

Investigar para Innovar en Ingeniería (I³)



Carlos Araya (*)

Artículo basado en la conferencia impartida en el Instituto Tecnológico de Costa Rica el 13 de noviembre del 2012, por invitación de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión.

Desde que dejé 18 años de labores como profesor del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), me he dedicado a apoyar la creación de empresas que busquen diferenciadores tecnológico altos como base de competición. Por esta razón, usualmente participo en proyectos empresariales altamente basados en investigación. Es solo desde este ángulo que puedo contribuir con algunas ideas sobre cómo potenciar la investigación en ingeniería en un instituto como el TEC.

Nuestra sociedad reconoce cada día más la importancia de la innovación en el crecimiento social y económico. Como todos sabemos, la productividad de las inversiones, en general, es muy baja –de otra manera no habría tanto dinero en los bancos y fondos de préstamos e inversiones-. Así, si nosotros pudiéramos llevar la productividad en la innovación más allá, tendríamos propuestas muy fuertes sobre cómo lograr un crecimiento sostenible.

La relación entre innovación e investigación a veces no es muy entendida. Hoy se acepta que innovación es cambio, en nuestro caso cambio tecnológico, cuyo resultado es asimilado por la sociedad. Por tanto, para lograr impacto basado en innovación y escalarlo a niveles que se reflejen en nuestro desarrollo, debemos entender que hay un componente

social muy importante para el éxito de la investigación en ingeniería.

Asegurarse de que la investigación es realizada en forma productiva es muy importante. Entender esto ha llevado a muchas universidades líderes a empujar su investigación en ingeniería hacia la generación de emprendimientos. Se dice que solo un 4 por ciento de los proyectos de investigación son exitosos en resolver el problema originalmente planteado. Por otro lado, como todos sabemos, la tasa de mortalidad de empresas de tecnología es altísima, más alta que la de los proyectos de investigación.

En el *Venture Capital* (VC), cuyos participantes tienen mucha experiencia, se trata de apostar a recuperar las inversiones concretando un proyecto exitoso de cada diez emprendimientos. Si esto se hace sin experiencia, el porcentaje de éxito puede bajar a entre un uno y un 3 por ciento. Por lo tanto, miles de proyectos empresariales tampoco funcionan.

A diferencia de los VC, si un experto además se involucra directamente en el proyecto empresarial, posiblemente el éxito se puede obtener un 50 por ciento de las veces. Eso quiere decir que mucho del éxito posiblemente está en el método y sería más influenciado por la experiencia que por las ideas; de hecho, se dice que las ideas están sobrevaluadas (1). Es natural que lo mismo suceda con la investigación.

Como veremos en este artículo, hay paradigmas equivocados sobre la estrategia de desarrollo de una sociedad, su generación de conocimiento y su potencialidad futura; ello muestra que hay una gran oportunidad para países como el nuestro y para empresas innovadoras.

En el pasado se suponía que había una separación entre la investigación básica y la aplicada, de desarrollo, de “uso de”. Hoy en día no es así: ahora se persigue una gran interacción entre la búsqueda de la solución a un problema y el conocimiento científico que se deriva de esto, a un punto tal que contradice los modelos y pensamiento establecidos en muchas estrategias e instituciones.

El éxito de los graduados universitarios en el nuevo mercado demanda de un fuerte entrenamiento en métodos de investigación que distan mucho de los tradicionales, así como de un dominio profundo de lo que

se propone como las nuevas “ciencias básicas”. Desde el día uno, participarán en un ambiente cambiante basado en proyectos de investigación en tecnología y necesitan una formación relevante para lo que harán.

Como preámbulo para describir algunas de las estrategias que se usan en investigación y desarrollo (R&D) en ciertas ingenierías que llamaremos “frías”, tales como la computación y la electrónica, trataremos de explicar la relación que existe entre la investigación aplicada y la básica. Veremos que ambos tipos de investigación terminan fundiéndose en métodos que, si bien es cierto están basados en ciencia y son bastante formales, llevados al plano de innovación incorporan la flexibilidad requerida en espacios muy complejos (2).

Presentaremos algunas de las estrategias de investigación más usadas en ingenierías frías y las relacionaremos con métodos usados en emprendedurismo que pretenden maximizar el éxito.

Finalmente presentaremos algunos espacios de oportunidad que parecen accesibles y revisaremos métodos usados en algunas universidades líderes para fomentar la innovación. Empezaremos por un poco de historia basada en (3).

Historia

Se dice que los griegos, mediante la indagación, trataban de generar el conocimiento de las causas y efectos de los sistemas naturales buscando así “sacar a los dioses de estas relaciones”. Sin embargo, desdeñaban su aplicación pues consideraban que podía corromper el proceso hacia el conocimiento.

Se dice que hasta Arquímedes negaba la aplicación de muchos de sus descubrimientos y creaciones. Al parecer, solo Hipócrates, el padre de la medicina, realmente hacía investigación con objetivos aplicados.

Aún así, los griegos inventaron muchas cosas avanzadas, tales como una complicada máquina para entender el sistema solar (el mecanismo de anticitera) y del cual podría haber derivado el reloj. Pero se quedaron allí. Los romanos fueron la antítesis de los griegos. Aunque admiraban a estos por sus descubrimientos, en el fondo los romanos eran ingenieros que se enfocaban más en la aplicación del conocimiento. Así inventaron conceptos de ingeniería y arquitectura muy

avanzados y muchos de los conceptos de administración y organización corporativa que han llegado hasta nuestros días.

En la Edad Media el interés por el conocimiento sistemático fue limitado y hasta perseguido. Dichosamente el ímpetu renacentista por una nueva realización del papel del hombre frente a la naturaleza y de la forma sistemática de generar el conocimiento abrió camino a la revolución científica.

