sobre una línea muy delgada entre el éxito y el fracaso y aceptado los riesgos que esto conlleva. A pesar de los fracasos que han experimentado en sus carreras, Robert Stephenson e Isambard Kingdom Brunel siguen siendo sumamente estimados en el panteón de los grandes ingenieros

victorianos. Los puentes ondulantes de David Steinman y Othmar Ammann fueron más o menos olvidados entre las grandes obras maestras de acero a las que contribuyeron antes y después de aquellas situaciones embarazosas. Thomas Bouch y Theodore Cooper, por otro lado, habían tenido sólo un cuerpo de trabajo peatonal para compensar sus equivocados diseños finales y atrevidos de puentes, y por lo tanto su reputación no se encontraba tan bien. Después del derrumbe del puente de Tacoma Narrows, hubo un intento de sus colegas por proteger la reputación de Leon Moisseiff, quien como consultor con un perfil generalmente bajo era el ingeniero de un ingeniero tanto literal como metafóricamente. Sin embargo, en última instancia pocos diseños de puentes estuvieron conectados de una manera tan directa con su nombre como el de Tacoma Narrows.[60]

Tras el derrumbe de la terminal del aeropuerto de París, *Engineering News-Record*, editorializando sobre la industria de la construcción, advirtió que no se retiraran los diseños atrevidos:

A diferencia del sector manufacturero en el que las fábricas a menudo producen millones o más aparatos que son exactamente iguales, la maldición y la alegría de la construcción es que prácticamente cada proyecto es único —hecho para cubrir las necesidades del cliente y ajustarse a las condiciones locales—.

A algunos clientes les gusta empujar la envoltura de los logros anteriores, y probablemente algunos en la industria no mienten cuando dicen que pueden diseñar y construir lo que sea, con el tiempo y el dinero suficientes. Y por lo general es la falta de esos dos elementos lo que ocasiona que los proyectos se estropeen...

No hay razón por la que los propietarios no deban caminar en el lado salvaje del diseño. Así es como avanza la industria. Pero sin correr, sólo para estar seguros.[61]

Los diseños estructurales atrevidos no sólo son buenos para la industria. Sin las preferencias de Paul Andreu y los imaginativos e innovadores arquitectos e ingenieros de todo tipo, nuestro ambiente construido sería estéril. En el peor de los casos imaginables de conservadurismo excesivo, nuestras ciudades estarían construidas con estructuras idénticas, que desalentarían la individualidad de las personas que las habitan. Pero nadie quiere tener que preocuparse porque terminales poco comunes en los aeropuertos, túneles, puentes, rascacielos y otros monumentos atrevidos se derrumben sobre ellos o a su alrededor. Y por lo general no nos preocupamos. Los fracasos catastróficos de estructuras y sistemas son tan raros que precisamente por eso se vuelven noticia.

Sir Alfred Pugsley escribió que: “Es poco probable que una profesión que nunca tiene accidentes esté sirviendo a su país de manera eficiente”.[62] Esto no quiere decir que los ingenieros deban ser displicentes con la seguridad, sino que deben reconocer que aumentar la fiabilidad tiene un precio. Dado que el costo de proyectos como un programa espacial tripulado o una estructura monumental está determinado no sólo por objetivos técnicos sino económicos y de política pública, la realidad de los conflictos y los sacrificios siempre está presente. El riesgo y el progreso van de la mano. Los astronautas saben y aceptan esto, igual

que los pilotos de prueba y los militares. Los aviones de combate se pueden hacer menos susceptibles de defecto estructural, pero a costa de su peso y maniobrabilidad, lo cual aumentaría el riesgo en situaciones de combate. El riesgo y la recompensa son términos relativos.

El derrumbe del puente Dee en 1847 llevó al nombramiento de una comisión real para estudiar el uso del hierro en los puentes ferroviarios. El informe finalizó:

En conclusión, considerando que la atención de los ingenieros ha sido suficientemente atraída hacia la necesidad de proporcionar una fuerza superabundante en las estructuras ferroviarias, y también considerando la gran importancia de dejar la genialidad de los científicos sin restricciones para el desarrollo de un tema todavía tan novedoso y progresivo con tanta rapidez como la construcción de ferrocarriles, somos de la opinión de que cualquier promulgación legislativa con respecto a las formas y proporciones de las estructuras de hierro utilizadas sería sumamente inconveniente.[63]

Existe la tendencia a imponer restricciones después de fracasos sumamente evidentes y trágicos, pero tratar de legislar arreglos tecnológicos no es siempre la política pública más efectiva para la sociedad como un todo. Debido a que las tejas de los techos resistieron durante el huracán Andrew, que devastó el sur de Florida en 1992, posteriormente muchos desarrollos residenciales exigieron su uso en la nueva construcción. Sin embargo, el mismo tipo de techos experimentó fracasos generalizados durante el huracán Charley, cuyos vientos “enviaron las tejas como misiles a los vecinos”. [64] El éxito pasado no es garantía de éxito futuro.

