

Teoría y crítica
ENSAYO

Reincorporando lo anacrónico en la práctica de la ingeniería

Mág. Juan Gabriel Monge, Ingeniero Mecánico

Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica

juan.mogegapper@ucr.ac.cr

Profesor

Invitado nacional

Recibido: 14 setiembre 2015

Aceptado: 30 octubre 2015

Teoría y crítica
Ensayo

Resumen

Se arman ciertas contradicciones de criterio que aparecen a diario en el ejercicio de la profesión de la ingeniería y su enseñanza que se han heredado a los libros de texto contemporáneos. Se discute que un enfoque dirigido únicamente al conocimiento técnico contemporáneo tiende a desplazar enfoques previos que conservan su actualidad, y se contrasta la demanda de resultados inmediatos con la necesidad de que el trabajo intelectual debe rendir entendimiento crítico, no una gran cantidad de documentación. Se propone que los atributos holísticos de capacidad de síntesis, intuición técnica y visión transversal se fortalezcan con acciones concretas a lo largo de todas las etapas de la vida profesional del ingeniero.

Palabras clave: educación en ingeniería; nicho de experiencia; obsolescencia; síntesis teórica.

Abstract

Current professional practice has influenced education in engineering with certain attitudes towards theoretical knowledge, experience and numerical models that are evident in contemporary textbooks in the field. Focus on recently published material displaces valuable classic texts, and excess confidence on numerical models, technical databases and documentation distract the user from useful knowledge. Holistic attributes such as insight, technical intuition, and wide field perspective need to be strengthened with specific training pointers at all stages of the professional career of an engineer.

Keywords: *engineering education; niche experience; obsolescence; theoretical synthesis.*

Reincorporando lo anacrónico en la práctica de la ingeniería

Juan Gabriel Monge Gapper¹

Introducción

En una multitud de libros de texto universitarios, en especial aquellos de índole técnico, el prólogo menciona directamente que esa edición ha sido modernizada como respuesta a las nuevas técnicas: las frases *En esta nueva edición se incluyen muchos de esos apoyos* [1]; *Esta edición hace énfasis sobre algunos de estos modernos desarrollos* [2]; *Modern coverage of materials selection, Inclusion of latest available revisions* [3] pueden encontrarse parafraseadas de una u otra manera en casi cualquier monografía técnica contemporánea.

El libro de texto *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* [4] basa su estructura y contenidos básicos en una publicación de carácter clásico moderno: el original [5] ha sido usado en sus múltiples ediciones en universidades de todo el continente americano y del que se hicieron más de seis ediciones en español entre 1980 y 2000. Los editores de la denominada octava edición decidieron agregar al título el apellido del autor del libro original para garantizar que sea reconocido por sus compradores, pero también dedica toda una sección del prólogo a indicar lo nuevo de la edición. No cabe duda que resaltar la novedad es necesario para que la publicación sea un producto atractivo para el comprador, pero rara vez un autor menciona pasadas ediciones más que para darle mayor credibilidad al texto por su continuada publicación. Este caso es una muestra muy clara de este patrón: incorporan la referencia de J. E. Shigley al título, pero no hacen mención al impacto o la vigencia de todas las pasadas ediciones.

Aparte de las razones comerciales que justifican esta decisión, el que no se señale explícitamente la vigencia contemporánea de publicaciones de hace más de veinte años confunde al lector novato en cuanto a la validez de usarlas, aún si se encuentran entre la bibliografía de una publicación reciente. Una nueva edición puede que lleve variaciones de formato, nomenclatura, lenguaje de programación o estilo de redacción, pero esto es un cambio, no una evolución de los conceptos clave que fundamentan la publicación. En el mejor de los casos las contribuciones son aditivas o presentan variantes en métodos de cálculo y normas técnicas. Casi nunca un concepto básico es

¹ Cuenta con una maestría en Ingeniería Mecánica con énfasis en sistemas térmicos y de energía, es profesor de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica desde el 2000, en los campos de termofluidos y diseño. Se desempeña como consultor independiente y asesor externo para consultoras del área, especialmente en sistemas de ventilación.

rebatido dado que se trata de conocimiento científico, no una ideología cuya validez dependa de un contexto.

Esta confusión puede afectar también a los departamentos de adquisiciones de universidades y bibliotecas, que regularmente se deshacen de material considerado obsoleto por su fecha de publicación [6], aún si se trata de documentos que siguen siendo citados en publicaciones contemporáneas, a lo que es oneroso dar seguimiento si no se dispone de sistemas informatizados similares a los repositorios de citas SCOPUS® o CiteSeerX que están altamente automatizados.

Empero, cualquier texto clásico únicamente será efectivo en la práctica profesional si, además de formar al lector, lo inspira a cuestionar el conocimiento para que distinga cambios estéticos o modas de publicación de técnicas de cálculo más efectivas; mejor aún, que identifique estilos de pensamiento para ponerlos a prueba con el método científico. Estos procesos son motor del progreso, que difiere mucho de la acumulación de conocimiento o de la sustitución forzosa de identidades ideológicas que afectan por igual a profesionales inexpertos como a quienes apenas inician su formación académica.

En alguna medida puede hacerse una analogía con la evolución de las especies, sólo que aplicado a técnicas e ideologías, de manera que podría creerse que el conocimiento llegaría a ser óptimo además de funcional. Este no necesariamente sería el caso; al igual que si hay poblaciones de seres vivos que se encuentran aisladas de otros ecosistemas por un accidente geográfico, no necesitan evolucionar para sobrevivir si la variedad de la población es muy pequeña.

Lo mismo ocurre con las técnicas o ideas que dejan de interactuar en grado suficiente con otros sectores del conocimiento: si un especialista se arrincona en su nicho del conocimiento, probablemente pocos lo cuestionen, pero sus investigaciones serán autógenas [7] y eventualmente dejará de haber innovaciones en el campo.

Buena parte de los rasgos de trabajo nocivos para la innovación que están presentes en el enfoque de los textos de enseñanza se reducen a tres categorías: la desvaloración de la experiencia frente a lo actual, el rechazo a la síntesis teórica de conceptos de ingeniería, y la sobrevaloración del modelado por computadora. Muchas de las referencias de este artículo son monografías técnicas del área de ingeniería que se incluyen para contrastar las publicaciones de 1960-1985 con las de 1990 a 2010 en esos aspectos particulares.

La falacia de la desactualización

Un lugar común del periodismo tecnológico, y que aparece frecuentemente en escritos académicos de vanguardia, es la de que hay *vertiginoso avance tecnológico* que ocurre en buena medida gracias a las herramientas de comunicación y difusión de alcance masivo global [8]. Donde haya servicios de telefonía consolidados, es muy posible que haya también posibilidad de conectar un computador personal a la red Internet, lo que permite acceso inmediato a una gran cantidad de fuentes de información y a comunicación prácticamente instantánea a nivel global.