Con el Renacimiento se expandió de nuevo la preocupación por el conocimiento no solamente al estilo de los griegos, sino también por las artes aplicadas, al estilo de los romanos. La concepción griega de separación entre investigación por conocimiento puro (clásica) y aplicada, no llegó de Roma sino a través de los libros árabes que los monjes tradujeron sorprendidos por haber sido escritos 1500 años antes. Las cosas vinieron juntas: tanto por investigar para la aplicación, como simplemente para entender; y así se inició un proceso de evolución.

Fueron Sir Francis Bacon (con su método inductivo), por un lado, y René Descartes (con su método deductivo, también llamado método científico) por otro lado, los más fuertes impulsores de una nueva visión.

Francis Bacon creó la que es posiblemente la sociedad más antigua, la *Royal Society* en Inglaterra, con el objetivo de *lograr el avance tanto del conocimiento como de las artes* –ambas cosas juntas-. Nació la idea de promover una era de desarrollo del conocimiento que también fuera aplicado. Se reconoció que la investigación podía resolver problemas reales aplicados y, a su vez, que el mismo estudio del problema daba pie para hacer nuevas investigaciones y generar nuevo conocimiento científico.

No obstante, esta nueva visión de generación de conocimiento con objetivos conjuntos no fructificó en el desarrollo de las universidades de aquella época. Las universidades nacieron con un modelo griego tan clásico como clasista y esta visión prevaleció por muchos años hasta la Revolución Industrial. Con las ideas del Renacimiento y de Descartes las universidades persiguieron la generación del conocimiento por medio de investigación dirigida a lo puro. Así, se mantuvo la aplicación fuera de esas instituciones y las élites que tenían acceso se preparaban en humanidades y ciencias. La aplicación seguía

siendo poco elegante y su enseñanza delegada esencialmente al método de aprendices.

Con la Revolución Industrial las cosas empezaron a cambiar. Las universidades no tuvieron una mayor influencia ni jugaron un papel importante en esta Revolución, sino que fueron los emprendedores los que la produjeron.

Fue muy controversial el hecho de que fueran emprendedores, tales como Thomas Edison –un estudiante universitario ‘retirado’– los que estaban provocando una transformación sin paralelo en la historia. Algunos tenían una formación científica clásica universitaria, tal como Alfred Nobel, dedicados más a la ingeniería, mientras que otros, como Edison, eran sumamente pragmáticos; pero la producción de conocimiento técnico aplicado comenzó a generar grandes resultados. La sociedad europea reconoció que el conocimiento y experiencia en la construcción de máquinas y la solución a problemas de ingeniería y administración podían tener un impacto muy importante en el desarrollo económico. Esto produjo la creación de las universidades técnicas, principalmente en Alemania y Francia. En Alemania se hizo una separación entre las universidades clásicas (*Wissenschaft*) y las instituciones técnicas (*Technische Hochschulen*).

Al final del siglo XIX y principio del XX, las universidades técnicas alemanas generaron una gran cantidad de ingenieros y atrajeron a muchos estudiantes de diferentes partes del mundo. Muchos de ellos llevaron entonces las ideas de vuelta a sus países de origen provocando que nacieran los institutos de tecnología en otros lugares, tal como los Estados Unidos (EE.UU.).

De esta manera, aunque se reconocía la importancia de la aplicación, se propagaba la concepción de universidades y escuelas técnicas diferentes para la enseñanza y la generación de conocimiento en aspectos técnicos y de conocimiento puro.

Sin embargo, para 1937 se había hecho evidente que los alemanes habían avanzado en la producción de conocimiento aplicado, que tenían un gran potencial económico y que además representaban un enorme riesgo. En los EE.UU., Roosevelt se dio cuenta de que había un problema importante, lo vio venir y creó la *Office of Scientific Research and Development* (OSRD) tanto para hacer avan-

zar el conocimiento científico como para producir conocimiento aplicado. La dirección de esta oficina no fue fácil de encargar y finalmente recayó en Vannevar Bush, un ingeniero, inventor y administrador.

Vino la II Guerra Mundial y con la bomba atómica quedó claro que la investigación aplicada podría producir cambios fundamentales para la humanidad.

El historiador George Dyson en su libro reciente *“The Turing Cathedral”* (4), describe cómo la computadora nació junto con la bomba atómica. El autor dice que los interesados en construir la primera máquina hicieron un pacto con el diablo –los propulsores de la bomba atómica– para obtener el dinero necesario para su creación a cambio de enfocar su mayor esfuerzo en realizar los cálculos necesarios para la bomba.

John Von Neumann – quien inventó el concepto de computadora como es hoy en día, basado en las ideas del matemático inglés Alan Turing, negoció los recursos para construir una máquina que representara los procesos nucleares. De esta manera, a puras tarjetas perforadas –donde cada tarjeta simulaba un átomo– podían simular la dinámica de 100 mil átomos en forma conjunta, chocando unos contra otros, considerando su dirección, energía, *spin*, etc. Con eso ayudaron a predecir lo que sucedería con la bomba. Aunque casi todo el conocimiento que se ocupaba para crear la bomba había sido generado desde antes, particularmente con las teorías de Niels Bohr, el cómo de su aplicación hacía falta.

Von Newman visualizó que más allá de los cálculos requeridos por la bomba, con la máquina se podrían hacer muchas otras aplicaciones tales como encriptación de información; algoritmos genéticos y principios de evolución simulados para producir nuevas especies; entes artificiales; simulación de dinámica de poblaciones; métodos de Monte Carlo; etc. Todo esto utilizando tarjetas. Tuvieron una gran visión. George Dyson y otros opinan que en la Segunda Guerra Mundial el verdadero avance fue realmente casi solo en ciencia aplicada.