Desde el 11 de septiembre de 2001 ha habido un interés comprensible en reescribir los códigos de construcción de la ciudad de Nueva York [65] y mitigar los efectos de un incendio en edificios altos. [66] Sin embargo, exigir que todos los rascacielos sean diseñados para poder soportar el tipo de ataques que sufrieron las torres del World Trade Center aquel día puede traducirse en estructuras demasiado costosas de construir. Los rascacielos siempre serán vulnerables a agresiones extremas. El fácil acceso para combatir el fuego y la protección mejorada contra el fuego, además de incorporar rutas de escape más efectivas en los diseños, son objetivos razonablemente alcanzables, pero no enfrentan la cuestión fundamental de si los arrendatarios, oficinistas y visitantes considerarían seguros estos edificios. Es probable que en el futuro previsible de los Estados Unidos, por lo menos, los rascacielos sumamente visibles por lo general serán rechazados a favor de edificios más modestos o de poca altura en parques industriales sin ninguna característica distintiva. Los trabajadores posiblemente votarán por sus preferencias de empleo, lo cual reflejará su sentido de seguridad.

Si el objetivo de la política pública es preocuparse por igual por todos los ciudadanos, entonces un gobierno responsable no presta atención excesiva a los acontecimientos que tienen una probabilidad sumamente baja de suceder. No son las estructuras y máquinas atrevidas y extraordinarias las que nos deberían preocupar sino las rutinarias y ordinarias. En

los Estados Unidos, en un año decenas de miles de personas son heridas y mueren en accidentes automovilísticos más que en accidentes aéreos. Mueren 20 veces más en incendios en viviendas de una o dos familias que en estructuras no residenciales de cualquier tipo.[67] Y se ha estimado que “180 000 personas mueren cada año en parte como resultado de heridas iatrogénicas [es decir, producidas por el médico], el equivalente a tres accidentes de aviones jumbo cada dos días”. Otro estudio informó que se descubrió que había “98 000 muertes que se podían evitar al año que [...] pueden ser causadas por los errores de doctores, enfermeras y demás personal del hospital”.[68] Un estudio de errores en una unidad de cuidado intensivo encontró que ocurrían en un índice de casi una de cada cien “actividades”. Aunque los trabajadores médicos pueden afirmar que: “Dada la compleja naturaleza de la práctica médica y la multitud de intervenciones que cada paciente recibe, tal vez no sea sorprendente un índice alto de error”, eso es algo que no toleramos fuera del hospital. De hecho, aunque un índice de fracaso de 1% puede sonar bajo, el correspondiente 99% del índice de fiabilidad está muy por debajo de lo que esperamos de otras actividades diarias. Según un observador, “Si tuviéramos que vivir con 99.9% tendríamos: dos aterrizajes peligrosos de avión al día en el Aeropuerto Internacional O’Hare, 16 000 piezas de correo perdido cada hora, 32 000 cheques bancarios descontados de la cuenta de banco equivocada cada hora”.[69] Mientras la tecnología puede estar y por lo general está sorprendentemente libre de errores y fracasos, no existen absolutos en la ingeniería ni en el diseño: “Los sistemas que se basan en el rendimiento libre de errores están condenados a fracasar”.[70] Los ataques terroristas pueden ser un problema grave del siglo XXI, pero no deberíamos pasar por alto los riesgos crónicos que existen en las actividades y situaciones diarias.

El buen diseño siempre toma en cuenta el fracaso y lucha por minimizarlo. Pero los diseñadores antes que nada son seres humanos y como tales están sujetos individual y colectivamente a todos los defectos de la especie, incluyendo la autocomplacencia, el exceso de confianza y el optimismo injustificado. Dados los defectos de la naturaleza humana, asociados con la complejidad del diseño de todo, desde conferencias hasta puentes, nos corresponde a todos tener cuidado con el atractivo del éxito y escuchar las lecciones del fracaso.

---

[1] *Endymion*, prefacio. Cita tomada de *Bartlett*, 16ª ed., 414.

[2] Carta a James Hessey, 8 de octubre de 1818. Cita tomada de *Bartlett*, 16ª ed., 418.