No cabe duda de que la velocidad en la comunicación afecta en órdenes de magnitud la transformación de las técnicas y la difusión de nuevos conocimientos, pero no se garantiza con ello su evolución. Continuando con la analogía de la evolución de las especies vivientes, si la funcionalidad es suficiente para que pueda haber reproducción exitosa, en el desarrollo de ideas de ciencia un proceso de prueba y error puede que lleven a una solución, pero no será una de las óptimas más que por coincidencia [9]. Sin un algoritmo que dirija sus operaciones, un avión con suficiente velocidad y autonomía tiene probabilidades no nulas de llegar a un destino específico si no colisiona, o sufre fallas mayores, pero será un viaje muy ineficiente.

El caso es que el cambio acelerado es el centro de acción de los campos de conocimiento técnico, pero no siempre hay evidencia de interés por considerar si esos cambios en verdad son una evolución o si es suficientemente sustanciosa como para que amerite una publicación.

Una de las consecuencias de esta mentalidad es que en buena parte de las organizaciones humanas contemporáneas hay alta demanda por actividades de capacitación en temas de actualidad, lo que lleva a una proliferación de programas de educación continuada diseñados para actualizar a un sector profesional que se tiene que enfrentar a sistemas de gestión que dependen de tecnologías cambiantes.

Estos cambios a veces ocurren aún sin que haya evidencia de que se trate de una evolución o de que haya necesidad real de cambio, sino que responden a intereses comerciales. Un ejemplo clásico es el sector de fabricantes de microprocesadores, eslabón vital de las tecnologías de cómputo y telecomunicaciones. Estos conglomerados de manufactureros y proveedores se verían arruinados en el curso de unos pocos años si no varían la capacidad, factor de forma, o denominación de sus productos cada seis o siete meses [10], dado que tienen clara perspectiva que parte considerable de la masa

de usuarios de computadores personales procurarán obtener la versión más reciente del equipo aún si no necesitan las características que los distinguen de sus versiones anteriores.

Otro ejemplo cotidiano que fuerza la desactualización de productos de consumo masivo es la telefonía móvil, en donde la vida útil del aparato es de unos dos años si han sido fabricados después de 2010 [11],[12]. Este período tan corto no lo determinan sus componentes físicos, sino por el período en que el fabricante deja de proveer actualizaciones de los sistemas informáticos compatibles. La consecuencia inmediata es que esta necesidad de facto indispensable de actualizar continuamente el equipo de cómputo y de comunicación engulle una parte considerable de los recursos de cualquier organización o individuo.

Al tiempo que la capacidad de cómputo y de almacenamiento en formato digital crece, las aplicaciones informáticas en general también se vuelven más complejas al tiempo que dependen directamente de tecnologías de comunicación para efectos de verificación de licencias, uso de bases de datos, obtener actualizaciones o paquetes de mantenimiento, y efectuar consultas técnicas.

Esta tendencia que ha sido característica de los últimos quince años ha vuelto difusa la división entre comunicación y cómputo [13], y si bien las iniciativas de ofrecer servicios de programas de cómputo en línea para aplicaciones de trabajo se encontraron con cierta resistencia, en el ámbito de la telefonía móvil esta distinción se ha borrado.

Los programas, llamados con el nombre inocuo de *apps*, sencillamente no funcionan a no ser que disponga de conexión a la red Internet. Las plataformas gratuitas de almacenamiento (como *DropBox* o *FileShare*) y de diagramación de documentos (como *OverLeaf*) también son iniciativas cuyo propósito es educar al usuario en que no es necesaria una distinción entre comunicación y cómputo, al menos para efecto de comercialización de servicios y programas de cómputo.

Esto lleva al otro factor que hace expedita la edición de material bibliográfico; los paquetes de cómputo proveen herramientas excelentes para procesos de documentación, y la composición, edición, diagramado e impresión de libros es mucho más directa que hace pocas décadas. Las ventajas son deslumbrantes, pero a tal grado que le opacan al autor incipiente el hecho de que la médula de la producción intelectual no ocurre gracias al computador, sino que depende de su capacidad de razonamiento y su creatividad. Para escribir prosa de alta calidad es suficiente un procesador de

palabras en una PC-1 (o una máquina de escribir Olimpia 1967), pero esto no parece ser parte de la conciencia común de autores incipientes.

Este panorama sigue asociado a que se clasifica todo lo que no sea contemporáneo como fuera del tren de producción actual. Pocos podrán despreciar el valor de un reloj mecánico suizo, pero es más por ser un objeto coleccionable o de alto valor monetario que por ser un reloj preciso y con fiable. En la conciencia actual, se prefiere un reloj electrónico de buena calidad a un reloj mecánico de precisión y calidad comparable porque provee una sensación psicológica de mayor certeza. No en vano las mayores corporaciones globales que producen equipo de cómputo de marca han invertido considerable esfuerzo de mercadeo y de desarrollo tecnológico en relojes de pulsera electrónicos de lujo con conectividad directa a teléfonos móviles. El *Apple Watch* [14] es una muestra inicial de que se intenta fusionar en un objeto cierta capacidad de comunicación digital con el aura de lujo al que se asocia la alta relojería clásica.

La credibilidad de las simulaciones

La tecnología contemporánea que más rápido ha crecido y mayor impacto ha tenido en todos los estratos de actividad humana es sin duda la del computador digital. A la par de la necesidad creada de una continua actualización de equipo de cómputo la capacidad de procesamiento y de almacenamiento crece tan rápido que el valor comercial de un computador con cuatro o cinco años de uso es prácticamente nulo [15].

En consecuencia, cálculos que en el decenio de 1980 sólo podían ejecutarse en unas pocas supercomputadoras en el mundo pueden hacerse en casi toda computadora personal contemporánea [16]; y la comunicación, en la práctica instantánea a través de la red Internet, permite obtener sin mucha dificultad programas para casi cualquier aplicación usual, o en su defecto, bibliotecas de programación para conformarlos, así como consultar sin demora a expertos que se encuentran a miles de kilómetros de distancia.

Una de las consecuencias negativas de tal poder de cálculo es la recurrencia innecesaria a los modelos detallados de simulación de procesos y componentes en ingeniería. En aquellos casos en que el diseño de un componente se hace con códigos o normas, es innecesaria la verificación con modelos detallados si no es con el propósito de obtener información adicional acerca de su rendimiento.

Tampoco se necesitan modelos detallados cuando el único parámetro de interés es general, no particular: si se quiere obtener la presión estática en el fondo de un tanque, es suficiente con una fórmula simple que se presenta a inicios de cualquier curso introductorio de hidráulica. Si bien se podría elaborar un modelo numérico con el método de volúmenes finitos para obtener el mismo dato, es un ejercicio similar a usar una calculadora electrónica para sumar números enteros de dos dígitos. No sería incorrecto, pero tampoco es necesario y no provee información adicional de utilidad; sólo se desperdicia tiempo y trabajo en conformar el modelo.