El modelo lineal

Terminada la II Guerra Mundial, Roosevelt le solicitó a Vannevar Bush proponer un modelo de investigación y desarrollo científico

para la post-guerra. La convicción era que el país que dominara la investigación científica dominaría el mundo. El modelo propuesto por Vannevar, recogido en su libro *“Science, the Endless Frontier”*, tuvo un impacto tremendo en nuestra interpretación de la investigación y la continuada separación entre básica y aplicada.

Bajo este modelo, conocido como el *modelo lineal*, la investigación se ve como un proceso lineal donde básicamente se introduce dinero por un lado; se realiza investigación básica que genera conocimiento; este conocimiento alimenta entonces la investigación aplicada; y con los resultados de esta se generan entonces productos que van a hacer avanzar la economía de una sociedad y producir el beneficio social. Así, se consideraba que este modelo sostendría la supremacía de cualquier país que lo utilizara.

El modelo crea una separación entre investigación básica y aplicada y sostiene que la una satisface a la otra. De acuerdo con este modelo, la investigación por el puro conocimiento genera la materia prima para que la investigación aplicada produzca tecnología. Por muchos años, la investigación en EE.UU. se fundamentó en este modelo y aunque un enorme costo permitió realizar grandes proezas con la expectativa de que la investigación aplicada derivada generaría eventualmente un gran beneficio social. La reacción al desarrollo del *Sputnik*, los viajes a la luna, etc., produjeron un impacto tremendo: se aumentó el gasto e inversión en in-



vestigación básica y en ingeniería y con este paradigma se caminó por bastante tiempo.

Un cambio de modelo

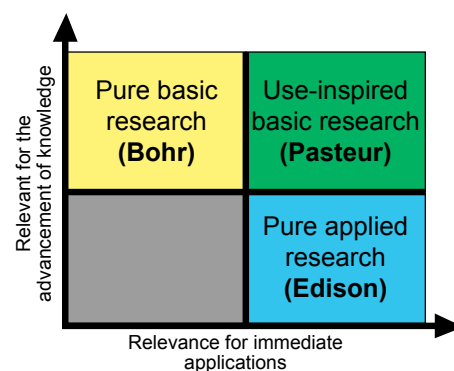
Sin embargo, la evidencia de que no necesariamente tenía que ser como lo indicaba el modelo lineal comenzó a aparecer en lugares donde no se esperaba, tal como el Japón. En vez de ponerse a hacer grandes inversiones en investigación básica, los japoneses comenzaron a dar más énfasis a la aplicación de las ideas sin ser ellos los generadores de la mayoría de la investigación básica necesaria. Y con esto rompieron el mito de que el que hace investigación básica tiene el conocimiento y el poder. Fueron ellos los propulsores de otra clase de modelos que podían producir un gran desarrollo y descubrimientos muy importantes. En paralelo a esto, el costo de la investigación básica continuó incrementándose.

El paradigma lineal no necesariamente funcionaba y comenzaron a aparecer numerosos espacios de oportunidad en los cuales una forma de investigación retroalimenta a la otra y quedó claro que ambas formas podrían funcionar en forma diferente pero complementaria. Se asemejaba a la paradoja del huevo y la gallina.

El cuadrante de Pasteur

Hace unos 15 años, Donald Stokes planteó la crítica al modelo lineal proponiendo otro modelo denominado el *cuadrante de Pasteur* (3). Los griegos decían que si uno mezcla las dos formas de interrogante, una corrompe a la otra y la más desfavorecida sería la hoy equivalente a la investigación básica, porque si se persigue su aplicación, el proceso se sesga de alguna manera.

De acuerdo con Stokes, eso no tiene que ser necesariamente así. Stokes propuso volcar alguna de las aristas del modelo lineal para crear un espacio de cuatro dimensiones: el llamado cuadrante de Pasteur. De esta manera, en el eje de las X se representaría si el interés es de uso o no uso de los resultados de la investigación mientras que en el eje de las Y se representaría si el objetivo es aumentar o no el conocimiento. Ver el gráfico adjunto. Este modelo recibe el nombre de “Pasteur”, pues Pasteur en su carrera se fue enfocando cada vez más en generar conocimiento más fundamental, a la vez que intentaba resolver



Cuadrante de Pasteur.

Tomado de Internet.

problemas prácticos cada vez más complejos. De esta manera ubicamos a Pasteur en el cuadrante superior derecho pues para él ambos objetivos están ampliamente interrelacionados; no había diferencias ni tenía por qué haberlas.

En contraste al cuadrante de Pasteur está la investigación tipo Edison, en la que no importa tanto la generación de conocimiento como producir una solución a un problema. El cuadrante de Pasteur es uno de los más ampliamente aplicados en este momento y nos da la idea de que no tiene por qué haber una separación entre los dos tipos de investigación. De hecho, en muchos de los centros de investigación más desarrollados, especialmente en el sector privado, su separación es intencionalmente borrada.

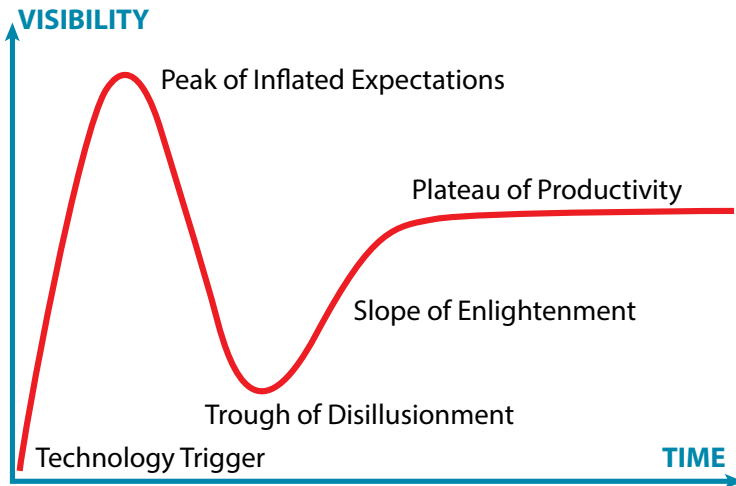
El cuadrante de Pasteur está muy relacionado con lo que hacemos en investigación y desarrollo en computación, farmacia, electrónica, mecánica y otros.