[3] Diane Vaughan, *The Challenger Launch Decision: Risky Technology, Culture, and Deviance at NASA*, Chicago: University

of Chicago Press, 1996, cap. 3.

- [4] Richard Feynman, citado en *ibid.*, 274.
- [5] Citado en Warren E. Leary, “Debating the Real Price of Space Bargains”, *New York Times*, 9 de mayo de 2000, F3.
- [6] James Oberg, “Why the Mars Probe Went Off Course”, *IEEE Spectrum*, diciembre de 1999, 34.
- [7] Liam P. Sarsfield, citado en *ibid.*
- [8] Robert Lee Hotz, “Butterfly on a Bullet: Firing Point-Blank at NASA’s Illusions”, *Los Angeles Times*, 25 de diciembre de 2003, A-1. Para antecedentes, véase Vaughan, *Challenger Launch Decision*.
- [9] Véase, entre innumerables reportes de periódico, Warren E. Leary, “The Old Shuttle, New Again”, *New York Times*, 12 de julio de 2005, F1, F4-F5; John Schwartz, “NASA Is Said to Loosen Risk Standards for Shuttle”, 22 de abril, A1, A21; John Schwartz y Warren E. Leary, “Shuttle Repairs to Be Tried in Spacewalk”, 2 de agosto, A1, A19; John Schwartz y Warren E. Leary, “Shuttle Glides to Safe Landing; Problems Ahead”, 10 de agosto, A1, A16
- [10] Véase John A. Roebling, “Remarks on Suspension Bridges, and on the Comparative Merits of Cable and Chain Bridges”, *American Railroad Journal, and Mechanics’ Magazine* n.s., 6 (1841), 193-196.
- [11] Parte de este material, de una forma ligeramente diferente, apareció primero en Henry Petroski, “Look First to Failure”, *Harvard Business Review*, octubre de 2004, 18-20.
- [12] P. G. Sibly y A. C. Walker, “Structural Accidents and Their Causes”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, parte 1, 62 (1977), 191-208.
- [13] Henry Petroski, “Predicting Disaster”, *American Scientist*, marzo-abril de 1993, 110-113.
- [14] Millennium Bridge Trust, *Blade of Light*.
- [15] Mary Blume, “Pont Solferino: Water under a Troubled Bridge”, *International Herald Tribune*, en <http://www.iht.com/IHT/MB/00/mb072900.html>.
- [16] Véase, p. ej., “World’s Longest Cable-Stayed Bridge to Be Built in China”, *Structural Engineer*, mayo de 2004, 11.
- [17] Terry Stephens, “Special Dampers May Shake Up Engineering Field”, 20 de noviembre de 2003, en <http://www.djc.com/news/ae/11151055.html>.
- [18] Citado en Schlager, ed., *When Technology Fails*, 210.
- [19] Véase p. ej., “Palau Files Suit in Bridge Collapse”, *Civil Engineering*, julio de 1997, 12-13.
- [20] Bridget McCrea, “Florida Crossing Work Halts as Contractor Faces Heat”, *Engineering News-Record*, 21 de junio de 2004, 19-20.
- [21] Aunque cada año “nacen” nuevos seguidores (graduados de la universidad) eso no significa que una nueva generación de ingenieros se sume a una “familia” tecnológica en particular con la misma velocidad. Cuando un sector de una industria crece con rapidez, tiende a contratar nuevos ingenieros (jóvenes) a un ritmo igualmente rápido que el de los niveles del negocio. En tiempos difíciles, toda una industria puede dejar de contratar por un periodo prolongado, quedándose con una población de ingenieros que envejecen y sin sustituir por jóvenes a quienes se retiran. Sólo cuando el negocio se levanta se reanudan las contrataciones. Como resultado, se puede desarrollar una “brecha generacional” entre los ingenieros con experiencia y los inexpertos. Un observador notó en 1981 que “todos en el departamento de Investigación y Desarrollo” de la industria petrolera “estaban por debajo de los 30 años o sobrepasaban los 50” (Alex Pavlak, correo electrónico al autor, 7 de agosto de 2005).
- [22] Sibly y Walker, “Structural Accidents”, 208. Cuando la revista *Mechanical Engineering* preguntó a sus lectores cómo se transmitía en su compañía “el conocimiento de los ingenieros mayores a los colegas más jóvenes”, las respuestas revelaron que casi la cuarta parte no tenía “la expectativa cultural inherente” de que eso sucediera. Aproximadamente cuatro de 10 ingenieros informó que lo hace de manera informal, “sobre la marcha”. Sólo 13% de quienes respondieron señalaron que su compañía cuenta con un tiempo para hacerlo “de vez en cuando en juntas con el personal”, y sólo 22% dijo que contaban con “pautas y/o tutoriales”. Véase *Mechanical Engineering*, enero de 2005, 10; véase también <http://www.memagazine.org>.
- [23] Robert Lee Hotz, “Butterfly on a Bullet: The Fate of a Wing Shaped by Politics”, *Los Angeles Times*, 24 de diciembre de 2003, A-1. Todas las entregas de esta serie en seis partes aparecieron bajo el mismo título, pero con diferentes subtítulos,