Además del poder de cálculo, la evolución de los sistemas informáticos ha traído interfaces de trabajo mucho más intuitivas de operar, lo que incluye los procesos de despliegue de grandes cantidades de información. El valor estético de los gráficos que resultan de algunos tipos de modelos numéricos le da mucha visibilidad individual, lo que se suma a la percepción subjetiva de que entre mayor capacidad tiene el equipo de cómputo, más precisos deberán ser los resultados.

Sin embargo, estos paquetes de cómputo no dejan de ser una herramienta, y las hay de diferentes calidades, tanto en términos técnicos como visuales; las interfases de usuario gráficas le facilitan a cualquier persona con preparación técnica manejarlas aún si carecen del criterio para aplicarlas con fundamento o no tenga idea clara de cómo interpretar los resultados.

Esta propiedad de los paquetes de modelado comerciales disponibles en los últimos veinte años, se debe parcialmente a que el usuario rara vez interviene directamente en el proceso de cálculo; hay que describir con precisión suficiente la pieza con sus fronteras (por ejemplo, debe dibujar en la interfaz de usuario del programa de modelado la geometría de un abanico y especificar su velocidad de rotación) y solicitarle al programa que lleve a cabo la etapa de cálculo. En el mejor de los casos, tras algunos minutos los resultados están listos; el usuario no tuvo que invertir esfuerzo ni requiere contar con conocimientos de programación ni del proceso de cálculo. Lo único que percibe directamente es la molestia de esperar unos minutos mientras el computador ejecuta cálculos.

Cuando la computadora muestra el resultado, es evidente la segunda razón por la que se le da indebida credibilidad: la alta calidad visual de las imágenes, llenas de intensos colores distribuidos en la superficie y en el interior del modelo digital del componente (en el caso del abanico, las líneas de flujo o la presión sobre las aspas). Aunque sea equivocado el resultado, si no se tiene experiencia o cuando menos conocimiento sobre cómo debió comportarse, es muy fácil dar por cierto lo que indica, porque no hay otro asidero.

El valor visual es tan impactante que en muchas ocasiones los estratos de gerencia de ingeniería que no tengan conocimientos técnicos sobre el modelo (pero sí ven las elegantes imágenes, en esencia cualitativas como la que se muestra en la **Figura 1**), pueden llegar a volcar decisiones en una dirección distinta a la que hubieran tomado si sólo se les describieran los resultados en términos cuantitativos o bien si se presentaran como histogramas o líneas de tendencia como la de la **Figura 2**.

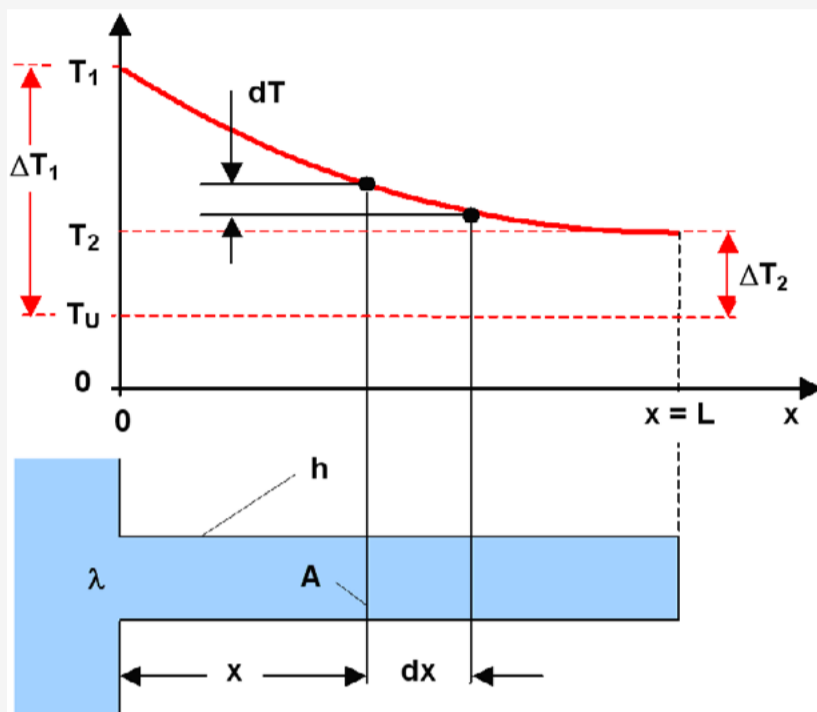


Figura 1: Modelo computacional de un disipador de calor con simetría axial

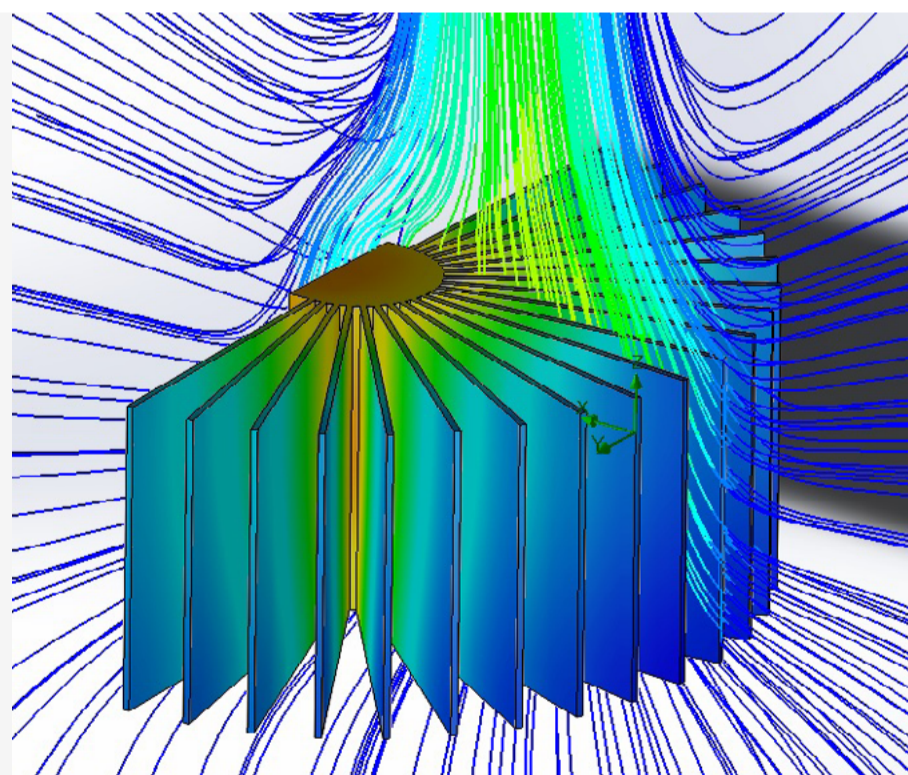


Figura 2. Modelo de flujo de calor unidimensional [17]

Precisamente por su atractivo estético estas simulaciones componen buena parte de la atención positiva que recibe la ingeniería por parte de los medios de comunicación

masiva, lo que genera percepciones equivocadas del tipo de trabajo que hace un ingeniero y de qué tan detallados o realistas pueden ser estos modelos matemáticos.