Retomando el objetivo del desarrollo, seguimos teniendo entonces que cuando la aplicación es parte del objetivo, la productividad se vuelve una consideración estratégica. Si fuésemos *financieramente* productivos, tendríamos entonces un motor de desarrollo accionable para cualquier sociedad.

Así, hoy en día el objetivo de la productividad es uno de los más importantes: es decir cómo se hace y cuán eficiente es. A esto también se agrega la dimensión de la investigación privada.

Hoy se considera que la ganancia, en *profit*, por la investigación realizada por una empresa privada es una fracción del beneficio económico que recibe la sociedad. Esto, y la creciente escasez de recursos de los gobiernos, está causando que la investigación privada sea cada vez más estratégica y requerida.

Curva de la depresión de la desilusión



Propuesta del grupo Gartner. Tomado de Internet.

En EE.UU., a principios de la década los 80, la investigación privada sobrepasó a la financiada por el gobierno y actualmente es casi el doble de esta.

Un estudio reciente (9) demuestra que la investigación realizada por el sector privado genera dos veces más beneficios a la sociedad que a la empresa y demuestra que la tasa óptima debería ser al menos dos veces la de los países desarrollados.

Mucho de lo que hoy mueve la investigación es innovación, particularmente en el sector privado. Es decir, encontrar soluciones que además deben ser adoptadas socialmente para ser exitosas. Porque nada se hace con producir algo si se queda en los laboratorios de las empresas.

Por tanto, el tema de cómo manejar la adopción es muy importante y toda institución debería tener una estrategia al respecto. Se requiere de estrategias muy especiales para producir esa adopción y la mejora continua muchas veces es una fuente de investigación aplicada.

La “curva de la depresión de la desilusión”, propuesta por el Grupo Gartner, permite analizar las diferentes fases que usualmente sigue una innovación. Ver gráfica. Empieza con las expectativas y es seguida de las modas; el clímax; la falla de la innovación en entregar lo prometido; la caída de gracia; la depresión de la desilusión donde se dice “eso no sirvió”. Pero si realmente la idea es buena alguien encontrará la manera de sistematizarla, producirla, empacarla y permitir que la gente la utilice (el altiplano).

Hay modas: en computación ahora es la nube y los dispositivos móviles. Si alguien no encuentra la salida adecuada, las cosas se comienzan a caer. La nube posiblemente ya pasó al altiplano, al área en que se están mostrando aplicaciones que obtienen suficiente valor por el costo y donde la promesa efectivamente se está cumpliendo.

Como comentamos en la introducción, las métricas de cuán productivos somos es tema de discusión con la gente de gobierno y negocios, pues ellos dicen que los ingenieros usualmente duramos mucho y nos atrasamos en generar las soluciones. El costo y la imprecisión en las estimaciones de duración ha llevado a toda una nueva forma de ejecución de proyectos de R&D en las ingenierías frías.

Métodos iterativos acelerados (en donde la falla es una parte fundamental del proceso)

En la ingeniería de sistemas de software, ha habido un gran avance de los métodos de trabajo hacia los llamados *métodos iterativos acelerados*.

Posiblemente el lector ha visto que ya casi no se hacen anuncios de sistemas operativos que serán introducidos en el mercado tres años después de ser bautizados. Los métodos iterativos ágiles tratan de aterrizar un proto-producto en la realidad lo más pronto posible, tratando de sincronizar el producto con el entorno.

En nuestro trabajo, que es intensivo en mano de obra, la producción de cualquier produc-

to o componente cuesta mucho dinero. Peor aún, si al final del día hay que abandonar el trabajo, hay que dejar usualmente todo – no quedan recursos o activos reutilizables-. Entonces el riesgo y el costo son muy altos, tan altos que incluso las normas financieras generalmente aceptadas (GAAP) obligan a las empresas a registrar la R&D en software como un gasto. En el caso de otras ingenierías, los recursos y activos utilizados en investigación quedan y pueden servir; pero en software muchas veces no se rescata más que la experiencia.

Aun se utilizan ampliamente los métodos llamados de *cascada*, donde una secuencia de etapas produce una serie de productos parciales (o entregables). Este método, basado en las técnicas pasadas de investigación, en donde se plantea un programa y un cronograma que se va realizando por etapas medibles y cuantificables, es la causa de las catástrofes más grandes en software. Considere por ejemplo que esa metodología es normalmente la responsable de que más de un 70% de los proyectos fallen.

Dichosamente, de unos años para acá se han estado expandiendo los métodos denominados *ágiles* en donde iteraciones rapidísimas para los estándares del pasado se suceden tratando de ajustar hasta los objetivos del proyecto. Se utilizan metodologías denominadas *ágiles*, tales como el *Scrum*.

[Según Wikipedia: **Scrum** es un marco de trabajo para la gestión y desarrollo de software basado en un proceso iterativo e incremental utilizado comúnmente en entornos basados en el desarrollo ágil de software)].

El *Scrum* se ha ido extendiendo y tiene muchas aplicaciones. Por ejemplo, se trata de entender que sembrar un naranjo (un proyecto de resultados a largo plazo) puede tener consecuencias en la construcción de una casa en un ambiente en donde no se conocen todas las variables. Luego nos podemos dar cuenta de que por ahí va un tubo, se necesita una acera o hay otras cosas. Considerando las construcciones viejas de nuestra ciudad, es claro que un sinnúmero de parches reflejan que esta realidad era muy difícil de prever. Y esto en software es aún más dramático.