- el 21, 22, 23, 24, 25 y 26 de diciembre de 2003, comenzando todos en p. A-1.
- [24] Paul Dimotakis, citado en *ibid.*, 24 de diciembre.
- [25] Ed Friedman, citado en Leary, “Debating the Real Price”.
- [26] Calvin Sims, “Angst at Japan Inc.”, *New York Times*, 3 de diciembre de 1999, C1, C6.
- [27] Parte de este material apareció primero, de una forma ligeramente diferente, en Henry Petroski, “Past and Future Failures”, *American Scientist*, noviembre-diciembre de 2004, 500-504.
- [28] Franco Moretti, “Graphs, Maps, Trees: Abstract Models for Literary History—1”, *New Left Review* 24 (2003), 67-93. Véase también Emily Eakin, “Studying Literature by the Numbers”, *New York Times*, 10 de enero de 2004, B9.
- [29] Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago: University of Chicago Press, 1962. [Versión en español: *La estructura de las revoluciones científicas*, 3ª ed., FCE, México, 2006.]
- [30] Moretti, “Graphs, Maps, Trees”.
- [31] Citado en Sutherland, “Iron Railway Bridges”, 313.
- [32] Citado en *ibid.*, 315.
- [33] Sobre el fracaso del puente Britannia, véase Henry Petroski, *Design Paradigms: Case Histories of Error and Judgment in Engineering*, Cambridge: Cambridge University Press, 1994, cap. 7.
- [34] Citado en R. R. Whyte, ed., *Engineering Progress through Trouble*, Londres: Institution of Mechanical Engineers, 1975, v.
- [35] En *On Medical Education*. Cita tomada de Bartlett, 13ª ed.
- [36] Véase, p. ej., Petroski, *Design Paradigms*.
- [37] J. A. L. Waddell, *Bridge Engineering*, 2 vols., Nueva York: Wiley, 1916.
- [38] “Why Not Have All Designs Checked by Outside Experts?” *Engineering News-Record*, 22 de noviembre de 1917, 979-980.
- [39] J. A. L. Waddell, citado en *ibid.*
- [40] Paul Sibly, “The Prediction of Structural Failures”, tesis de doctorado, Universidad de Londres, 1977.
- [41] Citado en “Why Not Have All Designs Checked”, 980.
- [42] Véase, p. ej., Henry Petroski, *Engineers of Dreams: Great Bridge Builders and the Spanning of America*, Nueva York: Knopf, 1995, 296-300.
- [43] P. S. Bulson, J. B. Caldwell y R. T. Severn, eds., *Engineering Structures: Developments in the Twentieth Century: A Collection of Essays to Mark the Eightieth Birthday of Sir Alfred Pugsley*, Bristol: University of Bristol Press, 1983.
- [44] Roebling, “Remarks on Suspension Bridges”.
- [45] Pugsley, *Theory of Suspension Bridges*, 6.
- [46] Véase, p. ej., Leon S. Moisseiff y Frederick Lienhard, “Suspension Bridges under the Action of Lateral Forces”, *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 98 (1933), 1080-1095.
- [47] *Ibid.*, 1-10. Véase también David B. Steinman, “Suspension Bridges The Aerodynamic Problem and Its Solution”, *American Scientist*, julio de 1954, 397-438, 460.
- [48] H. Kit Miyamoto y Robert D. Hanson, “Seismic Dampers: State of the Applications”, *Structure*, julio de 2004, 16-18.
- [49] Robert Byrne, *Skyscraper*, Nueva York: Atheneum, 1984.
- [50] Joe Morgenstern, “The Fifty-Nine Story Crisis”, *New Yorker*, 29 de mayo de 1995, 45-53.
- [51] Véase, p. ej., Gretchen Ruethling, “36 Are Hurt as Fire Damages Bank Headquarters in Chicago”, *New York Times*, 8 de diciembre de 2004, edición nacional, A18.
- [52] Véase, p. ej., Schlager, ed., *When Technology Fails*, 307-312.
- [53] Peter Reina, “Focus on Construction of Columns at Airport”, *Engineering News-Record*, 31 de mayo de 2004, 10-11. Véase también el recuadro complementario, “Moving Far Beyond Airports”, 11.
- [54] Craig S. Smith, “New Cracks Stop Search at Terminal after Collapse”, *New York Times*, 25 de mayo de 2004, 10.
- [55] Véase Aileen Cho, “Planned, Collapsed Terminals Featured at Peer Review”, *Engineering News-Record*, 27 de septiembre de 2004, 16.