Esta calidad visual únicamente continuará mejorando con los años, así como la exactitud y flexibilidad de los modelos, y la versatilidad de la interfase con el usuario. Desde luego es muy beneficioso, pero también hace más tentador recurrir a tales simulaciones para conferirle credibilidad a afirmaciones sin fundamento, pero que pueden escudarse en el anonimato del modelo numérico. Las técnicas inmersivas como las proyecciones estereoscópicas, bastante comunes en cines contemporáneos o sistemas más complejos categorizados como realidad virtual, son tecnologías que agregan credibilidad sin que necesariamente se haya trabajado en la validez científica del modelo digital.

La ceguera de las bases de datos

Otra consecuencia mucho menos visible de la altísima capacidad de almacenamiento y procesamiento de datos, pero que igual afecta la calidad de los diseños contemporáneos, es una técnica de dimensionado de componentes de maquinaria fundamentada en bases de datos. El proceso no es errado, sino que las fuentes originales podrían serlo: las bases de datos que contienen las características de componentes similares que han existido previamente y han probado ser funcionales. No se usan para optimizar el diseño del nuevo componente, sino para decidir sus características sin necesidad de llevar a cabo cálculos especiales ni conocer la teoría que respalde preferir un diseño sobre otro.

Un campo en que esta técnica se aplica con regularidad es al elegir el tamaño y la forma de un rotor para bombas centrífugas pequeñas [18]. Se tiene, para empezar, unos requerimientos de diseño, usualmente la presión que debe suministrar y el caudal que debe entregar la bomba. Para el diseñador, la premisa es que el rotor debe ser tan barato de fabricar como sea posible y que cumpla con los requerimientos del cliente.

Si se tiene acceso a una gran cantidad de curvas de operación de bombas centrífugas, provenientes de mediciones generadas a lo largo de más de varias décadas de existencia de la empresa que las diseña, comprueba y fabrica, habrá una correspondiente variedad de datos de presión, caudal y eficiencia de los rotores como función de su forma, tamaño y velocidad de rotación. De esa manera, cuando hay un requerimiento nuevo, no hace falta diseñar un nuevo rotor con base en su fundamento teórico, producir un prototipo y caracterizar su comportamiento; lo probable es que en algún momento

en la historia del fabricante se produjo un rotor de rendimiento similar en el que se puede basar el diseño.

La capacidad de almacenamiento y de búsqueda automatizada de un computador hace que sea práctico y relativamente sencillo para el diseñador encontrar rápidamente esta información, lo que le dará la certidumbre de que el nuevo diseño funcionará y que las etapas de cálculo, prototipo y prueba serán mucho más cortas y de menor costo que un desarrollo nuevo. Los sistemas expertos [19] no dejan de ser una versión activa y más compleja de una base de datos asociada a procesos en general de la actividad en una organización.

La clave está en cómo usa el diseñador la información en la base de datos: puede ser con conciencia de las variaciones que podría o debería incorporar, pero es mucho más fácil únicamente interpolar características de tamaño de dos rotores existentes para producir uno nuevo que cumpla con los requerimientos nuevos. Si se opta por esto último para el diseñador no es imprescindible conocer la teoría de diseño de rotores, sino solo sus características. En tal caso no hay una evolución positiva del diseño porque únicamente se perpetúa la información existente sin invertir recursos en mejorarlo.

Quienes usan el método de diseño por bases de datos argumentan que los mejores diseños serán los que prevalecerán en vista de que cada usuario escogerá de la base de datos aquellos que sean más eficientes, muestren menos fallas, menor costo inicial o de operación, y en general de mejor ingeniería [20]. Con el tiempo, se estarán seleccionando y por ende fabricando únicamente los mejores componentes.

Esta afirmación tiene algo de cierto, pero no hay garantía de que el tiempo requerido para que se llegue a esa selección natural sea razonablemente corto. Tampoco se puede evitar que el diseño adolezca de defectos inherentes a no ser que el diseñador con su experiencia o intuición técnica las pueda pronosticar. Los fundamentos teóricos de un diseño, sin importar si se tienen en cuenta o no al conformarlo, son como el ADN en los seres vivos: una característica negativa, mientras no incapacite a su portador, no garantiza que vaya a eliminarse o atenuarse, sencillamente que tiene menores posibilidades de sobrevivir.

El valor de la experiencia

No cabe duda que la valoración de una situación, documento, o concepto será mejor si se cuenta con experiencia suficiente en la aplicación particular, y el diseño en ingeniería

confirma esta regla a diario [21]; quienes se inician en un campo de trabajo, se necesitan apoyar en la guía de un buen mentor, modelos numéricos y en la gran cantidad de información disponible globalmente. Estos excelentes recursos, además de facilitar el trabajo individual, harán más corto el período necesario para adquirir la experiencia de un profesional consolidado en un determinado contexto de trabajo.

Los artículos científicos, los informes técnicos, los datos de mediciones y las bitácoras tienen la ventaja de que están disponibles a toda hora y casi cualquier lugar si son digitales; muchos de los formatos digitales permiten llevar a cabo búsquedas automáticas en su contenido u otras técnicas como filtrado, minería de datos o análisis estadístico.

Sin embargo, acortar la etapa de consolidación de experiencia no quiere decir se pueda eliminar; el acceso expedito a mucha información o disponer de poder de cálculo para generar información aparentemente nueva a partir de técnicas complejas le puede dar a un profesional la sensación equívoca de que es experto, aunque no esté en capacidad de darle valor agregado a un trabajo en particular.

Muchas veces un profesional en esta situación consigue continuar con su trabajo sin mayores problemas, pero cuando surge una situación especial que no ha sido previamente documentada o no puede resolverse con modelos numéricos u otra técnica especial, puede ocurrir que obtenga verdadera visión integral acerca de un fenómeno o vea una potencial innovación. Ese es verdadero crecimiento en experiencia, y no sólo hay que reconocer esos momentos, sino tratar de que ocurran con más frecuencia; parte de ello es no dejar que la gran cantidad de información o la posibilidad de hacer una simulación o un complejo experimento sustituya la observación simple y el razonamiento como generador de criterio e intuición que facilitan la comprensión integral de los conceptos que generan un problema y que eventualmente conformarán su solución.

Estos instantes de comprensión integral son poco frecuentes y la cultura de trabajo occidental [22] no lo facilita; está llena de anécdotas que son el resultado de la aplicación ciega de técnicas que inhiben el desarrollo de una perspectiva crítica. Es un lugar común el de un cuestionamiento que se le hace al ponente de una conferencia científica, quien evade fundamentar la base conceptual de su trabajo aduciendo que haría falta elaborar nuevos modelos numéricos, tomar más mediciones, resolver un conjunto distinto de ecuaciones o llevar a cabo más experimentos para emitir un criterio.