En el caso del *Scrum* se trata de hacer las cosas diferentes: sembrar un arbolito muy pequeño y entregarlo lo más pronto posible



a las personas que lo van a adoptar para ver si es lo que esperaban. Antes de decir “ya tengo la solución completa de esto”, es mejor dárselo a algunos usuarios para que puedan comenzar a ver si el arbolito es lo esperado, si resuelve el problema y tiene las características necesarias. Ese método por aproximación difiere del método más utilizado en las ciencias tradicionales. En el caso de muchos proyectos de ingeniería fría a veces no se sabe cuál es la verdadera necesidad y cómo se necesita resolver, hoy y en el futuro.

Dado que para que algo sea una innovación debe haber adopción, no se puede anticipar la adopción si los usuarios no se incluyen desde muy temprano en el proceso. Se usa mucho el llamado “diseño guiado por usuarios”, o “diseño de soluciones guiado por los consumidores”, donde se integra al consumidor desde el principio como un miembro activo del equipo y donde el proceso es mucho de prueba y error. Aquí, las hipótesis se generan y desechan sobre una base casi continua.

Ya no esperamos como antes dos años para crear el programa de administración de libros de la Biblioteca o el sistema de Admisión y Registro. Hoy en día posiblemente el arbolito lo entregaríamos en un mes y al mes siguiente haríamos otra versión y otra versión y otra versión...

Esta característica puede ser observada claramente en las aplicaciones para los teléfonos y dispositivos móviles. Inicialmente son sencillas y pequeñas. Los usuarios los usan, aportan sus comentarios y cada mes hay una nueva versión.

Ya casi no existe la enorme ola de adopción y costo producida por una nueva versión. El viejo paradigma de que “viene otra nueva versión” y “hay que cambiarla” -cuando se cambiaba cada dos o tres años- ya no existe. Hoy, con los dispositivos móviles, se dice “hay una nueva versión que se bajará e instalará sola en forma muy rápida” y eso pasa todos los meses, es parte de un diseño del proceso que es eminentemente interactivo.

Trabajo en grupo en ciclos intercalados y acelerados

El método de trabajo es mayoritariamente en grupo y por fases rápidas consecutivas donde la investigación es más académica o básica en algunos momentos y rápidamente estamos de vuelta en la parte aplicada.

Este método es ampliamente usado en investigación genética, biología molecular y otras ciencias y en ciclos muy rápidos. Un ciclo de investigación básica (para entender un problema o remover una limitante severa) seguido pronto por un ciclo de pura investigación aplicada, seguida posiblemente de otro ciclo de investigación básica. Esto es lo que va llevando el proyecto hacia adelante, de manera que el grupo de investigación no se pierda ni en su uso ni en los problemas. Cada fase agrega un elemento nuevo que produce muchas veces una nueva planeación y estrategia, incluyendo un cambio de dirección. Hasta se ha acuñado un verbo para esto: *pivotear*. Y pivotear se supone que es parte del proceso. Es muy común que los equipos de R&D de software tengan reuniones diarias de me-

dia o una hora, juntos todos, a principios de la mañana. Se revisa el avance de todas las tareas que se visualizan como necesarias usando *post-its* pegados en las paredes, con un orden basado en la dependencia de las características de la solución en la que se está trabajando. Se reparten tareas diariamente y se reconfigura todo el plan con los resultados, incluyendo el reinsertar la tarea si es que esta aún no tiene una solución completa. Entre todos los participantes se decide dónde poner el esfuerzo; entre todos se aporta al cómo de la solución. Para esto se restringen las discusiones en tiempo y participación y se decide por medio de una rápida votación. De esta manera, no hay inversión en fases que no sean definitivamente necesarias: *las cosas se hacen en el último momento en que es responsable hacerlo*. Y la arquitectura de la solución es emergente y pensada para que siempre esté lista para el cambio.

La traducción de scrum es melé; se trata de empujar todos juntos para resolver un problema.

[melé.

(Del fr. *mêlée*).

1. f. *Dep.* En *rugby*, jugada en la que varios integrantes de cada equipo, agachados y agarrados, se empujan para hacerse con el balón, que ha sido introducido en medio de ellos, y pasárselo a otro jugador que está detrás.

2. f. Aglomeración alborotada de personas.

Real Academia Española © Todos los derechos reservados]

Recientemente Tim Brown, el director ejecutivo (CEO) y fundador de IDEO (16), un líder en diseño de productos donde diseñaron los primeros computadores Apple, el *mouse* y otras innovaciones, publicó un libro muy interesante llamado “*Change by Design*” (5) sobre cómo introducir el concepto de cambio por diseño dentro de las organizaciones. Su propuesta es diseñar las empresas y organizaciones específicamente pensando que su objetivo principal es cambiar y así construir el cambio como una característica inherente de todo el sistema.

Pensar que el cambio es lo que se va a estar haciendo todo el tiempo, cambia nuestra forma de pensar y los paradigmas, pero en una forma continua. Tim Brown propone “fallar temprano, triunfar pronto”; hacerlo lo más rápidamente posible para poder avanzar rápido.

En el TEC tenemos una oportunidad increíble con los estudiantes; por conversaciones que he tenido con algunos de ellos me doy cuenta de que estamos trabajando en la dirección correcta, integrándolos cada vez más en proyectos de investigación. Hay espacios, pueden participar. Hay que enseñarles a no tener miedo a fallar, mientras lo hagan lo más pronto posible y corrijan y darles las herramientas para que puedan competir en un mercado que necesita la innovación.