- [56] Peter Reina, “Airport Roof Failure Blamed on Process”, *Engineering News-Record*, 21 de febrero de 2005, 10-11; “More Team Building”, editorial, *ibid.*, 56.
- [57] Craig S. Smith, “Architect Starts Study of Failure in Paris Airport”, *New York Times*, 26 de mayo de 2004, A13.
- [58] Reina, “Focus on Construction”, 11.
- [59] Joseph Kahn, “A Glass Bubble That’s Bringing Beijing to a Boil”, *New York Times*, 15 de junio de 2004, A1, A12. Véase también Janice Tuchman, Peter Reina y Andrea Ding Kemp, “Beijing’s National Grand Theater Transforms the Cityscape”, *Engineering News-Record*, 29 de noviembre de 2004, 22-27
- [60] El obituario de Moisseiff en *Transactions of the American Society of Civil Engineers* no mencionó el puente de Tacoma Narrows. Véase vol. 111 (1946), 1509-1512.
- [61] “Paris Airport Collapse Should Not Stifle Innovation”, *Engineering News-Record*, 31 de mayo de 2004, 56.
- [62] Sir Alfred Pugsley, *The Safety of Structures*, Londres: Edward Arnold, 1966, 2.
- [63] Citado en Alfred Greenville Pugsley, “Concepts of Safety in Structural Engineering”, *Journal of the Institution of Civil Engineers* 36 (1951), 29.
- [64] “Charley’s Rampage Also Shakes Construction’s Trust”, *Engineering News-Record*, 23 de agosto de 2004, 96. Véase también “New Florida Codes Bring Mixed Success”, *ibid.*, 8-9.
- [65] Eric Lipton, “After 100 Years, a New Rule Book for New York”, *New York Times*, 17 de mayo de 2004, A21.
- [66] Véase, p. ej., *Engineering News-Record*, 7 de junio de 2004.
- [67] Nadine M. Post, “Skyscrapers’ Supporters Infuriated by Fire Fearmongers”, *Engineering News-Record*, junio 7, 2004, 48-54.
- [68] Milt Freudenheim, “Many Hospitals Resist Computerized Patient Care”, *New York Times*, 6 de abril de 2004, C1, C6. Véase también Institute of Medicine, Committee on Health Care in America, *To Err Is Human*.
- [69] W. E. Deming, citado en Lucian L. Leape, “Error in Medicine”, *Journal of the American Medical Association* 272, 21 de diciembre de 1994, 1851.
- [70] *Ibid.*, 1852.



# Índice

- Prefacio
- Introducción
  
- I. De la caverna de Platón a PowerPoint
- II. Éxito y fracaso en el diseño
- III. Objetos intangibles
- IV. Objetos pequeños y grandes
- V. Construir sobre la base del éxito
- VI. De simples piedras a superarcos
- VII. El futuro histórico

El éxito no es simplemente la ausencia del fracaso, es la anticipación de cómo puede ocurrir el fracaso. Como demuestra Henry Petroski en este ensayo, el avance tecnológico y la mejora en el diseño es más una reacción ante la frustración por algo que no funciona bien, que una forma de responder a nuevas necesidades. Los inventores, los ingenieros, los diseñadores y los usuarios comunes se enfrentan a problemas de este tipo todo el tiempo al querer usar los objetos más allá de sus límites.

De ahí que en muchas ocasiones imitar de manera fácil el éxito sólo lleva al chasco: desde una mala presentación en PowerPoint hasta un desastre en la construcción de un puente con tecnología de punta o en el lanzamiento de un transbordador espacial. Todos ellos son casos que revelan en el proceso de innovación la relación incontrovertible y paradójica entre el éxito y el fracaso.

Henry Petroski es ingeniero, profesor de historia y titular de la cátedra Aleksandar S. Vesic de ingeniería civil en la Universidad de Duke, en los Estados Unidos. Es autor de más de una docena de libros sobre ingeniería y diseño, y escribe frecuentemente para las revistas *American Scientist* y *Prism*.