En el ejercicio de la ingeniería es muy común toparse con quienes, para responderles a sus superiores o a clientes insistentes, conforman un juego de datos o un modelo numérico sin mucho fundamento pero que dan la sensación de que algo se ha hecho,

sobre todo si se tiene la certeza de que el receptor no conoce mucho del tópico. Por lo general no se llega a avanzar mucho; en el peor de los casos el conferencista queda expuesto como ignorante o el empleado es separado de su puesto, pero por regla general, se toleran estos comportamientos dentro de los límites de la cultura de trabajo organizacional.

Una colección de experimentos repetidos no hacen al experto, sencillamente le proveen datos suficientes para hacer análisis estadístico; la experiencia valiosa es la que proviene de la observación crítica de las pequeñas diferencias entre experimentos repetidos, sea de operación de una máquina, confección de modelos matemáticos, o diseño de componentes y sistemas de ingeniería.

Es la detección sistemática de pequeñas fallas o la incorporación continua de sutiles mejoras (a veces involuntarias o inconscientes) la que verdaderamente define el crecimiento en experiencia de un profesional, dado que contribuyen a su visión integral de los fenómenos que forman parte de sus funciones regulares de trabajo. Como esta experiencia conlleva mucho valor agregado, en ocasiones el trabajo respaldado por profesionales o técnicos experimentados adquiere un alto valor monetario. En casos excepcionales, la fama o el carisma particular de algunos consultores técnicos es tal que sus honorarios pueden ser arbitrariamente altos.

101

Cualquiera que sea la posición de un profesional experimentado, su particular perspectiva también tiende a hacerlo reticente al cambio en estilos de trabajo y técnicas de cálculo, a lo que suman aspectos culturales y generacionales. Entre las consecuencias negativas que esto puede tener es que puede considerarse como falta de actualidad por no manejar técnicas contemporáneas, aunque el valor intelectual de su trabajo está en la visión integral que tenga de su área de conocimiento, trátase de diseño, producción o gestión en ingeniería.

Como este valor no se puede contabilizar sino a través de la valoración de una red de contactos personales, difícilmente se puede conformar una herramienta para evaluarla. La desventaja de ello es que será cuando menos parcialmente subjetiva, lo que abre la posibilidad de que haya quienes no son verdaderos expertos, pero que tienen alta visibilidad en un cierto círculo profesional [23]. Esta tipología profesional se caracteriza por manipular la percepción de su credibilidad a través de su carisma político para ocultar que carecen del conocimiento técnico para respaldar su trabajo. Esta actitud va en detrimento natural de los expertos que carecen de visibilidad y carisma pero que sí podrían aportar en procesos de innovación o resolución efectiva de problemas técnicos.

En parte para disminuir la dependencia de los expertos, en parte para normalizar la práctica profesional, han surgido mecanismos para compensar rápidamente la falta de experiencia: aparte de los códigos de diseño y normativa técnica, están las organizaciones de certificación que tienen poca vinculación con la obtención de un diploma universitario, como ocurre en el caso de los analistas de vibraciones, gestores de calidad, y gestores de recursos humanos, de lo que se pueden ver muestras en [24], [25] y [26] respectivamente. Si bien su intención es en buena parte positiva, tienen la desventaja de que una limitada experiencia por parte del receptor impide que el conocimiento asumido gracias a la capacitación no garantice una visión madura.

Otros mecanismos de compensación tópicos, relacionados con lo expuesto en la sección anterior, son aquellos que recurren a su excelente habilidad de operación de herramientas informáticas y la conciencia de lo abundante y poderosa que es la información disponible en forma digital, se trate de bibliografía, informes técnicos, históricos de mediciones o bases de datos multidimensionales. Todas estas herramientas son verdaderamente útiles, pero rara vez pueden sustituir a ciegas una visión madura de un área del conocimiento humano, sea de una aplicación práctica o de procesos muy abstractos como la gestión de recursos humanos o la valoración de obras artísticas.

Los inconvenientes asociados a la inexperiencia muchas veces pierden importancia para los empleadores de los profesionales jóvenes: como se encuentran al principio de su vida profesional, el costo y el riesgo de contratarlos es relativamente bajo, recién han recibido intensa instrucción, se encuentran al día con tecnologías contemporáneas, tienen pocas responsabilidades personales, suelen gozar de buena salud y carecen de vicios laborales adquiridos en trabajos anteriores. Esto es lo que fuerza a los gestores de recursos humanos a recurrir a técnicas dirigidas a acortar los períodos de formación de la experiencia mínima para ser funcionales en una organización humana.

Formación temprana de la experiencia

El perfil de los graduados universitarios contratados parece indicar que en Occidente un experto joven es un empleado más atractivo que uno con experiencia [27], especialmente porque son más susceptibles de ser adoctrinados con la cultura corporativa del empleador.

Esta perspectiva es preferida según los estilos de gerencia característicos de corporaciones tecnológicas transnacionales [28] para que el personal tenga un comportamiento previsible o cuando menos acorde a las políticas gerenciales de la empresa, aduciendo

que es conveniente para mantener la estabilidad de la organización.

Desafortunadamente, un departamento de ingeniería no puede conformarse con ingenieros jóvenes con excelentes atestados. Se corre el riesgo de que cometan errores al unísono, y los problemas que no surgen a corto plazo pero que aparecerán a mediano plazo serán mucho más difíciles de resolver o de trazar a un razonamiento equivocado. La figura del gerente o del jefe de sección en parte tiene ese propósito, pero su función se ha vuelto más fiscal o delegadora que la de un mentor [23], en parte porque son un peldaño del aparato jerárquico y deben cumplir una función de auditores bajo presión, con objetivos tan poco flexibles que impiden su función informal de guías de la carrera profesional de las personas a quien supervisa.

La rigidez de funciones tanto de gerencias como de operarios y profesionales, ha llevado a que la inventiva y la creatividad se atrofian por carecer de espacio de acción, de manera que cuando se requiere innovar para resolver un problema menor o definir nuevas políticas, no surgen ideas nuevas. Las teorías y métodos contemporáneos que se llevan a la práctica no son tan novedosos en sí, tanto si es rudimentario como la lluvia de ideas, como si es con sólida estructura conceptual como la asociada a los cuarenta principios de la metodología TRIZ [9].

Son un sustituto pretendido de la visión integral que confiere la experiencia, y tal vez lleven al usuario a la misma categoría de solución, aunque quizás no sea tan completa como se pudiera. Esto no solo es conveniente y relativamente expedito, sino que se ha vuelto una necesidad en un momento del desarrollo humano en que el conocimiento técnico se ha vuelto tan vasto que una vida humana es insuficiente para que una persona pueda denominarse experta aún en una pequeña área de trabajo.