La nueva formación en investigación

Nuestro país tiene grandes oportunidades si su estrategia de competición está basada en la formación y la práctica en investigación. De acuerdo con *The Economist*, más de la mitad de las empresas en Silicon Valley han sido fundadas por ingenieros y científicos provenientes de la India; muchos dicen que es por el tamaño del país, pero otros que es por su capacidad y entrega. Yo me inclino por lo segundo. Hay un gran reto para los estudiantes y es nuestra responsabilidad abrirles las oportunidades. Están entrando a una cadena alimenticia que es y va a ser cada vez más diferente a la que nos tocó a nosotros. Hoy las empresas están creando laboratorios de R&D en el país; Intel, por ejemplo, HP; y nosotros debemos prepararlos para competir por las mejores posiciones. Para esto debemos reconocer que el método de investigación que necesitan nuestros estudiantes es hoy en día diferente, basado en paradigmas diferentes y para aprovechar las muchas, diversas y cambiantes oportunidades. En el pasado, la formación universitaria en investigación podía ser más parecida a la empleada en investigación básica tradicional. En el pasado se consideraba que la investigación era para los Ph.D. Hoy en día se espera que nuestros estudiantes sean muy innovadores y los métodos de investigación serán una parte muy importante de su trabajo.

El fin de la fruta fácil

En farmacia, ciencias biológicas, en medicina, en algunas áreas de computación y en otras varias ciencias se considera que estamos terminando una época que podríamos llamar de la *fruta fácil* (6), en términos de investigación y desarrollo, en productos, en conocimiento. Es lógico concluir que lo

que hemos estado descubriendo hasta este momento es solo la fase más sencilla de la realidad. Las soluciones que se necesitan para mantener el crecimiento son mucho más complejas, la realidad es más compleja y lo que el futuro nos traerá será más complejo. Cada vez vamos metiéndonos en una montaña más cerrada, más tupida, donde las cosas van a ser mucho más complejas.

Por esta razón, es muy importante engranar el concepto de cambio y el de investigación interactiva en la formación de nuestros estudiantes y mucho de lo que estamos haciendo en una institución académica.

Adicionalmente, más allá de las destrezas, al nivel cognitivo es necesario buscar alineamientos diferentes. En las siguientes secciones se enumeran algunos temas en donde el autor opina que hay grandes oportunidades para incluir en la formación de cualquier ingeniería —unas nuevas ciencias básicas—. Son temas interdisciplinarios en donde la colaboración en investigación y educación de diferentes departamentos se vuelve necesaria, conveniente y, además de eso, más interesante.

Computación

Si queremos que nuestros egresados estén en la cadena de valor de más alto nivel, debemos aceptar que hoy es inconcebible pensar que ciencias de la computación no es una ciencia básica. La computadora se usa en todo y es una de las herramientas más poderosas para entender la realidad y es altamente utilizada para resolver problemas en casi todas las disciplinas.

Existe la posibilidad de confluir en muchos conceptos pues es como la aguja que enhebra muchos campos. Por computación quiero decir capacidad de programar a un nivel muy sofisticado, dominando lenguajes de programación, algoritmos y estructuras de información (persistentes y volátiles) en forma experta.

Biociencias

Esto también es una nueva ciencia básica. Cualquier ingeniero, sea de electrónica, computación u otra especialidad, debe saber sobre lo que está construida la vida y cómo realizar investigación interdisciplinaria sobre esto. Hay una gran cantidad de oportunidades y va a haber más.

En principio, se puede creer que formar ingenieros en biociencias requiere de equipos muy complejos y caros. Muchos expertos opinan que no es así y apuntan a que uno de los mayores motivadores en su formación, y la base de su comprensión, son los cursos de microbiología.

Microbiología básica enseña a ver el funcionamiento y características de animales y plantas en una forma más sencilla y permite la experimentación e interacción directa con multitud de organismos.

Además tiene aplicaciones que van desde la salud hasta el ambiente. Esto nos abre una puerta enorme, por ejemplo, hacia las ingenierías ambientales y nos permite fundir esfuerzos de diferentes disciplinas. Y nos permite anticipar la muy fuerte revolución que viene en bioinformática, ecología, etc., como veremos más adelante.

Ciencias de datos

Esta es otra ciencia básica y un ingeniero moderno debe entender de estadística y manejar en forma experta un lenguaje de programación para estadística como R (14) o *Matlab*.

Sin las herramientas requeridas para ver, a través del ojo estadístico, una realidad cada vez más compleja representada por una gran agregación de información, se restringe en mucho el ámbito de acción y la profundidad de un ingeniero sea agrícola, electrónico o de computación. Estamos en los albores de la época de los *grandes datos* y hay muchas oportunidades para los llamados científicos de datos. En R está incluido casi todo lo que se necesita en estadística y su visualización y es un lenguaje *open source* de los más usados hoy en día, que acumula diariamente los mejores paquetes para análisis de información masiva.

Finalmente, las ciencias de datos son el camino para entrenar a las computadoras acerca de muchas actividades que van de la mano con la automatización. El aprendizaje mecánico nos permite entender las grandes masas de datos que podemos obtener de nuestros experimentos o trabajo.

La visualización de información tiene un impacto tremendo en nuestro entendimiento de los fenómenos. Por ejemplo, el *gráfico de Voronoi*, que muestra el alcance de las estaciones climáticas en el mundo.

[Wikipedia: El **aprendizaje automático** o **aprendizaje de máquinas** es una rama de la inteligencia artificial cuyo objetivo es desarrollar técnicas que permitan a las computadoras *aprender*. De forma más concreta, se trata de crear programas capaces de generalizar comportamientos a partir de una información no estructurada suministrada en forma de ejemplos. Es, por lo tanto, un proceso de inducción del conocimiento. En muchas ocasiones el campo de actuación del aprendizaje automático se solapa con el de la estadística, ya que las dos disciplinas se basan en el análisis de datos. Sin embargo, el aprendizaje automático se centra más en el estudio de la complejidad computacional de los problemas. Muchos problemas son de clase *NP-hard*, por lo que gran parte de la investigación realizada en aprendizaje automático está enfocada al diseño de soluciones factibles a esos problemas. El aprendizaje automático puede ser visto como un intento de automatizar algunas partes del método científico mediante métodos matemáticos. El aprendizaje automático tiene una amplia gama de aplicaciones, incluyendo motores de búsqueda, diagnósticos médicos, detección de fraude en el uso de tarjetas de crédito, análisis del mercado de valores, clasificación de secuencias de ADN, reconocimiento del habla y del lenguaje escrito, juegos y robótica.