Cuando menos un conjunto básico de competencias se debe adquirir por experiencia directa; si bien los métodos de cálculo, las publicaciones, las bases de datos y las metodologías de resolución de problemas todas provienen del trabajo y observaciones que otras personas llevaron a cabo, a veces para entenderlas hay que reconstruirlas, al menos en las etapas conceptualmente cruciales. El lugar común de *aprender haciendo*, o el consuelo clásico de que *la mejor forma de aprender es equivocándose* se contradice con las máximas del especialista contemporáneo: no hay que *reinventar la rueda* ni mucho menos *descubrir el agua tibia* [21].

La clave está en la pertinencia; por ejemplo, quienes se encuentran a cargo de generar nuevos diseños de llantas para automóvil, deberían ensamblar al menos una llanta con sus inexpertas manos o cuando menos acompañar a los operarios en todo momento del proceso de producción durante varias jornadas de trabajo. Les dará una idea

cualitativa del comportamiento de los materiales, y preparará su intuición para que sus propuestas estén más alineadas con la realidad de los procesos de producción. Las críticas a quienes redescubren una realidad no yacen en que hayan invertido tiempo en ello, sino en que la anuncian a su entorno como innovación, cuando en realidad solo se trata de un paso necesario en su proceso de aprendizaje de una técnica o de un antecedente que eventualmente podría inspirar una novedad en manos de una mente creativa con el conocimiento técnico necesario asociado.

La insistencia en que no se repita lo que ya ha sido previamente desarrollado lleva a que es difícil distinguir aquellas actividades formativas de las que son labores rutinarias, en especial porque depende mucho del contexto en que se trabaja y de si hay mentores que velan por la formación de los aprendices. En consecuencia, en buena parte de los entornos académicos o de trabajo, tanto profesionales como inexpertos desprecian actividades o contenidos que pueden ser fundamentales para el aprendizaje integral o para madurar conocimientos previos.

Otro factor que contribuye a la percepción de que el conocimiento previo no es necesario tenerlo en primer plano es que cualquier autor hace referencia a libros o artículos, en lugar de repetir la información en su nuevo escrito a no ser que sea primordial. Esto es natural y necesario para que las publicaciones se complementen sin repetirse, pero tiene el efecto de que el lector en su afán por actualizarse con material recién publicado, no consulte el material referenciado por dirimirlo secundario. Otra reacción frecuente es que el lector, si no conoce las referencias, únicamente usa la fecha de publicación para valorar si las descarta sin percatarse que algunas pueden contener bases indispensables y vigentes para efectos de madurar el conocimiento que está en proceso de asimilar.

104

Exclusión de los desarrollos teóricos

Aparte de la afirmación poco racional de que todo material publicado hace más de cinco años está desactualizado [29], hay otras razones más allá de la evolución de la técnica que hacen que excelente material de referencia caiga en desuso. Algunas son parcialmente válidas, como los cambios en la notación matemática, en la terminología, o incluso en el estilo de redacción o de diagramación, lo que puede dificultar su comprensión.

Existe también la percepción de que los modelos matemáticos de fenómenos que se trataban en forma analítica son excesivamente difíciles de entender, requieren mucho trabajo intelectual que quizás lleve a una correlación cierta pero no muy útil, y son

inexactos por tratarse de idealizaciones aisladas. En las décadas inmediatamente posteriores a la segunda guerra mundial se publicaron la mayor cantidad de tratados teóricos de la ciencia de la ingeniería gracias a que podía difundirse el conocimiento desarrollado en época de guerra, y esta bibliografía fue con la que se formaron los ingenieros y técnicos de la época [30]. Su popularidad en un ámbito técnico no empezó a decaer sino hasta el decenio de 1980, en donde los métodos numéricos se volvieron prácticos en vista de que los computadores digitales se desarrollaron lo suficiente como para ser accesibles al grueso de la población de trabajadores técnicos [16].

El tratamiento analítico es una herramienta que puede dar dirección a una solución que ataque el origen del problema, no los síntomas. Los fundamentos teóricos de un fenómeno muchas veces se describe por ecuaciones diferenciales que son idealizaciones sin mucha utilidad si se quiere reproducir con exactitud el comportamiento del fenómeno real (lo sintomático, no lo fundamental); lo usual es que las matemáticas asociadas se vuelven poco prácticas por lo complejas o poco versátiles que resultan al tratar de incorporar las fronteras altamente no lineales de la realidad [31].

El carácter no lineal de la realidad es la que inició el desarrollo de los métodos numéricos; en cuanto se volvieron prácticos y accesibles en los decenios de 1980 y 1990, prácticamente sustituyeron los métodos teóricos por ser convenientes y expeditos, y siempre producen un resultado tangible y hasta estéticamente agradable si se presentan en forma gráfica, aún si está equivocado o es de limitada utilidad.

El énfasis de los libros de texto universitario de los últimos veinticinco años, los cursos de actualización profesional y el enfoque de quienes ejercen la profesión es dejar de lado los desarrollos teóricos o presentarlos de la forma más inocua posible para que no sean deliberadamente omitidos por el lector. Un colorido ejemplo ocurre en un excelente compendio de

hidráulica, en que el autor le da una connotación particular a los desarrollos teóricos: se ha procurado, sobre todo, que sea un texto eminentemente práctico y útil y donde se ha huido siempre que ha resultado posible, de la exposición en él de complicadas teorías que hubieran podido llegar a oscurecer lo fundamental o básico [32]. Si se omiten explícitamente estos desarrollos teóricos, ocurre que ya no hace falta conocer la notación matemática ni adquirir cierta práctica en manipulación y transformación de formulaciones teóricas, herramientas prácticamente indispensables para las generaciones de ingenieros graduados antes de 1985.

Al dejar la perspectiva analítica de lado, y al omitir del currículo universitario habilidades básicas para comprenderla, se está dando la principal condición para convertirla en

mito: el desconocimiento del dialecto en que se escribieron las publicaciones de ciencia básica de ingeniería con este estilo; solo que en este caso, por dialecto se entiende notación matemática y la falta de un vínculo contextual con eventos contemporáneos, no de idioma.

Es innegable que las técnicas de cálculo mejoran, y que los campos de conocimiento crecen, las teorías son refutadas o desbancadas por nuevas, pero sí hay muchos conceptos fundamentales y mediciones que cambian poco o nada que mantienen su valor en el campo.

El tratado sobre teoría de la propagación de ondas sonoras [33] de 1894 contiene principios que a la fecha han cambiado tan poco que los compendios teóricos generales publicados más recientemente asociadas al tema[34],[35] son relativamente pocas y los conceptos en esencia son los mismos. Las aplicaciones, los métodos de cálculo, y la instrumentación si son muy diferentes, pero se basan en la misma descripción conceptual y por ende su valor intelectual es comparable.

Fortalecer los ejes de pensamiento

Para elaborar una estrategia de formación que favorezca el pensamiento crítico y una valoración de la creatividad y el conocimiento como aptitudes complementarias, es necesaria una sólida base conceptual y un considerable esfuerzo de recolección de información contextual.