Ecología

Esta es otra ciencia básica y una de las grandes oportunidades para Costa Rica. En el Instituto Nacional de Biodiversidad (INBio) se hizo un excelente trabajo en generación de conocimiento en taxonomía. Hoy conocemos mucho de las especies que existen, pero ahora entender cómo es que los seres vivos interactúan unos con otros y con el medio, cuál es el ecosistema incluyendo recursos y clima y otros parámetros en forma integrada. Ecología es una ciencia que hasta ahora ha estado restringida al plano conceptual y que con los nuevos equipos tiene grandes oportunidades de ser llevada hacia la práctica con consecuencias mucho mayores.

En EE.UU. se acaba de empezar un proyecto que llamado *NeOn*: 15 mil estaciones de rastreo, con antenas de 10 m de altura, que recogerán la información de sensores que están hasta a 10 km de distancia, con el objetivo de documentar la ecología. De esa manera van a tratar de capturar una cantidad masiva de información sobre humedales, vientos, direcciones, químicos, bacterias, etc., por 30 años. Sería muy interesante si pudiéramos establecer relación con *NeOn* (15) y ser parte de ese proyecto poniendo al menos una antena en Costa Rica. Este proyecto producirá una cantidad masiva de información que nos permitiría conocer mejor nuestra ecología y

cómo protegerla y, como veremos más adelante, cómo utilizar ese conocimiento para evolucionar otros procesos.

Hay muchas oportunidades de financiar proyectos para un mejor planeta, entender los ecosistemas naturales para descubrir sistemas de servicios complejos que pueden tener aplicación en otras cosas. Por ejemplo, cómo las hormigas aztecas defienden un guarumo a cambio de servicios de protección y alimentación; cómo sintetizar lenguajes específicos a dominios específicos a partir de los existentes en la naturaleza.

Otras oportunidades: la *semantización del web*

Hay una profunda revolución sobre cómo representar en el computador lo que conocemos respecto a la realidad. Esto ha dado nacimiento a una forma de sistemas de lenguajes, ya no de programación sino de representación, en donde cada vez hay más proyectos que persiguen estructurar la información para hacerla discernible para nosotros y entendible para las máquinas.

En biología, por ejemplo, hay lenguajes formales con los que se trata de escribir completamente un proceso biológico y hasta un proceso químico.

Esto, por supuesto que contribuye de muchas formas al conocimiento, porque hace



que la manera de compartir el conocimiento sea más sencilla y que podamos usar las máquinas de una manera mucho más fuerte, sacándolas del procesamiento numérico hacia al procesamiento lógico. Hay avances muy interesantes que van a caminar a pasos más acelerados en los próximos años.

Ciencias de los servicios

Hace 20 años hubiéramos sido muy escépticos sobre la naturaleza de una ciencia de los servicios y su necesidad. Hoy en día es claro que el crecimiento que tiene el sector de servicios en la economía es enorme y se considera que la innovación es uno de los factores más importantes que sostienen el crecimiento del PIB en el mundo.

La constitución del PIB del mundo se ha ido transformando enormemente. En 1900, el sector de servicios en EE.UU. empleaba al 30 por ciento de la población. Hoy emplea al 83 por ciento. En Costa Rica, el 69 % del PIB está en servicios, mientras que el sector agrícola representa como el 9 por ciento.

¿Qué es la ciencia de los servicios? Es un campo interdisciplinario que tiene que ver con cómo la tecnología apoya los servicios, el mercado, la ingeniería humana y tiene elementos de muchas de las nuevas ciencias que mencionamos arriba. El *Services Research and Innovation Institute*, promueve el avance en investigación e innovación en servicios (17).

En Costa Rica nosotros estamos aprendiendo a ver las cosas desde el lado biológico. Sería sumamente interesante realizar investigación en ecología para reconocer servicios que tengan varios participantes. Un gran reto en los modelos de hoy en día es el llamado encadenamiento de servicios. Otra cosa que podemos obtener de la ecología es conocimiento sobre mecanismos.

Biomímica (18)

La investigación sobre la naturaleza biológica puede ser aplicada buscando soluciones. Posiblemente el lector ha oído hablar sobre la forma en que están dispuestas las escamas en las alas de las mariposas o las escalas de los colores, en particular en las *Morpho*; tienen características muy interesantes que se están usando en pinturas que pueden cambiar de color, por ejemplo.

A esta estrategia de diseño inspirada en la naturaleza se le llama biomímica (18) y consiste en tomar ideas de la naturaleza para crear procesos y diseños orientados a resolver problemas.

Se hacen sistemas que cambian, usan compensaciones térmicas y otras capacidades utilizando mecanismos que vienen de la naturaleza. Aquí, en nuestro país, tenemos uno de los laboratorios más grandes y complejos y esto representa una gran oportunidad para el trabajo interdisciplinario con las ciencias de la vida, computación, electrónica, etc.

Internet de todas las cosas

Se considera que para el 2020 habrá más de 3 mil millones de cosas conectadas inteligentemente a la red de Internet, con una dirección IP, de manera que las vamos a poder ver, medir, entender, saber qué está pasando con ellas. Esto va a producir un cambio tremendo: los automóviles tendrán muchos sensores igual que los puentes y los electrodomésticos y se producirá una cantidad masiva de información, una nueva colección de aplicaciones, de modelos y oportunidades de negocios (19).

La zona económica exclusiva marítima

La zona económica exclusiva marítima que tiene Costa Rica es enorme y rica en especies y, estando allí, no es mucho lo que se está haciendo para protegerla o entenderla. Se me ocurre que se le podría poner un *robotuna* (13), robots pequeñitos que requieren muy poca energía y pueden llevar sensores de muchas cosas. Pero el tamaño y la complejidad ecológica es una oportunidad para convertirnos en líderes no solo en lo verde sino en lo azul.

Algunas ideas de líderes en investigación

Para concluir, presentamos a continuación algunas de las ideas más interesantes sobre cómo se incentiva la investigación en universidades líderes, basado en un conjunto de artículos recientemente publicados por la revista *Science* sobre *Global Research Universities* (7).

El primer número trató de la movilidad laboral mundial; se reconoce que muchos investigadores se están yendo hacia los centros de investigación de Asia por los recursos y las ofertas que allí tienen; chinos, japoneses y coreanos están creando proyectos de investigación de alta envergadura, con muchos laboratorios.

Costa Rica tiene condiciones muy interesantes para la atracción de especialistas extranjeros, tal y como lo percibimos en la industria del software. Atraer especialistas que quieran trabajar aquí es posible si se hace un trabajo activo al respecto. De acuerdo con *Science*, esta clase de acciones es preferible que contratar a egresados propios pues permite mantener la diversidad en una institución y está altamente comprobado que la diversidad es fundamental para la generación de innovación.





La presión por el crecimiento de la institución hay que aprovecharla y ser más sofisticados. Hay un proyecto en Alemania llamado *The Excellence Initiative* (12), guiado por el gobierno, que contribuye con presupuesto para solucionar problemas específicos. Esta estrategia apareció en el segundo artículo de la serie de *Science*. Con los objetivos nacionales claros, muchas de las acciones requeridas podrían ser ampliamente apoyadas por el Gobierno Central, sin necesidad de grandes y complejas inversiones, en nuestro caso. Adicionalmente, el concepto de *laboratorio satélite* introducido en otro artículo de *Science*, consiste en atraer talentos expertos que hayan hecho investigación, que tengan ideas sobre cosas que a nosotros nos interesan. La idea es diferente de la Iniciativa de Excelencia. Por ejemplo, un laboratorio de investigación nuestro (con un recurso particular valioso e interesante), podría invitar a un experto mundial en el campo a establecer una extensión aquí de su laboratorio o centro de investigación, manejado a través de Internet.

Esto se hace directamente con el investigador, no con la universidad, lo cual lo hace sumamente sencillo y ventajoso. Además, no requiere mucho dinero pues se ocupa una fracción del tiempo del experto a cambio de acceso a recursos locales tales como personas especializadas y la ecología costarricense. A nosotros nos da la oportunidad de traer a alguien muy bueno en un tema particular, que nos ayude a trabajar en un proyecto especí-

fico. Con la atracción que tiene Costa Rica, yo pienso que es una gran oportunidad. Finalmente, en el número de febrero del 2013, *Science* publicó "The Many Ways of Making Academic Research Pay Off", con ideas muy interesante sobre la forma en que varias universidades, tales como Stanford, fomentan la transferencia tecnológica a la industria. Esto lo hacen promoviendo y facilitando a sus profesores, investigadores y estudiantes la creación de empresas y modelos de negocios. Los principales objetivos de estas actividades son mantener y atraer a los mejores profesores y estudiantes, atraer fondos de investigación estatales y privados y, eventualmente, lucrar con las regalías producidas por las innovaciones. Es opinión del autor que el TEC tiene una excelente oportunidad para crear espacios que permitan que esto sea posible.

En el *Shanghai Top One Hundred* de las 100 mejores universidades del mundo, Asia tiene la mayor presencia. Al estar Costa Rica en la cuenca del Pacífico, y por los cambios en el mundo y en nuestra política exterior, hay una gran oportunidad para el país y la institución de alinearse con la iniciativa de Asia-Pacífico y entonces mirar también en esta otra dirección.

Bibliografía:

- (1) *Ideas are Overrated: Eric Rie's Radical New Theory*, Wired Magazine, August 30, 2012.

- (2) John Mullins, Randy Komisar: *Getting to Plan B: Breaking Through to a Better Business Model*, 2009.
- (3) Donald E. Stokes: *Pasteur's Quadrant: Basic Science and Technological Innovation*, 1997.
- (4) George Dyson: *Turing's Cathedral: The Origins of the Digital Universe*, 2012.
- (5) Tim Brown: *Change by Design*, 2009.
- (6) Tyler Cowen: *The Great Stagnation*, 2011.
- (7) Science Magazine, *Global Research Universities*, 7 setiembre, 28 setiembre, 2 noviembre del 2012 y, 15 de febrero del 2013.
- (8) The Economist, *Out of the dusty labs*, May 2007.
- (9) *Identifying technology spillovers and product market rivalry*, 2010, 2012, Nicholas Bloom (Stanford University), Mark Schankerman, and John Van Reenen, London School of Economics. Referido en (10)
- (10) The Economist, *Arrested Development*, Ago. 25, 2012.
- (11) Vannevar Bush: *Science, the Endless Frontier*, 1945
- (12) en.wikipedia.org/wiki/German_Universities_Excellence_Initiative
- (13) www.amazings.com/ciencia/noticias/021009b.html
- (14) www.r-project.org/
- (15) www.neoninc.org/
- (16) www.ideo.com, IDEO, A Design and Innovation Consulting Firm
- (17) www.srii.org
- (18) www.iccc.es/2007/04/biomimica
- (19) http://es.wikipedia.org/wiki/Internet_de_las_Cosas

(*)Carlos Araya, Ph.D., es el primer egresado de la Escuela de Computación del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Actualmente es el Presidente de Innovative Ventures LLC y es emprendedor/investigador en varias empresas. La transcripción de la conferencia no incluye respuestas a preguntas ni participación del público.

Los párrafos entre paréntesis y las ilustraciones se agregaron para dar contexto a algunos temas tratados por el expositor. ■