En términos prácticos, estas componentes se encuentran prácticamente aisladas: los anales de la revista *Teoría de la educación* (Ediciones Universidad de Salamanca, Salamanca, 1986-) no hacen mención a enseñanza de la ingeniería, pero sus artículos lucen sólidas bases filosóficas y una clara racionalidad. Esto contrasta con los registros de la *Revista Educación en Ingeniería* (Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería, Bogotá, 2006-) cuyas publicaciones están dirigidas a difundir técnicas de enseñanza para docentes de arquitectura e ingeniería, pero no son esfuerzos cohesivos ni consistentes en su temática o enfoque.

Este contraste encuentra réplica en muchas organizaciones educativas de formación universitaria, y el contexto regional no es la excepción. Como se trata de un fenómeno sistémico, no se puede variar la cultura de trabajo sino con reformas institucionales; en el mejor de los casos tardarán varios años en llegar a implementarse como técnicas en el salón de clase, talleres de diseño, o laboratorios didácticos.

Para facilitar este tipo de transición, o quizás para que ocurra en principio en las aulas para que se herede a los demás aspectos de la gestión de las instituciones educativas, se propone regularizar las siguientes iniciativas que son compatibles con la enseñanza de ciencias aplicadas a nivel universitario.

La actualización continua tiene que ser esencialmente aditiva, no sustitutiva. Hay incontables ejemplos de teorías, técnicas e ideologías que en el transcurso de unos pocos años han pasado de recibir mucha publicidad por ser innovadoras a ser relegadas como anacrónicas en el momento en que aparece una alternativa distinta, sin mucha consideración por una valoración objetiva de si se trata de una evolución o sencillamente un planteo diferente.

El pensamiento crítico no podrá favorecerse de esta actitud, por lo que la presentación de artículos técnicos, metodologías o normativa debe hacerse siempre con un marco de referencia adecuado, compuesto por el contexto de origen, el contexto local y una referencia *fecha* al fundamento teórico.

Al vincular una técnica o un desarrollo razonado a su contexto de origen, el alumno podrá adaptar mejor el conocimiento a la necesidad local en que la considere aplicable, en lugar de asumirlo como una verdad que eventualmente podrá sustituirse. Si hace una sustitución de conocimiento, la idea es que lo haga tras un razonamiento crítico de la alternativa, o mejor aún, que proponga una alternativa nueva con fundamento razonado y un proceso objetivo para comprobar sus hipótesis en el contexto local.

Parte del refuerzo de esta actitud crítica ante la novedad debe venir acompañada de un recordatorio sutil de la fecha de origen de aquellas teorías, técnicas, normativa o ideas que han cambiado poco o nada en su esencia. Si bien individualmente las fechas pueden parecer un dato de limitada utilidad, en conjunto proveen perspectiva a la hora de valorar teorías nuevas, considerar la relevancia de publicaciones en el área de especialidad, y en la selección de material de estudio individual.

La referencia al fundamento teórico, en especial si se puede hacer mención de sus conceptos sustantivos, prepara la mente a asumir dentro del grupo de conceptos básicos la información, propuestas, problemas o resultados de mediciones que provengan de las aplicaciones de la ciencia. Se podría argumentar que esto puede perjudicar el pensamiento creativo, pero eso es sólo si se considera axiomática; desconocer u olvidar adrede los fundamentos teóricos vigentes obliga a repetir errores o trabajo que se hubiera podido evitar con un razonamiento fundamentado.

Los **modelos numéricos deben tratarse como una herramienta** en todo contexto y cuando se usa, es sólo para dar visión adicional a la que ya se tiene, no como un fin o un fundamento de una carrera profesional. Esto implica que el elemento central de un tópico de una clase o una charla debe ser el problema de diseño y no el paquete informático con el modelo geométrico; una discusión productiva acerca de política energética demanda datos fidedignos con procesamiento estadístico riguroso, pero debe centrarse en las ideas y no en las carencias que pueda tener por la capacidad del equipo de cómputo contemporáneo.

En medida de ello, no es conveniente estimular que los alumnos obtengan certificados de rendimiento en el uso de determinado paquete informático; al contrario, los cursos cortos o de educación continua deben enfocarse a talleres de diseño, de solución de problemas o de formulación de proyectos. Este tipo de actividades en efecto demanda el uso de todo tipo de herramientas, entre ellas las de modelado numérico, pero su centro conceptual está en el propósito, no el medio.

Si bien la experiencia de un experto o la documentación inmediatamente accesible son invaluableles como referencia, **el aprendiz que hace es el que adquiere experiencia**, en contraste con memorización o réplica que comúnmente se asocian a procesos de enseñanza consideradas menos efectivas. Esta percepción se debe probablemente a que el almacenamiento de información o protocolos en forma aislada no producen una gratificación a su usuario; se percibe como un mal necesario que en el transcurso de otras actividades le resultarán de utilidad.

Esta característica de la mente humana se puede aprovechar para que el docente seleccione actividades en donde haya interacción activa y directa con el objeto de estudio; la investigación de referencias, interacción con expertos y el uso de bases de datos de artículos o de mediciones será importante, pero secundario a la preparación de bocetos, valoración de prototipos, toma de mediciones, discusiones de grupo y diseño de experimentos. Algunos temas de estudio se pueden cubrir con foros de discusión; otros pueden enfocarse como un problema de análisis, o como un caso para taller de diseño. Cada uno de este tipo de actividades es similar a sus labores profesionales, en contraste con las clases magistrales en semestres regulares o las pruebas escritas. El inconveniente de este tipo de actividades es la alta carga de trabajo para todos los involucrados y la cuidadosa coordinación por la que debe velar el equipo docente.

Quienes hayan impartido lecciones, charlas o seminarios con cierta interacción con la audiencia probablemente habrán usado técnicas que pertenecen a estos tres grupos de

acciones, y reconocerán que tienen mejor efecto a largo plazo en la formación de los alumnos, a sabiendas de que es más difícil que sean aceptadas en el entorno inmediato del aula precisamente por lo señalado a lo largo de este ensayo.

Conclusiones

Las observaciones que se discutieron están presentes en cualquier trabajo de índole técnica, y sin duda el lector habrá reconocido la influencia de estos factores en el rendimiento de las organizaciones. La calidad del trabajo intelectual puede dejarse evolucionar según la tendencia de la demanda o de las circunstancias, pero los saltos evolutivos serán más frecuentes si se orientan con un estilo de pensamiento que complemente el área de conocimiento especializado y actual con las siguientes reflexiones:

- Con frecuencia se confunde la información desactualizada con conceptos anacrónicos, por lo que una gran cantidad de útiles abstracciones son relegadas como material de archivo que sólo se consulta por razones históricas, cuando son útiles como herramienta de aprendizaje o bien conforman el fundamento del conocimiento y la técnica contemporánea.
- El modelado en espacios virtuales de fenómenos físicos y sociales que es posible gracias a la capacidad de cálculo de las computadoras digitales y la evolución de los programas de cómputo con interfases de usuario intuitivas es una herramienta tan poderosa y atractiva que ha ido suplantando la capacidad analítica de algunos profesionales en lugar de complementarla.
- La experiencia tanto en la ejecución práctica de un trabajo intelectual como en el proceso de asimilación de los conceptos abstractos que resulta al estudiar o incluso preparar tratados teóricos provee mejor capacidad analítica y de síntesis de soluciones novedosas. Esto contrasta con la poca efectividad de sobrealimentarse de cursos de actualización, aplicación de exámenes de acreditación o el uso de metodologías de aumento de productividad que nacieron en sistemas de manufactura masificada.
- Se propone fortalecer las actividades formativas en donde el aprendiz acciona, tanto en un entorno académico como uno empresarial, con un enfoque de aprendizaje aditivo y con adecuada contextualización. Esto le permitirá aprovechar mejor las sesiones de capacitación y un enfoque autodidacta, dado que estimulará el reconocimiento del valor práctico del conocimiento teórico y una valoración razonada

de las tendencias contemporáneas, trátense de teorías unificadoras o de técnicas de trabajo.

La verdadera innovación en la producción rutinaria, en la ejecución del trabajo intelectual o en patrones de pensamiento humano es lo que en general los individuos o las organizaciones persiguen, de una u otra manera, para lograr sus objetivos. Este ensayo reconoce algunas de aquellas actitudes y entornos que favorecen el intercambio de ideas con la red de pensamiento humano con la que necesita interactuar. Con ello se espera inspirar estudios sistemáticos específicos acerca de cada uno de los aspectos tratados para su implementación efectiva en la enseñanza de las ciencias básicas a nivel universitario.

Referencias

- [1] J. C. Malvino, *Electrónica básica* (McGraw-Hill, México, D.F., 1991), 4^a ed.
- [2] A. L. Kohan, *Manual de Calderas* (McGraw-Hill, Madrid, 2000).
- [3] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Designs* (Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005), 3a ed.
- [4] R. Budynas and J. K. Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (McGraw-Hill Interamericana, México, D.F., 2010), 8a ed.
- [5] J. E. Shigley and C. Mischke, *Diseño en Ingeniería Mecánica* (McGraw-Hill, México, D.F., 1996), 5a ed.
- [6] L. A. Reiners, How can libraries dispose of unwanted stock? *SCONUL Focus* (2013).
- [7] M. Gardner, *Los grandes ensayos de la ciencia* (Patria Cultural, México, D.F., 1999).
- [8] International Telecommunications Union, *World Telecommunication/ICT Indicators database 2015* (ITU, París, 2015), 19a ed., CD-ROM.

- [9] S. D. Savransky, *Engineering of Creativity: Introduction to TRIZ Methodology of Inventive Problem Solving* (CRC, Boca Raton, 2000).
- [10] J. Chen, *Proceedings of the 2013 International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation* 2, 391 (2014).
- [11] Consumer Electronics Association, *2014 CE Product Life Cycle Report* (CEA, Arlington, 2014), DVD-ROM.
- [12] C. Ely, *Consumer Electronics Association Blog* (2014), descargado el 2 de setiembre de 2015 de <http://www.ce.org/Blog/Articles/2014/September/The-Life-Expectancy-of-Electronics>.
- [13] J. Mudge, *Cloud computing: Opportunities and Challenges for Australia* (Australian Academy of Technological Sciences and Engineering, Melbourne, 2010), ISBN 978-1-921388-15-6.
- [14] C. Pereira, *Term Papers for CB8031: Marketing and Value Chain* (2015), descargado el 2 de setiembre de 2015 de <http://www.academia.edu/11141073/Marketing-AnalysisofAppleWatch>:
- [15] United States Department of the Treasury, *Internal Revenue Service Publication 946*, 114 pp. (2014), descargado el 15 de marzo de 2015 de <http://www.irs.gov/pub/irs-pdf/p946.pdf>.
- [16] C. Hirsch, *Numerical Computation of Internal and External Flows* (Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 2007).
- [17] A. F. Mills, *Transferencia de calor* (McGraw-Hill Irwin, Santafé de Bogotá, 1997).
- [18] J. Tuszon, *Centrifugal Pump Design* (John Wiley & Sons, Nueva York, 2000).
- [19] N. Navimipour, A. Rahmani, A. Navin, and M. Hosseinzadeh, *Computers in Human Behavior* 46, 57 (2015).
- [20] R. Roj, *Journal of Computational Design and Engineering* 1, p. 161 (2014).
- [21] D. Ullman, *The Mechanical Design Process* (McGraw-Hill, Nueva York, 2009), 4a ed.

- [22] United States Department of Labor, *Occupational Outlook Handbook 2014-15* (Bureau of Labor Statistics, Washington, 2015), CD-ROM.
- [23] N. Cugueró and J. Rosanas, Documentos internos de la Escuela de Dirección de Empresas de la Universidad de Navarra. 22 pp. (2011).
- [24] Vibration Institute, *Certification Schemes* (Oak Brook, 2015), descargado el 8 de julio de 2015 de <http://www.vi-institute.org/certificationschemes>.
- [25] American Society of Quality, *The Value of an ASQ Certification* (ASQ, Milwaukee, 2015), descargado el 9 de setiembre de 2015 de <http://asq.org/cert>.
- [26] Human Resources Certification Institute, *Our HR Certifications* (HRCI, Alexandria, 2015), descargado el 6 de agosto de 2015 de <http://www.hrci.org/our-programs/our-hr-certifications>.
- [27] K. Daniel and J. Heywood, *Labour Economics* 14, 35 (2007).
- [28] V. Kopytoff, Tech industry job ads: Older workers need not apply *Forbes Magazine* (2014).
- [29] S. Slote, *Weeding Library Collections: Library Weeding Methods* (Libraries Unlimited, Westport, 1997), 4a ed.
- [30] V. Gregory, *Collection Development and Management for 21st Century Library Collections: An Introduction* (Neal-Schuman Publishers, Inc., Chicago, 2011).
- [31] W. Shyy, *Computational Modeling for Fluid Flow and Interfacial Transport* (Dover Publications, Inc., Nueva York, 1994).
- [32] A. Serrano Nicolás, *Oleohidráulica* (McGraw-Hill, Madrid, 2002).
- [33] J. W. Rayleigh, *The Theory of Sound*, Vol. I (Dover Publications, Nueva York, 1945), 2a ed.
- [34] P. M. Morse y K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics* (Princeton University Press, Princeton, 1986).
- [35] U. Ingard, *Acoustics* (Jones & Bartlett Learning, Boston, 2008).

Este artículo forma parte de:

REVISTARQUIS

Para más información, artículos, e instructivo de
publicación, visite:

www.arquis.ucr.ac.cr/revistarquis.html